Российская Академия Наук

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

COMPLEX SYSTEMS: CONTROL AND MODELING PROBLEMS

Труды
XXI Международной конференции
3-6 сентября 2019
Самара, Россия

ТОМ I

Proceedings
of the XXI International Conference
September 3-6, 2019
Samara, Russia

VOLUME I

IEEE
Advancing Technology for Humanity
Russia Section est. 1990

САМАРСКИЙ ПОЛИТЕХ
Опорный университет

ИПУСС РАН

IEEE (Российская секция)

Самарский государственный
технический университет

Институт проблем управления
сложными системами
Российской академии наук

IEEE (Russian section)

Samara State
Technical University

Institute for the Control
of Complex Systems
of Russian Academy of Sciences

Труды XXI Международной конференции,
Том I
Proceedings of the XXI International Conference
Volume I

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

COMPLEX SYSTEMS: CONTROL AND MODELING PROBLEMS

3-6 сентября 2019, Самара, Россия
September 3-6, 2019, Samara, Russia

Редакторы:

С.А. Никитов, Д.Е. Быков,
С.Ю. Боровик, Ю.Э. Плешивцева

Editors:

S.A. Nikitov, D.E. Bykov,
S.Yu. Borovik, Yu.E. Pleshivtseva

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ОФОРТ
Самара 2019

УДК 519.7
ББК 32.817
П78

Конференция получила финансовую поддержку
Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-08-20070)

The Conference received financial support
from Russian Foundation for Basic Research (project № 19-08-20070)

П78 **Проблемы управления и моделирования в сложных системах:** *Труды XXI Международной конференции* (3-6 сентября 2019 г. Самара, Россия): в 2-х т. / Под ред.: **С.А. Никитова**, **Д.Е. Быкова**, **С.Ю. Боровика**, **Ю.Э. Плешивцевой**. - Самара: ООО «Офорт», 2019.

ISBN 978-5-473-01246-0
Т.I. - 556 с.
ISBN 978-5-473-01247-7

С 3 по 6 сентября 2019 года в г. Самаре состоялась XXI международная научная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (ПУМСС-2019). Конференция была организована Институтом проблем управления сложными системами РАН (ИПУСС РАН) совместно с крупнейшим вузом Поволжского региона - Самарским государственным техническим университетом (СамГТУ) при содействии российской секции IEEE. В мероприятии приняли участие исследователи из ведущих университетов и научно-производственных организаций Азербайджана, Армении, Беларуси, Германии, Италии, Испании, Китая, Латвии, Польши, Финляндии, Чехии, США, ЮАР. Российская Федерация была представлена учеными из Российской академии наук, научно-исследовательских институтов, вузов, научно-производственных объединений и промышленных предприятий страны. На конференции обсуждался широкий спектр вопросов, связанных с передовыми достижениями науки и техники в области современной теории оптимального управления, электротехнологий и электронной техники, робототехники, новых информационных, коммуникационных и измерительных технологий, выработки и принятии решений при управлении в социально-экономических системах. Традиционно в фокусе внимания конференции были проблемы, связанные с разработкой моделей, методов и средств искусственного интеллекта (ИИ) для автоматизации процессов приобретения и компьютерного представления знаний, выработки и принятия решений, в том числе при управлении предприятиями, что формирует парадигму INDISTRY 4.0. В первом томе сборника трудов ПУМСС-2019 представлены пленарные доклады, а также доклады участников конференции по направлениям: современные энергосберегающие электротехнологии; теория оптимального управления и ее приложения; моделирование и управление в технических системах.

The XXI International Scientific Conference ”Complex Systems: Control and Modeling Problems” (CSCMP-2019) was held on September 3-6, 2019 in Samara (Russia). The Conference was organized jointly by the Institute for Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences (ICCS RAS) and the largest higher institution of the Volga Region – Samara State Technical University (SSTU) with assistance from the IEEE (Russian Section). The scientists from the leading universities and research and production organizations of Azerbaijan, Armenia, Belarus, Germany, Italy, Spain, China, Latvia, Poland, Finland, Czech Republic, USA and South Africa participated in the Conference. The Russian Federation was represented by the researches from Russian Academy of Sciences, research institutes, universities, research and production centres and enterprises. The Conference discussed a wide range of issues relevant to the advances in science and technology in the field of optimal control theory, electrotechnologies and electronics, robotics, intelligent systems and communication technologies, measuring techniques and diagnostics, decision-making in social-economic systems. One of the traditional areas of the Conference is the developing of Artificial Intelligence (AI) models, methods and tools for digitalization of knowledge and automation of the decision-making processes for business administration including the paradigm of INDUSTRY 4.0. The 1st volume of CSCMP-2019 Proceedings contains the plenary reports and the reports in the following areas: modern energy-saving electrotechnologies; optimal control theory and its applications; modelling and simulation in technical systems.

УДК 519.7
ББК 32.817

ISBN 978-5-473-01247-7 (I том)
ISBN 978-5-473-01246-0

© Институт проблем управления сложными системами
Российской академии наук, составление, оформление, 2019
© Оформление/ ООО «Офорт», 2019
© Все права принадлежат авторам публикуемых работ, 2019

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОНФЕРЕНЦИИ

С.А. Никитов - чл.-корр. РАН, директор Института радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель программного комитета

Д.Е. Быков - д.т.н., Самарский государственный технический университет, Россия

Заместители председателя программного комитета

С.Ю. Боровик - д.т.н., Институт проблем управления сложными системами РАН, Самара, Россия

Ю.Э. Плешивцева - д.т.н., Самарский государственный технический университет, Россия

Международный программный комитет

Э. Бааке - проф., Институт электротехнологий, Университет им. Лейбница, Ганновер, Германия

В. Марик- проф., Институт информатики, роботехники и кибернетики, Прага, Чехия

Й. Мау - проф., Дюссельдорфский университет имени Г. Гейне, Германия

Б. Наке - проф., Институт электротехнологий, Университет им. Лейбница, Ганновер, Германия

Г. Ржевский - проф., Открытый университет, Милтон Кейнс, Великобритания

Национальный программный комитет

С.Е. Банков - д.т.н., Институт радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

Ф.В. Гречников - ак. РАН, Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Россия

Ю.Н. Золотухин - д.т.н., Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

Б.Г. Ильясов - д.т.н., Уфимский государственный технический университет, Россия

А.В. Леонидов - д.т.н., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Т.В. Моисеева - к.э.н., Институт проблем управления сложными системами РАН, Самара, Россия

М.В. Ненашев - д.т.н., Самарский государственный технический университет, Россия

Д.А. Новиков - чл.-корр. РАН, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

А.А. Пименов - д.т.н., Самарский государственный технический университет, Россия

Э.Я. Рапопорт - д.т.н., Самарский государственный технический университет, Россия

Г.Г. Себряков - чл.-корр. РАН, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва, Россия

П.О. Скобелев - д.т.н., Самарский государственный технический университет, Россия

С.В. Смирнов - д.т.н. Институт проблем управления сложными системами РАН, Самара, Россия

Н.Б. Филимонов - д.т.н., Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Со-председатели организационного комитета

С.Ю. Боровик - д.т.н., Институт проблем управления сложными системами РАН, Самара, Россия

А.А. Пименов - д.т.н., Самарский государственный технический университет, Россия

Заместитель председателей организационного комитета

Ю.Э. Плешивцева - д.т.н., Самарский государственный технический университет, Россия

Секретариат организационного комитета

Н.В. Боровик -Институт проблем управления сложными системами РАН, Самара, Россия

М.Ю. Деревянов - к.т.н., Самарский государственный технический университет, Россия

Члены организационного комитета

В.Е. Гвоздев - д.т.н., Уфимский государственный технический университет, Россия

Н.Г. Губанов - к.т.н., Самарский государственный технический университет, Россия

А.Б. Иванов - PhD, Сколковский институт науки и технологий, Россия

С.В. Кузнецов - Институт проблем управления сложными системами РАН, Самара, Россия

О.В. Лавров - д.м.н., "КМ-Альянс", Москва, Россия

Т.В. Моисеева - к.э.н., Институт проблем управления сложными системами РАН, Самара, Россия

В.В. Сазонов - к.ф.-м.н., Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия

П.О. Скобелев - д.т.н., Самарский государственный технический университет, Россия

С.В. Смирнов - д.т.н. Институт проблем управления сложными системами РАН, Самара, Россия

GENERAL CHAIR

S.A. Nikitov - Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences

PROGRAM COMMITEE

Chairman of the Program Committee

D.E. Bykov - Doctor of Technical Sciences, Samara State Technical University, Russia

Vice-Chairmans of the Program Committee

S.Yu. Borovik - Doctor of Technical Sciences, Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

Yu.E. Pleshivtseva - Doctor of Technical Sciences, Samara State Technical University, Russia

International Program Committee

E. Baake - Professor, Institute of Electrotechnology, Leibniz University of Hannover, Germany

V. Mařík - Professor, Czech Institute of Informatics, Robotics and Cybernetics

J. Mau - Professor, Heinrich Heine University Dusseldorf, Germany

B. Nacke - Professor, Institute of Electrotechnology, Leibniz University of Hannover, Germany

G. Rzevski - Professor, Open University, Milt*on Keynes, UK*

National Program Committee

S.E. Bankov - Doctor of Technical Sciences, Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

F.V. Grechnikov - Academician of the Russian Academy of Sciences, Samara Federal Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Russia

N.B. Filimonov - Doctor of Technical Sciences, Lomonosov Moscow State University, Russia

B.G. Ilyasov - Doctor of Technical Sciences, Ufa State Aviation Technical University, Russia

A.V. Leonidov - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, P.N. Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

T.V. Moiseeva - Candidate of Economical Sciences, Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

M.V. Nenashev - Doctor of Technical Sciences, Samara State Technical University, Russia

D.A. Novikov - Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Institute for The Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

A.A. Pimenov - Doctor of Technical Sciences, Samara State Technical University, Russia

E.Ya. Rapoport - Doctor of Technical Sciences, Samara State Technical University, Russia

G.G. Sebryakov - Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, State Research Institute for Aviation Systems, Moscow, Russia

P.O. Skobelev - Doctor of Technical Sciences, Samara State Technical University, Russia

S.V. Smirnov - Doctor of Technical Sciences, Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

Yu.N. Zolotukhin - Doctor of Technical Sciences, Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

ORGANIZING COMMITTEE

Co-Chairmans of the Organizing Committee

S.Yu. Borovik - Doctor of Technical Sciences, Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

A.A. Pimenov - Doctor of Technical Sciences, Samara State Technical University, Russia

Vice-Chairman of the Organizing Committee

Yu.E. Pleshivtseva - Doctor of Technical Sciences, Samara State Technical University, Russia

Secretariate of the Organizing Committee

N.V. Borovik - Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

M.Yu. Derevyanov - Candidate of Technical Sciences, Samara State Technical University, Russia

Organizing Committee Members

V.E. Gvozdev - Doctor of Technical Sciences, Ufa State Aviation Technical University, Russia

N.G. Gubanov - Candidate of Technical Sciences, Samara State Technical University, Russia

A.B. Ivanov - PhD, Skolkovo Institute of Science and Technology, Russia

S.V. Kuznetsov - Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

O. Lavrov - Doctor of Medical Sciences, Knowledge Management Group, Moscow, Russia

T.V. Moiseeva - Candidate of Economical Sciences, Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

V.V. Sazonov - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Lomonosov Moscow State University, Russia

P.O. Skobelev - Doctor of Technical Sciences, Samara State Technical University, Russia

S.V. Smirnov - Doctor of Technical Sciences, Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

Содержание
Table of contents

Пленарные доклады
Plenary papers

1. *E. Baake, S. Spitans, A. Jakovic*
Analysis and design of induction liquid metal processes using advanced numerical modelling 3
2. *B. Nacke, A. Nikanorov, M. Baldan*
Innovative methods for optimal design of complex induction heating processes 14
3. *V. Rudnev*
Evolution of Induction Heating and Heat Treating as a Subject of Mathematical Modeling, Optimization and Design 24
4. *Э.Я. Рапопорт, Ю.Э. Плешивцева*
Проблемы и конструктивные методы прикладной теории управления техническими системами с распределенными параметрами 29

Современные энергосберегающие электротехнологии
Modern energy-saving electrotechnologies

1. *E. Baake, A. Nikanorov, W. Ebel*
Numerical modeling of double high-frequency longitudinal welding of cladded pipes 39
2. *M. Baldan, M. Cetin, A. Nikanorov, B. Nacke*
Optimal design of magnetic flux concentrators in induction heating 43
3. *M. Birjukovs, A. Jegorovs, A. Jakovics, A. Klokovs, I. Felcis*
Design optimization automation for luminaire reflectors using COMSOL Multiphysics and performance comparison against Zemax OpticStudio 48
4. *A.K. Dey*
PV Energy Sharing 54
5. *B. Nacke, A. Dietrich*
Optimal design of induction heating process for hot metal forming of steel blanks 59
6. *А.И. Данилушкин*
Синтез замкнутой оптимальной системы в режиме «особого» управления индукционным нагревателем непрерывного действия 66
7. *А.И. Данилушкин, А.П. Мостовой, М.А. Максимова*
Алгоритмы оптимального функционирования двухсекционного индукционного нагревателя в переходных режимах 70
8. *А.И. Дьяконов, А.В. Капустина*
Построение и моделирование системы агрегированного регулирования температурных режимов индукционного нагрева 74
9. *Л.С. Зимин, А.С. Леоненко, А.Г. Сорокин*
Энергоэффективность электротехнологических комплексов при переработке полимеров 78
10. *Н.Н. Клочкова, А.В. Обухова, А.Н. Проценко*
Моделирование движения в задачах индукционного нагрева 82
11. *А.Б. Кувалдин, М.А. Федин*
Выбор способа управления процессом плавки металла в индукционных тигельных печах различных типов 86
12. *А.В. Попов*
Оптимизация стадии нагрева в процессе индукционной закалки цилиндрических заготовок 92
13. *А.Н. Проценко, А.В. Танаев, И.С. Макарова*
Индукционный нагрев при закалке шаров подшипников 98

14. *Г.Н. Рогачев, Н.Г. Рогачев*
Моделирование и нечеткая оптимизация процесса индукционного нагрева тонкостенных оболочек 101

15. *И.А. Смольянов, Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов*
Управление индукционным нагревом для титановых сплавов 106

16. *Е. Швыдкий, Э. Бааке*
Трехмерная численная модель двухстороннего электромагнитного перемешивателя бегущего магнитного поля 111

Теория оптимального управления и ее приложения
Optimal control theory and its applications

1. *В.Р. Барсегян*
Об одной задаче оптимального управления колебаниями струны с неразделенными условиями на значения функции прогиба в заданных промежуточных моментах времени 117

2. *И.В. Бойков, П.В. Айкашев*
О применении сингулярных интегральных уравнений к исследованию задач автоматического управления 121

3. *М.Е. Воронухин, В.А. Засов*
Исследование эффективности параллельных алгоритмов стохастической оптимизации 127

4. *А.Н. Дилигенская*
Методы последовательной параметрической оптимизации в обратных задачах технологической теплофизики 132

5. *Н.А. Ильина*
Параметрическая оптимизация процессов нестационарной теплопроводности с двумя управляющими воздействиями 136

6. *В.Н. Козлов*
Проекционный метод оптимизации динамики управления в конечномерных и функциональных пространствах 142

7. *Е.И. Мерзликина, В.Ф. Кузищин*
Сравнительная оценка эффективности различных вариантов отработки задающего воздействия в системах управления 146

8. *А.П. Михайлов*
Структуризация данных по прогрессивности при принятии многокритериальных решений 151

9. *С.А. Пиявский*
Метод универсальных коэффициентов в принятии многокритериальных решений 155

Моделирование и управление в технических системах
Modelling and simulation in technical systems

1. *А.М. Абакумов, Д.Г. Рандин, О.А. Абакумов*
Исследование комбинированной системы виброзащиты механических объектов 161

2. *С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин, Д.Д. Сирота*
Построение компьютерной модели неустановившейся фильтрации газа для двумерного случая методом конечных объемов 165

3. *А.Д. Абрамов*
Применение квазиоптимального корреляционного алгоритма для моделирования текстуры микрорельефа в оптико-электронных измерительных системах 169

4. *А.Д. Абрамов, Н.В. Носов, Е.А. Якубович*
Моделирование параметров текстуры прецизионных поверхностей с помощью корреляционного алгоритма 173

5. *Е.Н. Абрамова, С.В. Резник*
Температурное состояние аэродинамического тормозного устройства малых космических аппаратов 177

6. *А.С. Алешкин, С.А. Лесько*
Прогнозирование роста числа пользователей, устройств и эпидемий компьютерных вирусов в сети интернет на основе анализа статистических данных с выявлением почти-периодических функций роста 181

7. *А.И. Алиферов, А.С. Аньшаков, В.С. Чередниченко, В.А. Вдовин*
Экологичные плоские нагревательные системы для обогрева помещений 187

8. *А.А. Афиногентов, Ю.А. Багдасарова, И.А. Фан*
Многофакторный анализ эффективности расстановки конструктивных элементов в задаче оптимального проектирования магистрального нефтепровода 191

9. *П.С. Барабанова, В.А. Засов*
Моделирование и исследование алгоритма обнаружения состояний гонки в многопоточных вычислительных системах 195

10. *В.И. Батищев, А.Г. Золин, В.Н. Якимов*
Исследование аппроксимационных свойств двумерных стохастических базисов в задачах восстановления изображений 199

11. *О.В. Батурин, А.В. Кривцов, Д.А. Колмакова, А.А. Мязитов*
Моделирование, анализ и улучшение работы входного очистительного устройства газотурбинной установки для перекачивания газа 205

12. *А.С. Бондарь, О.В. Стрельцова, Ф.В. Чмиленко, Д.Н. Бондаренко*
Предсказание удельного сопротивления стали для моделирования электротермических процессов 211

13. *Т.И. Булдакова*
Подходы к разработке моделей сложных систем 216

14. *Т.И. Булдакова, Д.А. Кривошеева, С.И. Суятинов*
Иерархическая модель представления сетевого взаимодействия в телемедицинской системе 221

15. *М.Д. Веселова, К.А. Забродина, В.С. Сафронова, У.Н. Пучкова, Д.В. Пащенко, М.П. Синев, Д.А. Трокоз, А.И. Мартышкин*
Формализованное описание шифрования сообщений в мессенджерах с использованием теории автоматов 226

16. *П.С. Воеводин, Ю.М. Заболотнов*
Моделирование процесса торможения наноспутника с помощью электродинамической тросовой системы 232

17. *В.Г. Волков, Д.Н. Демьянов*
Оптимальное оценивание линейного функционала переменных состояния динамической системы 238

18. *Р.Р. Галимов, В.Е. Гвоздев, М.Б. Гузаиров, А.С. Давлиева*
Управление функционированием аппаратно-программных комплексов на основе прогнозирования количества обращений пользователей 242

19. *С.Я. Галицков, К.С. Галицков, О.В. Самохвалов*
Компьютерное моделирование динамики энергозатрат при обжиге керамзита 246

20. *Н.Г. Губанов, Д.А. Мельникова, Ю.В.Гашенко*
Формальный аппарат многоуровневого представления знаний в системах мониторинга состояния протяженных объектов 252

21. *К.В. Губарева, А.И. Попов, Н.П. Краснова, К.В. Трубицын, В.К. Ткачев*
Об одном методе решения нестационарных задач теплопроводности с постоянными во времени внутренними источниками теплоты 257

22. *И.А. Данилушкин*
Численно-аналитическая модель теплообмена для потока с переменной скоростью 262

23. *Н.И. Дедов, В.Н. Исуткина*
Математическое моделирование деформирования нелинейных пластин и пологих оболочек 266

24. *В.Б. Демидович, Ю.Ю. Перевалов, Г.И. Прокофьев*
Цифровые системы управления температурой в непрерывных линиях термообработки 270

25. *М.Ю. Деревянов, Ю.Э. Плешивцева, А.А. Афиногентов, А.Г. Мандра, А.А. Пименов*
Моделирование и многокритериальная оценка ресурсного потенциала системы переработки отходов нефтегазовой промышленности 276

26. *А.В. Еремин, В.К. Ткачев, Р.М. Клеблеев*
Об одном методе решения задач теплообмена при течении жидкости в цилиндрическом канале 282

27. *Н.В. Ефимушкина, С.П. Орлов, Н.Н. Хрисанов*
Имитационная модель взаимодействия блоков компьютера и периферийного оборудования 288

28. *Д.В. Зеленцов, З.Ф. Камальдинова, К.Л. Чертес*
Система автоматизированного управления обращением с отходами
с использованием газоконтактных технологий 292

29. *А.И. Ивлева, С.В. Смирнов*
Сравнение моделей положительно определенных случайных величин с помощью диаграмм рассеяния 296

30. *Б.Г. Ильясов, Г.А. Саитова*
Анализ устойчивости многосвязной системы управления при структурных изменениях 300

31. *С.И. Колесникова*
Новый метод конструирования стохастического робастного регулятора на принципах многообразий 304

32. *О.И. Кондратьев, А.А. Жежеря, М.А. Паис*
Система управления обезвреживанием органо-минеральных отходов с использованием
биоингибиторов и источников биогенеза 309

33. *В.В. Коновалов, Д.А. Тарасов, В.Ю. Зайцев, Ю.В. Родионов*
Математическое моделирование напряженно- деформированного состояния гибкой нити
при действии поперечного удара 313

34. *В.И. Котенев, А.В. Котенев, С.А. Зангиев*
Многосвязная автоматическая система с непрерывно-релейным управлением
коэффициентом реактивной мощности узла нагрузки 318

35. *В.И. Котенев, А.В. Котенев, С.А. Зангиев*
Система автоматического регулирования реактивной мощности в узле нагрузки с управлением
в функции параметров режима системы электроснабжения 324

36. *И.А. Кривошеев, К.Е. Рожков, Н.Б. Симонов*
Контроль расходования ресурса ГТД с учетом циклограмм фактического нагружения
на основе диаграммы Ларсена — Миллера 330

37. *И.В. Кудинов, Е.В. Стефанюк, Т.Е. Гаврилова, Г.Н. Максименко, Г.В. Михеева*
Колебания пластины при тепловом ударе на её внешних поверхностях 334

38. *Г.В. Кузнецов, С.А. Янковский, С.В. Сыродой*
Математическое моделирование процессов секвестирования антропогенных продуктов сгорания углей
на тепловых электростанциях 338

39. *С.А. Лесько, А.С. Алешкин, Д.О. Ермак*
Модель стохастической динамики распространения в компьютерных сетях эволюционирующих вирусов
при условии устаревания и запаздывания действия защиты 343

40. *М.Ю. Лившиц, Б.Б. Бородулин, А.В. Ненашев, Ю.О. Савельева*
Распределенное управление температурными режимами конструкционных элементов
автономных объектов 349

41. *В.В. Любимов, Е.В. Куркина*
Дискретный оптимальный закон управления вращением зонда с малой инерционной асимметрией
при спуске в атмосфере Марса 353

42. *Г.М. Мартинов, А.В. Коваленко*
Система управления аддитивным технологическим оборудованием для интеграции
в гибкую производственную систему 358

43. *Л.И. Мартинова, С.В. Соколов, М.С. Бабин*
Организация мониторинга технологического оборудования 364

44. *Е.Ю. Марчуков, И.Н. Егоров, Е.С. Горячкин, В.М. Зубанов, А.А. Волков*
Численное моделирование рабочего процесса осевой турбины
с целью повышения эффективности ее работы 370

45. *Е.Ю. Марчуков, И.Н. Егоров, Г.М. Попов, О.В. Батурин*
Разработка концепции и апробация многоуровневой модели рабочего процесса центробежного компрессора
для быстрого получения его достоверных характеристик в задачах оптимизации 376

46. *В.Н. Матвеев, А.А. Волков, В.М. Зубанов, Ю.Д. Новикова, Д.Н. Дмитриев*
Наилучшие настройки численных моделей осевых газовых турбин
для получения достоверных результатов и оптимизации 382

47. *В.В. Меньших, Г.И. Зверев*
Моделирование оценки живучести эргатических систем на основе использования взвешенных гиперграфов 388

48. *Л.П. Мышляев, К.Г. Венгер, В.В. Грачев, А.В. Циряпкина*
Управление объектами с положительной обратной связью 392

49. *В.И. Немченко, М.В. Посашков*
Системный анализ эффективности автоматического регулирования тепловой нагрузки жилых зданий в системах центрального теплоснабжения 396

50. *А.В. Ненарокомов, Е.В. Чебаков, И.В. Крайнова, Д.Л. Ревизников, С.А. Будник*
Определение углового положения космического аппарата, основанное на решении обратных задач теплообмена 400

51. *А.С. Нечаев, Ю.В. Мощенский*
Моделирование теплового потока в измерительной ячейке дифференциального сканирующего калориметра как объекта управления с распределенными параметрами 405

52. *И.Н. Нечаева, А.С. Нечаев*
Способ оценки чувствительности пылевоздушной смеси к тепловому воздействию, вызванному электрическим разрядом 410

53. *Д.Н. Нурбосынов, Т.В. Табачникова, Л.В. Швецкова, Э.Д. Нурбосынов*
Имитационная модель электротехнического комплекса добывающей скважины с винтовой насосной установкой 415

54. *Д.И. Пащенко, М.И. Гнутикова*
Сравнительный анализ использования LES и RANS подхода при численном 3D-моделировании горения метана 419

55. *Г.М. Попов, Е.С. Горячкин, Ю.Д. Новикова, А.И. Корнеева*
Оценка влияния срывных явлений на характеристики вентилятора с помощью NLH метода 423

56. *П.В. Просунцов, Е.А. Богачев, Е.Б. Елаков*
Моделирование термостабилизирующего отжига органоморфных преформ из окисленного полиакрилонитрила 429

57. *В.Н. Пыстин, Д.Н. Шерстобитов, А.А. Миннигуллова*
Управление процессами обработки гетерогенных отходов 433

58. *Ю.М. Рассадин*
Обеспечение инвариантности к ограниченным возмущениям в задаче управления перевернутым маятником 439

59. *С.В. Резник, П.В. Просунцов, Д.Н. Бондалетов, О.В. Денисов, Л.В. Денисова, Н.М. Петров*
Отработка методики исследования теплопроводности анизотропных композитов 443

60. *С.А. Решмин, Т.В. Глазков*
Нелинейная модель с переменной структурой для моделирования плоских колебаний ведущих колес транспортного средства 447

61. *А.С. Римша, К.С. Римша*
Разработка средства моделирования угроз и оценки рисков автоматизированных систем газодобывающих предприятий 453

62. *В.Р. Роганов, О.А. Кувшинова, Н. Есимова, Ю. Лавендел*
3D системы, иммитирующие визуально наблюдаемые объекты для тренировки глазомера человека 458

63. *В.С. Романов, В.Г. Гольдштейн, Н.С. Васильева*
Использование статистических моделей для совершенствования управления производственными циклами погружного электрооборудования нефтедобычи 462

64. *Р.Т. Сайфуллин, А.В. Бочкарев*
Иерархическое кодирование при обработке сигналов аналитических приборов 467

65. *О.А. Самарина, О.И. Кондратьев, А.Н. Сухоносова*
Система ликвидации шламонакопителей с использованием группы очистных сооружений крупного промышленного узла 471

66. *Л.Н. Смирнова*
Математическое моделирование процесса нагрева системы приводов искусственных космических объектов 475

67. *С.В. Солодуша, В.А. Спиряев, Э.А. Таиров*
Численное моделирование динамики участка энергоблока Назаровской ГРЭС полиномами Вольтерра 479

68. *А.М. Сорокина, С.Н. Медведев, О.А. Медведева*
Задача нахождения маршрутов для совокупности агентов среди объектов двух типов 483

69. *А.В. Стариков, В.Н. Овсянников, И.П. Колесников*
Комбинированное управление аппаратом воздушного охлаждения масла 490

70. *В.Н. Сызранцев, К.В. Сызранцева*
Совершенствование методик расчета надежности магистральных трубопроводов ... 496

71. *Н.В. Тарчуткин, И.А. Смольянов, Е.И. Шмаков*
Моделирование тепловых режимов линейной индукционной машины в Matlab ... 501

72. *А.В. Уткин, Ю.Г. Кокунько, Д.В. Краснов*
Блочный синтез системы слежения для беспилотного летательного аппарата при действии неконтролируемых возмущений ... 505

73. *А.В. Уткин, В.А. Уткин*
Синтез систем управления при односторонних ограничениях на управления ... 509

74. *Лу Хонши, Ли Айцзюнь, Ю.М. Заболотнов*
Перевод электродинамической космической тросовой системы во вращение с помощью скользящего режима управления ... 515

75. *В.П. Хранилов, В.В. Андреев, П.В. Мисевич, Е.Н. Панкратова*
Идентификация динамических моделей управления в пространстве состояний для инженерных приложений ... 522

76. *Л.Р. Черняховская, М.М. Низамутдинов*
Разработка базы знаний для интеллектуальной поддержки принятия решений в процессе управления инновационным проектом ... 528

77. *К.Л. Чертес, В.Н. Пыстин, Е.Н. Петренко*
Трехмерное цифровое моделирование в технологиях санации загрязненной углеводородами геосреды, как базис управления техногенными системами ... 532

78. *Б.К. Чостковский, В.Н. Митрошин, В.Ю. Денисов*
Многокритериальная оптимизация управления совмещенными технологическими процессами кабельных производств ... 536

Plenary Papers
Пленарные доклады

Analysis and design of induction liquid metal processes using advanced numerical modelling

Baake E.
Institute of Electrotechnology
Leibniz University Hannover
Hannover, Germany
baake@etp.uni-hannover.de

Spitans S.
ALD Vacuum Technologies GmbH
Hanau, Germany
dr.sergejs.spitans@ald-vt.de

Jakovics A.
Lab. for Math. Modell. of Environm. and Technological Processes
University of Latvia
Riga, Latvia
andris.jakovics@lu.lv

***Abstract*—Comprehensive knowledge of the turbulent flows, heat and mass transfer processes in the melt of induction applications is required to realize efficient metallurgical processes. Therefore, the process oriented development, design and optimization of induction furnaces for melting and casting of metals requires praxis oriented simulation and analysis of the complex in-stationary turbulent melt flows and temperature distributions as well as the heat and mass transfer processes in the liquid metal. The studies, presented in this paper, demonstrate the possibilities of using advanced three-dimensional transient numerical modelling for successful simulation of the melt flow as well as heat and mass transfer processes in metallurgical applications. Along selected examples like classical induction crucible furnace and the cold crucible induction furnace for melting and casting of TiAl alloys as well as the innovative electromagnetic levitation melting where the free surface dynamics has to be taken into account the successful development and application of experimentally verified numerical simulation techniques will be demonstrated.**

Keywords—liquid metal, induction melting, numerical modelling, metallurgical processes, magneto-hydrodynamics

I. Introduction

Industrial metallurgical liquid metal processes like melting and casting of alloys using induction furnaces has become a subject of numerical modelling since many years. A wide range of different two-dimensional(2D) and three-dimensional(3D) steady-state and transient modelling approaches for the simulation of the turbulent melt flow and the heat and mass transfer processes taken into account the transportation of particles in the melt and the steady-state or dynamic development of the free melt surface have been developed.

Melting of alloys in induction crucible furnaces can be mentioned as a wide spread example of numerical modelling, because this process can be approximated with 2D axial-symmetric model. The flow pattern in these installations is formed by the influence of electromagnetic forces and usually comprises of two or more toroidal dominating recirculating vortices. Flow patterns obtained with two-dimensional solvers based on Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations usually are in good agreement with estimated and measured time-averaged flow velocity values. The resulting spatial distribution of the temperature and alloys compound concentration depends strongly on the heat and mass exchange between vortices of mean flow. Numerical investigations have shown that 2D turbulence models, e.g. k-ε and others, fail to describe correctly the heat and mass transfer processes between the main vortices [1], [2].

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

Due to the permanent growth of accessible high powerful computational resources, nowadays, it is possible to run more complicated transient and 3D numerical calculations of fluid dynamic problems using advanced turbulent models with higher time and volume resolution requirements and to get reliable results in reasonable time. Concluding all these preconditions the calculations presented in this paper are devoted to the application of Large Eddy Simulation (LES) method for turbulent recirculating flows. The flows of this character often occur in various industrial processes where liquid metal is driven by electromagnetic forces.

II. Free surface dynamics

The behavior of free surface might be complicated by the reciprocal interaction between free surface shape, EM field and flow pattern, as well as notably unsteady due to the switch between the furnace power regimes, instability of the mean flow and turbulence. Since the problem of free surface shape control appears to be significant for processing of metallic materials, the application of 3D transient models for free surface dynamics calculation is necessary. 3D consideration, as well as larger energy scale of EM field signify the non-linear effects of free surface dynamics and make impossible the application of simplified analytical estimations for free surface dynamics description. In case of high EM field frequencies and small penetration depths the reciprocal interaction between free surface shape and EM field distribution becomes more prominent. This increases the demand on numerical models that are capable of providing precise solutions for wider parameter scales.

In the first and simplest models for calculation of steady state free surface shape of melt in EM induction furnaces it was considered that the HD motion has insignificant effect on the free surface shape and the problem was formulated in hydrostatic approximation. The Lorentz force was split into potential and whirling parts where the first one corresponds for EM pressure at the surface and the second one contributes to re-circulative movement of alloy and is not taken into consideration. On account of hydrostatic, surface tension and EM pressure balance the steady state free surface of constant pressure was calculated. Reciprocal interaction between free surface shape and EM field distribution specified the necessity of iterative approach for free surface shape determination. Comparison between the model calculation and appropriate experimental data had good agreement in case of small flow velocities [3], [4]. Advanced multi-physical processes like energy and mass transfer, crystallization [5], [6] and homogenization of dopant particles [7] are widely modelled in 3D with the fixed hydrostatic steady state free surface shape.

A more precise 2D model of steady state free surface shape considering HD movement of melt was implemented in the work [8]. The problem was split into EM and HD parts that were solved consequently using *ANSYS Classic* and *ANSYS CFX* accordingly. Volume of Fluid (VOF) numerical technique and k-ε turbulence model were applied for high Reynolds number two phase flow simulation. The calculation process was iterative. The Lorentz force distribution in melt was calculated for initial free surface shape and used as mechanical momentum source in steady state flow and free surface shape calculation. In the end of HD VOF calculation the new free surface state was used for Lorentz force recalculation. The agreement between experiment and model calculation was not satisfactory. Later it was determined that discrepancies were caused mainly by the use of overestimated crucible conductivity that exaggerated the EM shielding effect of the crucible.

In our work particular concept for numerical calculation of EM induced flow with free surface by means of external coupling of *ANSYS* components was adopted and developed further. In the work [9] a self-written 2D hydrodynamic model with k-ε turbulence description for calculation of free surface dynamics of melt in induction furnaces was developed. The VOF algorithm was modified in order to ensure better conservation of incompressible fluid and to avoid numerical generation of unphysical holes. The comparison between calculation results for steady state free surface shapes and flow patterns in ICF at small EM field penetration depth, traveling magnetic field (TMF) and great EM field penetration depth, as well as in single- and two-frequency EM levitation melting devices revealed good agreement with experimental measurements [9].

Applying the modification of k-ω turbulence model the free surface dynamics of EM levitated melt with mass and energy transfer in 2D consideration [10], as well as crystallization processes considering free surface in EM induction furnaces [11] – [13] were successfully described by the self-written spectral-method based *SPHINX* software.

The results of *SPHINX* 3D numerical calculation of liquid droplet dynamics in a high DC magnetic field were published recently [14].

Our approach was developed for the 3D calculation of multiphysical processes in EM induction equipment with consideration of free surface dynamics and application of LES description for turbulent flow. The previous investigations [8], revealed that in case of ICF with two characteristic mean flow vortexes only the LES model gives comparable results to experimental measurements.

The free surface oscillation period in axisymmetric ICF is estimated analytically [15]. In this simplified case where the Lorentz force is considered radial and constant (small amplitude approximation) the typical oscillation period T appears to be fully dependent on crucible geometry (1)

$$T_{teor} = 2\pi\sqrt{\frac{r_0}{\lambda_1 \cdot g}} \cdot \tan\left(\frac{\lambda_1 \cdot h_0}{r_0}\right), \qquad (1)$$

where r_0 is crucible inner radius, h_0 is initial filling and $\lambda_1 =$ 3.83 - Bessel function J_1 solution. The results of formula (1) validation by comparison to experimental data revealed good agreement for the case of small amplitude oscillations [15].

Let us consider electrically conductive melt in a harmonic EM field and introduce the depth of EM field penetration (2)

$$\delta_{EM} = \left(\mu_0 \sigma \pi f\right)^{-1/2}, \qquad (2)$$

where μ_0 is magnetic constant, σ is electric conductivity and f is the frequency of harmonic EM field.

On the one hand, the field generates harmonic eddy currents in EM skin layer δ_{EM} that partially dissipate in thermal energy and heat the melt. On the other hand, external and eddy current generated EM field interacts with eddy currents and Lorentz forces are induced in the skin layer of the melt. Let us leave aside the thermal energy generation and heat transfer processes, as well as material property dependence on temperature, and focus mainly on the EM field, free surface shape and HD flow reciprocal interaction (Fig. 1).

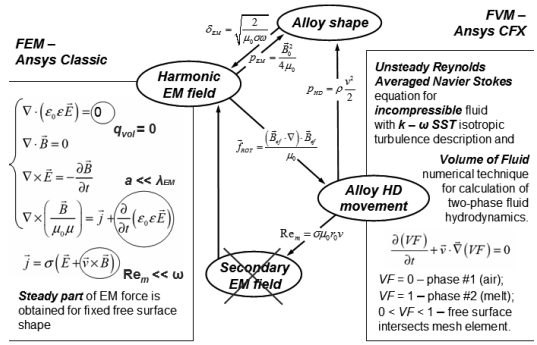


Fig. 1. Structure of the numerical simulation model

Due to harmonic nature both of EM field and induced eddy currents, the Lorentz force f_{EM} can be decomposed into a steady and harmonic part that oscillates with double frequency of EM field (3)

$$\vec{f}_{EM} = \left\langle \vec{f}_{EM} \right\rangle + \tilde{\vec{f}}_{EM} \cdot \cos\left(2\omega t + \varphi\right), \qquad (3)$$

where ω is an angular frequency of harmonic EM field and φ is a phase.

Because of much greater inertia times of melt in comparison to the alternate EM field timescale ($f > 50$ Hz), only the steady part of the Lorentz force is considered. Moreover, the steady part can be decomposed into a potential and whirling part (4):

$$\vec{f}_{EM} = -\nabla\left(\frac{\vec{B}_{ef}^2}{2\mu_0}\right) + \frac{1}{\mu_0}\left(\left(\vec{B}_{ef} \cdot \nabla\right) \cdot \vec{B}_{ef}\right). \qquad (4)$$

The potential part of Lorentz force can be expressed in terms of EM pressure that squeezes the melt. In the same time, on account of the skin-effect, the shape of conductive fluid reciprocally influences the distribution of EM field. Meanwhile, the whirling part of Lorentz force corresponds

for re-circulative flow of melt that on account of HD pressure perturbates the free surface shape and generates the magnetic field itself. Let us consider the non-dimensional frequency (5)

$$\hat{\omega} = 2\pi f \sigma \mu_0 r_0^2 \tag{5}$$

that shows the relation between the induced and external EM field, and magnetic Reynolds number (6)

$$Re_m = \sigma \mu_0 r_0 v_0 \tag{6}$$

that gives the relation between EM field that is generated by the flow and external EM field.

Combining equations (5) and (6) it can be shown that in typical case of induction furnace

$$\frac{\hat{\omega}}{Re_m} = f \cdot \frac{2\pi r_0}{v_0} \gg 1,\ f > 50\,\text{Hz},\ r_0 \approx 1\,\text{m},\ v_0 \approx 1\,\text{m/s}. \tag{7}$$

and EM field generated on account of the flow is insignificant in comparison to induced EM field.

Assuming no free charge in the system and neglecting displacement currents (no EM wave radiation) the reduced Maxwell equation system in addition with reduced Ohms law (Fig. 1) and appropriate boundary conditions is solved with finite elements in *ANSYS Classic* and the Lorentz force distribution in melt at particular free surface shape is obtained.

In the HD part of calculation, the unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes equation for incompressible fluid is solved with finite volume method in *ANSYS CFX*.

In typical cases of ICF the Reynolds number (8)

$$Re = \frac{r_0 v \rho}{\eta} > 10^3, \tag{8}$$

indicates on fully developed turbulent flow, thus the k-ω SST turbulence model [21] is used additionally.

Volume of Fluid (VOF) numerical technique is applied for calculation of two-phase flow [16]. In VOF technique the phase distribution is represented with scalar volume fraction field $F(x_i, y_i, z_i, t)$. In particular case, $F = 0$ when mesh element is containing only one phase (air) and $F = 1$ when element contains the other phase (melt). Accordingly, when phase surface crosses element - $0 < F < 1$. For phase dynamics the transport equation is solved (9)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla F = 0, \tag{9}$$

and free surface is reconstructed as isosurface of $F = 0.5$.

Volume density of surface tension force is calculated as (10)

$$\vec{f}_\gamma = -\gamma \left(\nabla \cdot \vec{n} \right) \vec{n} \delta_\gamma, \tag{10}$$

where γ is surface tension coefficient, $\vec{n}$ is free surface normal and δ_γ is Delta function that ensures that surface tension force is located at free surface.

A. External Coupling of EM and HD Problems

Numerical calculation of free surface dynamics of EM induced turbulent flow is arranged by means of *ANSYS Classic* for EM calculation, *ANSYS CFX* for two-phase turbulent flow calculation and the self-written external coupler. Initial free surface shape of molten metal, as well as every transient shape obtained with two-phase HD calculation is written into a file. This file contains free surface keypoint numbers n_i (automatically enumerated by *ANSYS CFX*), keypoint coordinates (x_i, y_i, z_i), and series of keypoint number sequences that indicate the order of free surface keypoint connection with lines for definition of elementary polygons.

Transferring free surface keypoints and elementary polygons from *CFX* to *ANSYS Classic* a self-written filtering procedure is performed in order to avoid generation of degenerate surface polygons that have great edge length ratios and cause problems in *ANSYS Classic* volume mesher.

Finally, filtered free surface consisting of elementary triangular non-degenerate areas is obtained and the finite element mesh for EM problem is constructed.

In the next step the distribution of harmonic EM field is calculated for the fixed free surface shape of molten metal. The coordinates of alloy mesh element centroids (x_i, y_i, z_i), as well as the values of Lorentz force density components (f_{xi}, f_{yi}, f_{zi}) in alloy mesh centroids are retrieved and written into a file.

In the beginning of the transient HD calculation the Lorentz force density is interpolated on the *CFX* finite volume mesh and used as a mechanical momentum source in two-phase turbulent flow equations. Then the calculation of unsteady flow is performed for sufficiently small time interval for which the slight change of free surface shape is considered to be not influencing the Lorentz force distribution.

By the end of HD calculation, a new transient free surface state is obtained and written into a file. The recalculation of Lorentz force distribution upon the new free surface shape is performed further and the repeat of whole calculation loop ensures free surface dynamics computation.

B. Free Surface Filtering from Degenerate Polygons

The origin of such degenerate free surface polygons is caused by consideration of free surface as isosurface of scalar volume fraction field.

The two-phase HD VOF calculation in *CFX* is performed on the free surface independent Euler mesh containing prisms. The mesh is fine enough and in range of one mesh element the free surface is almost flat. As the result of hexahedron intersection with a plane, elementary polygons consisting of 3 to 6 edges can be obtained. For instance, cutting hexahedron with plane at a small angle along the edge derives such free surface degenerate polygon.

Introduced self-written filtering procedures are aimed mainly on close free surface keypoint merging, polygon reconstruction upon reduced set of keypoints and further polygon decomposition to maximally equilateral triangles.

III. Induction Furnace with Cold Crucible

The induction furnace with cold crucible (IFCC) consists of a segmented water cooled cupper crucible surrounded by an induction coil and is used for melting and casting of special alloys, like Titanium-Aluminum (TiAl) alloys. During the melting process the electromagnetic forces lead to a very pronounced shape of the free surface of the melt in order to prevent a full contact between the melt and the cold crucible (see Fig. 2). For the verification of simulation model experimental measurements of aluminum melt (ρ_{Al} = 2375 kg/m^3, σ_{Al} = 3.6·10^6 S/m, μ_{Al} = 1.29 mPa·s) free surface shape in laboratory scale IFCC were used [5].

The furnace model consisted of copper crucible wall divided on 26 sections with a short circuit ring in the lower part, unsectioned copper bottom and copper inductor with five turns (Fig. 2). The crucible wall was made of copper plates of 3 mm width in radial direction and with average azimuthal gap of 0.3 mm and water cooled copper rectangular blocks of 12 mm width in radial direction.

On account of the symmetry of the setup the EM calculation was performed only for one section considering azimuthal inhomogeneity of EM field due to the sectioned crucible (Fig. 3). Air gap of 1 mm was ensured between the melt, the bottom and the crucible walls due to the great electrical resistivity of the skull that appears in the regions of contact between the melt and water-cooled crucible. Furnace operational frequency of f = 9865 Hz ensured highly pronounced skin-effect with characteristic EM penetration depths of δ_{Cu} = 0.7 mm and δ_{Al} = 2.7 mm for copper and liquid aluminum accordingly.

Meanwhile, the hydrodynamic calculation was performed on a mesh with one element resolution of section in azimuthal direction that ensured azimuthal averaging of Lorentz force for the 2D approximation (Fig. 4).

The comparison between the measured and calculated free surface shapes of aluminum melt in IFCC at different initial fillings and inductor effective currents (Fig. 5) revealed a fine correlation between the model prediction and experiment both for meniscus total height above the bottom and meniscus shape. Measured and calculated free surface profiles in respect to the initial filling, crucible and inductor, as well as Lorentz force distribution in the EM penetration depth of 2.7 mm at free surface (on the left) and velocity patterns (on the right) sketch the overview of performed comparison.

Discrepancies in free surface shapes might have appeared for the several reasons. First of all, the quasi steady state free surface shape in IFCC is not axially symmetric due to the greater EM pressure near the crucible gaps. Then the observation of the crucible setup during geometry measurements revealed that it was deformed, some sections were slightly bended influencing the width of the gap. And in experiment the free surface shape was measured with laser technique, obtaining data from particular plane and it is not known whether meniscus was azimuthally averaged, as well the error of measurement is unknown.

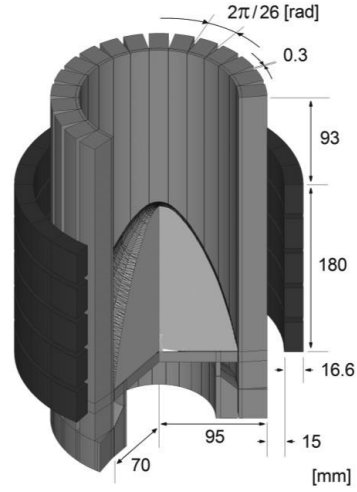


Fig. 2. Geometry of laboratory scale IFCC model with sectioned crucible

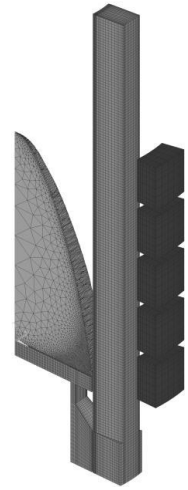


Fig. 3. Mesh for EM calculation of one section

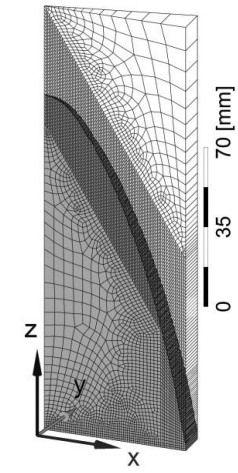
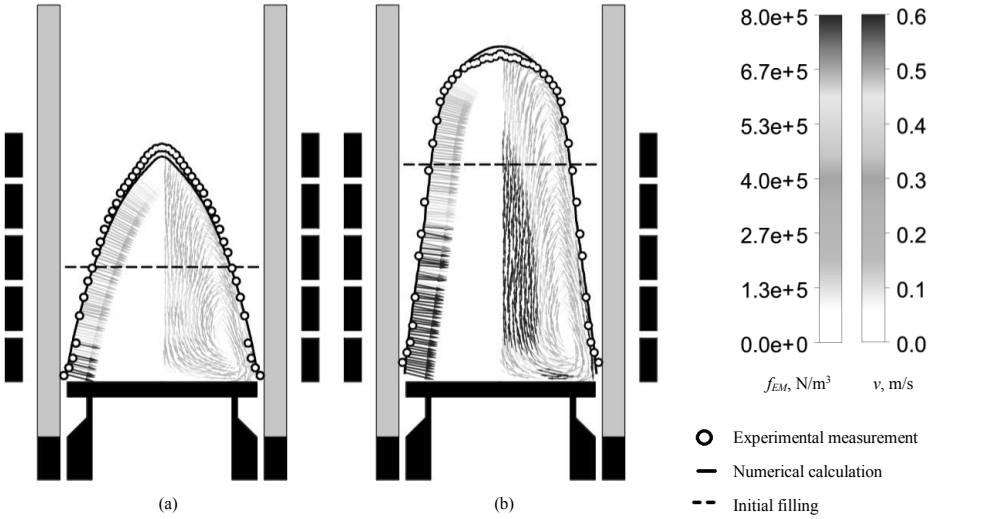


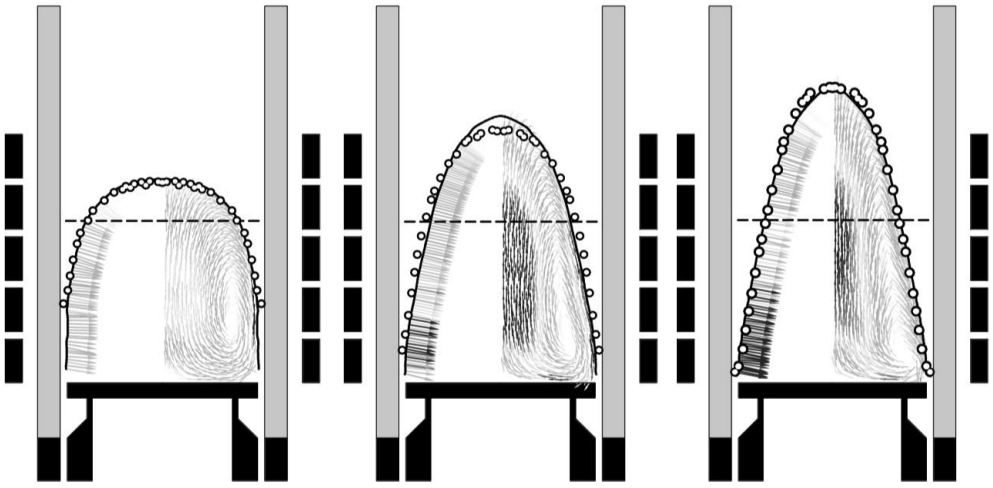
Fig. 4. Mesh for HD calculation of one section with near wall and free surface refinement

Meanwhile, the results of free surface shapes appeared to be very sensitive for the geometry modifications, especially, the gap consideration. Moreover, it was not taken into account that the crucible bottom was also sliced due to its presumable slight effect on meniscus shape.

During the calculation process it was noted that the meniscus was slightly oscillating, however it is hard to say whether these oscillations have physical background or they are caused by the long period T = 0.1 s of Lorentz force recalculation. Still, the presented results were averaged for the last second of calculated quasi steady state flow.

Eventually the developed model verification has been successfully completed for the case of induction furnace with cold crucible with several highly pronounced meniscus and evidently approved its accuracy.





(a) - IF = 46%, I_{ef} = 3154 A; (b) - IF = 87%, I_{ef} = 3789 A;
(c) - IF = 65%, I_{ef} = 1929 A; (d) - IF = 65%, I_{ef} = 2956 A; (e) - IF = 65%, I_{ef} = 3566 A.

Fig. 5. Free surface shapes and flow patterns for different initial fillings IF in respect to inductor height and inductor effective currents I_{ef}

IV. Electromagnetic Levitation Melting

Induction melting of metals under complete levitation conditions has two main advantages over conventional ceramic or cold crucible induction furnaces. EM levitation in a non-reactive atmosphere prevents contamination of the melt with the crucible material and results in a significantly enhanced purity of alloy. Moreover, heat losses from the liquid metal are limited only to radiation and evaporation that permits reaching much higher superheat temperatures.

The levitation melting was invented in the 1920's [17], whereas the application started only thirty years later [18] as the first high-frequency generators became available.

The method is well known for measurements of thermos-physical properties, such as viscosity, surface tension and heat conductivity of molten metals in experiments with small levitated droplets of 1-10 mm in diameter [19]. However, the levitation melting obviously meets requirements for a growing number of large-scale industrial applications [20].

In axisymmetric EM levitation melting furnaces, the Lorentz force vanishes at the symmetry axis. The melt outflow and leakage can be hindered at this lowest point on the axis of a levitated sample mainly by the surface tension. Therefore, the charge weight is limited to 50-100 g [21], and industrial needs for the scale-up remain unsatisfied.

A. Conventional EM levitation melting

EM levitation and induction melting of Al samples (m = 21.5 g) in a laboratory-scale conventional levitation furnace has been investigated experimentally already in the early fifties [18]. The setup consisted of two coaxial inductors – cone-shaped levitation coil below and flat stabilizing coil above the droplet – that were fed with counter-oriented alternate currents of I_{ef} = 600 A at a frequency of f = 9.6 kHz. Our reproduction of this pioneer levitation melting experiment by means of 3D transient numerical simulation (Fig. 6, a) demonstrates the main challenge of conventional levitation method.

In conventional quasi-axisymmetric EM levitation melting furnaces the Lorentz force vanishes on the symmetry axis of a levitated charge (Fig. 6, b), since the radius of induced azimuthal eddy currents tends to zero in vicinity of the axis. This means that the melt leakage at the bottom of the droplet near the symmetry axis is prevented mainly by the surface tension. Meanwhile, the Lorentz force is responsible also for intensive turbulent stirring of the melt (Fig. 6, c) that constantly perturbates free surface and makes EM confinement even more challenging. Consequently, only small amounts of liquid metal up to 50-100 g [21] can be levitated in quasi-axisymmetric meridional EM fields. In spite of attractive advantages of the levitation melting process, the scale-up restriction makes impossible the application of conventional levitation melting for industrial needs.

B. Levitation melting in a single-frequency horizontal field

The new levitation melting method applies horizontal AC magnetic field (instead of meridional AC magnetic field generated by conventional inductor) in order to exert the Lorentz force also at the bottom of the levitated sample. The pilot laboratory-scale single-frequency EM levitation melting furnace [9] consists of a ferrite yoke (outer loop and two poles) and a pair of water-cooled inductors that are fed with alternate current in the same direction (I_{ef} = 54 A, f =29 kHz) (Fig. 7, a). Four soft magnetic material teeth are introduced along yoke poles in order to stabilize Al sample (m = 4 g) in the xz-plane. Our 3D transient simulation is in a good agreement with 2D steady calculation and experimental measurements of the droplet shape and position from [9] (Fig. 7, b-e). 3D numerical results for the Lorentz force distribution on the orthogonal cross-sections demonstrate partial improvement of EM confinement in case of horizontal field (Fig. 7, b). Instead of a single Lorentz force zero at the bottom of the droplet (Fig. 6, b) we obtain two Lorentz force minima in the yz-plane (Fig. 7, b). The given Lorentz force drives the flow upward on the vertical centerline of the droplet (Fig. 7, c).

Alternate current in inductor generates alternate magnetic field that due to the high magnetic permeability of the ferrite is mainly concentrated in the yoke. In the air gap between ferrite poles the magnetic field lines spread and due to the skin effect flow around electrically conductive Al droplet from one yoke pole to another. In the regions where magnetic field lines are separating at the surface of the drop the minimum of the Lorentz force is expected due to the small eddy currents (eddy current radius tends to zero at magnetic field line separation point).

Meanwhile, maximum of the Lorentz force is expected at the bottom of the drop due to the greater field intensity and dominating field component along free surface. Particular Lorentz force distribution contributes to the stretching of the drop along magnetic field lines. In some time, curvature radius of droplet free surface where magnetic field line separation takes place becomes small enough and growing contribution of surface tension effects will stop the droplet stretching.

However, for the greater volumes of EM levitated droplets the particular single-frequency horizontal EM field configuration will contribute to the droplet shapes that are significantly stretched along EM field lines. In the meantime, the length of the droplet is limited due to the desired minimum distance between inductor coils or yoke poles.

C. Levitation melting in two frequency horizontal fields

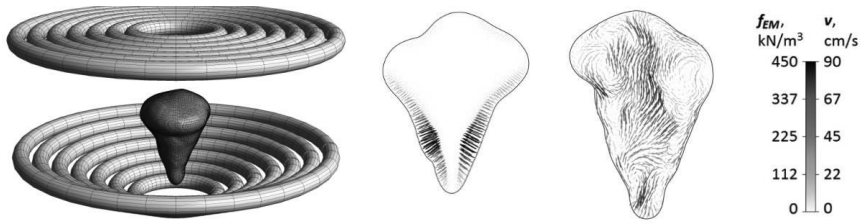
In order to increase the weight of the levitated melt and to maintain the compact shape of the droplet, an additional orthogonal horizontal EM field has been installed (Fig. 8). Application of the same frequency field with different phase shifts is not an option and the reasons have been explained in [22].

The modified setup consists of two pairs of inductor coils with orthogonal axis orientation that generate horizontal and perpendicular EM fields of different frequencies (I_{ef} = 235 A, f_1 = 21.6 kHz and f_2 = 29.0 kHz). In order to obtain greater magnetic induction in the region of the levitating droplet and to separate the reverse magnetic flux, the magnetic field is conducted by the yoke poles and enclosed in the outer ferrite loop. Magnetic material teeth are arranged along yoke ends in order to redistribute the EM field and stabilize the molten Al sample in xy-plane. The solid Al sample (m = 33 g) was cut in a rectangular shape in order to obtain greater stability during the levitation melting experiment.

Our 3D numerical calculation results for the Lorentz force density distribution and a fully developed velocity pattern on orthogonal cross-sections give an insight into the coupled EM and fluid flow phenomena of a levitated molten metal in the two-frequency EM levitation melting furnace (Fig. 9).

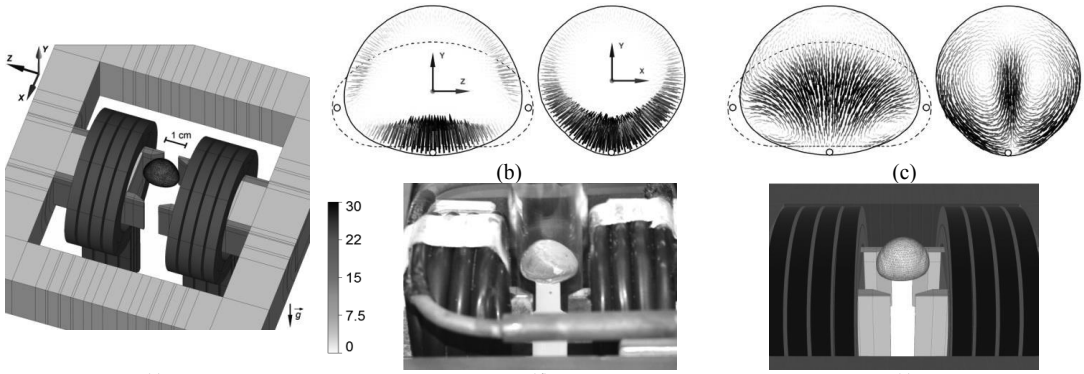
From the distribution of the Lorentz force it can be clearly noticed that in particular orthogonal two-frequency EM field the undesirable minimum of force in the regions of EM field line separation is reduced, hence smaller droplet dimensions are obtained in xy-plane. The stability of the shape over time at a fully developed flow regime, the flat bottom of droplet and a “square” profile in xy-plane is in good agreement with experiment. Meanwhile, the distribution of the Lorentz force, force domination at the bottom and local maximums on the top surface right above regions of force minimum, contributes to a formation of one large toroidal vortex and a tiny flow recirculation (Fig. 9, a).

Moreover, despite that the Lorentz force has no sensible azimuthal component, the flow in xy-plane arranges itself in one counter-clockwise vortex around z-axis (Fig. 9, b). Presumably, this effect is caused by asymmetry introduced by consideration of inductor coils of a spiral shape, however, requires deeper investigation. Note that the flow rotation in xy-plane influences the flow in meridional planes (xz- and yz-planes) on account of the centrifugal acceleration.



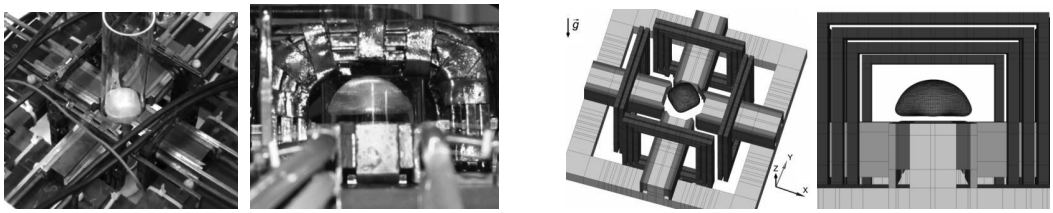
(a) (b) (c)

Fig. 6. (a) – conventional quasi-axisymmetric levitation melting inductor and instant shape of the levitating Al droplet (m = 21.5 g), (b) – Lorentz force density and (c) – turbulent flow on the cross-section of the droplet at different time steps



(a) (d) (e)

Fig. 7. (a) – 3D numerical model of a single-frequency EM levitation melting setup, (b) – calculation results for the Lorentz force (10^4 N/m^3), (c) – fully developed flow (cm/s) and free surface shape (solid line) in comparison to 2D calculation (dashed line) and experimental measurements (points), qualitative comparison between (d) – experimentally observed and (e) – 3D numerically simulated shape of molten Al droplet (m = 4 g)



(a) (b)

Fig. 8. EM levitation of molten Al sample (m = 33 g) in (a) – experiment and (b) – 3D simulation of melting setup

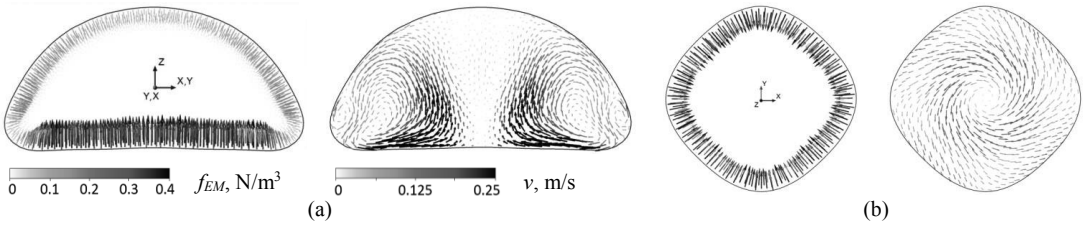


Fig. 9. 3D simulation results for free surface shape, Lorentz force density by fully developed flow of molten Al (m = 33 g) in two-frequency EM levitation melting setup shown on (a) - *xz*- or *yz*-plane and (b) - *xy*-plane at middle height of droplet

D. Scale-up of the two-frequency levitation melting furnace

On the ground of our numerical results we have designed and manufactured a scaled-up experimental setup for the levitation melting of Al samples with increased mass (Fig. 10). The setup consists of a ferrite yoke made from 3C92 material (outer loop and four poles) and two pairs of water-cooled inductors with 4 windings. Inductor coils with capacitors of 16.3 μF and 18.5 μF create two oscillation contours that operate at 13 kHz and 14 kHz. Accordingly, two different generators (producer: EMA-TEC) are used simultaneously in our experiments. EM field frequencies and their difference of 1 kHz are high enough to neglect time-dependent Lorentz force terms in the levitated melt [22]. Al samples were cut from a rod with 6×6 cm cross-section, therefore, 1 cm of the sample height corresponds to a mass of 100 g.

The effective current value was set to I_{ef} = 700 A in both inductor pairs that operate at different frequencies (f_1 = 13 kHz and f_2 = 14 kHz) and Al block (6×6×2.5 cm, m = 250 g) was released in 1 cm above the furnace. Because of rectangular shape of the block and specific shape of the ferrite poles and inductors, the levitating solid block orients itself to a position with corners pointing at the centers of yoke poles (Fig. 11, b). Meanwhile, slight rotational (in horizontal plane) and vertical oscillations of the levitated solid samples were observed during our melting experiments with a power-control mode of generators. Operating generators in a voltage-control mode led to development of vertical oscillation instability of a solid sample. The phenomenon has been explained using numerical simulation in the next section.

Good qualitative agreement for the free surface shape and position of the fully molten Al sample of 250 g has been obtained between our 3D simulation (Fig. 11, c) and experiment (Fig. 11, d). As the fully molten state was reached, a water-cooled copper tube was slightly immersed in the liquid aluminum (Fig. 11, e) and a solidified sample with "captured" free surface shape has been obtained (Fig. 11, f). Solidified sample only qualitatively represents the free surface shape of the liquid state, since crystallization starts from the top and the volume shrinks for almost 15%.

Contactless levitation melting of 400 g of aluminum was achieved using f_1 = 13, f_2 = 14 kHz and I_{ef} = 780 A (Fig. 12). The melting starts from corners and bottom of the levitating block. Note that these experiments have been performed in an open air atmosphere, therefore, rich oxidation of the free surface was inevitable. Levitation melting of 500 g of aluminum in a scaled-up two-frequency setup was performed using increased current I_{ef} = 800 A and the same f_1 = 13 kHz, f_2 = 14 kHz. Good qualitative agreement between experiment (Fig. 13, a) and 3D simulation (Fig. 13, b) has been obtained for the liquid metal position and shape despite the rough assumption for constant material properties, especially, temperature-independent electric conductivity of Al and temperature- and field-independent relative magnetic permeability (μr = 50) of the ferrite. Asymmetric melting of the solid sample influenced formation of the oxide layer and led to slightly asymmetric shape of the fully molten sample in experiment. Oscillations of the free surface of the melt indicated on the intensive turbulent flow caused by the Lorentz forces.

These experiments proved that the two-frequency horizontal EM field configuration, compared to a conventional levitation method, can be used for the levitation melting of aluminum samples with increased mass. Moreover, the limitation of maximum 50-100 g for the levitation melting in conventional inductor has been exceeded with this method.

Additionally, contact-less single-shot discharge of the levitated melt can be precisely controlled by the current in inductor. For example, simultaneous decrease of current in both inductor pairs below a critical value initiates contact-less draining of the whole melt volume.

E. Stability of the levitated solid samples

Meanwhile, rotational and translational oscillations of the levitated solid samples were observed during our melting experiments with a voltage-control mode of generators. Mechanisms of oscillations and instability have been investigated by numerical simulations. We have considered aluminum block 6×6×3 cm (m = 300 g) levitating at equilibrium state (resulting forces and moments are zero when z = 0 and φ = 0 (Fig. 14) in a two-frequency setup (I_{ef} = 933 A, f_1 = 13 kHz, f_2 = 14 kHz). The total current in simulation fits the total current in experiment.

Then we have fixed the voltage and performed two types of calculations: obtained z-component of the Lorentz force at different positions of the sample on the z-axis $f_{em,z} = f_{em,z}(z)$ with fixed φ = 0 (Fig. 15) and obtained Lorentz force torque in xy-plane at different orientations of the sample $M_{em,xy} = M_{em,xy}(\varphi)$ with fixed z = 0 (Fig. 16). Moreover, we retrieved the change of effective current $I_{ef} = I_{ef}(z)$ and $I_{ef} = I_{ef}(\varphi)$ due to the fixed voltage and the change of sample position (and, therefore, inductivity).

Since $f_{em,z} = f_{em,z}(z)$ is obtained for φ = 0 and $M_{em,xy} = M_{em,xy}(\varphi)$ for z = 0, the equations of motion (11) and (12) can be solved:

$$z''(t) = \frac{f_{em,z}[z(t)]}{m} - g; \quad z(0) = z_0; \quad z'(0) = 0; \quad (11)$$

$$\varphi''(t) = \frac{M_{em,xy}[\varphi(t)]}{I_{xy}}; \quad \varphi(0) = \varphi_0; \quad \varphi'(0) = 0; \quad (12)$$

where z_0 and φ_0 are initial deviations from the equilibrium state and $I_{xy} = ma^2/6$ is the moment of inertia around z-axis (a = 6 cm). Solution of equations (11) and (12) provides oscillations with non-increasing amplitude. Moreover, such oscillations should be damped by the air and EM breaking in experiment. The growing oscillation amplitude in experiment can be explained by the small time delay τ of current (due to reaction time of generator, etc.). In our simulation we have obtained $I_{ef} = I_{ef}(z)$ and $I_{ef} = I_{ef}(\varphi)$ as if I_{ef} is instantly (τ = 0) adjusted due to the changed position of the sample and inductivity of the system. However, it is likely that in experiments $\tau > 0$. For constant material properties at the fixed position of the sample we can assume that $f_{em,z} \sim I_{ef}^2$. Therefore, we can recalculate *Lorentz* force at a given position with a new value of I_{ef}^* according to (13):

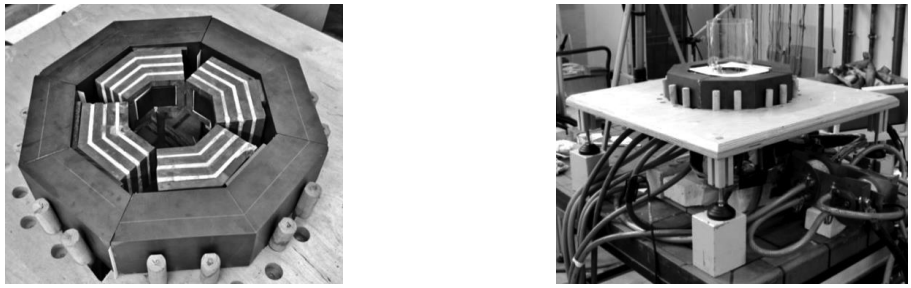
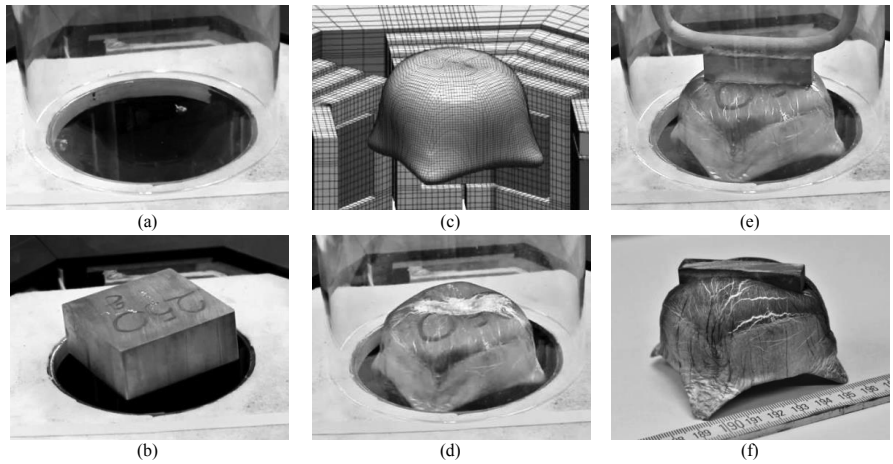


Fig. 10. Fig. 10. The scaled-up two-frequency experimental setup for the levitation melting of Al samples up to 500 g

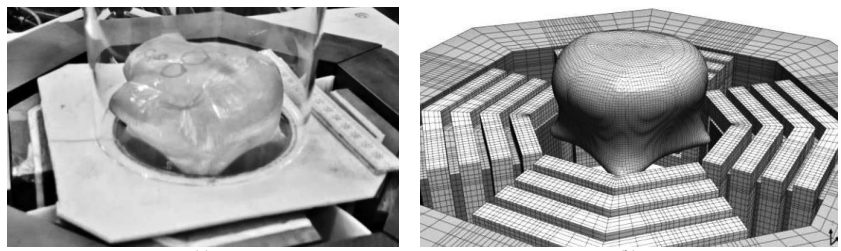


(a) (c) (e)

(b) (d) (f)

Fig. 11. (a) – empty levitation melting furnace, (b) – levitation and heating of a solid Al block (m = 250 g), (c) – shape of a fully molten Al sample predicted by our 3D numerical simulation and (d) – observed in experiment, (e) – initiation of solidification due to the contact with immersed water-cooled copper tube and (f) – a fully solidified Al sample with "captured" free surface shape

Fig. 12. Levitation melting of 400 g of Al in a scaled-up two-frequency setup



(a) (b)

Fig. 13. Levitation melting of 500 g of Al in a scaled-up two-frequency setup in (a) - experiment and (b) - 3D simulation

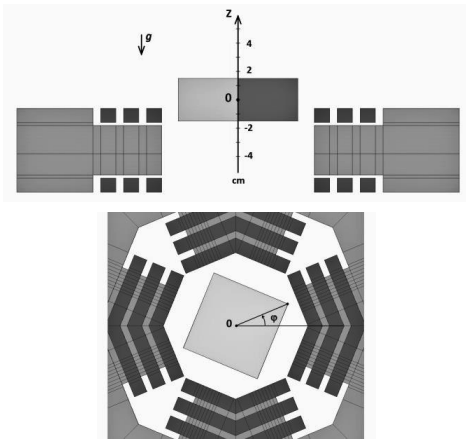


Fig. 14. 3D simulation of solid Al sample levitation in experimental setup

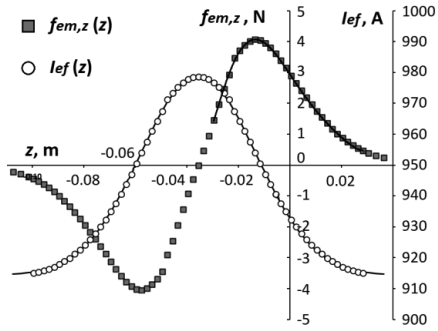


Fig. 15. Calculated z-component of the *Lorentz* force $f_{em,z}$ at different sample positions on the z-axis and $\varphi = 0$. Effective current is adjusted to maintain the constant voltage

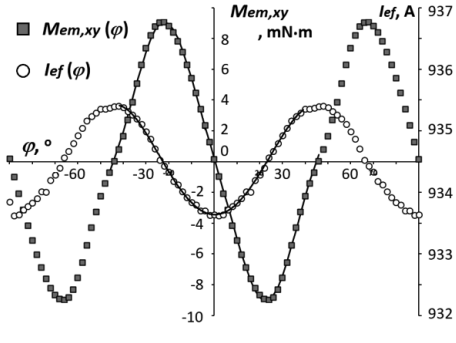


Fig. 16. *Lorentz* force torque in xy-plane $M_{em,xy}$ at different sample orientations φ and $z = 0$. Effective current is adjusted to maintain the constant voltage

$$f_{em,z}(z, I_{ef}^{*}) = f_{em,z}(z, I_{ef}) \cdot \left(\frac{I_{ef}^{*}}{I_{ef}} \right)^2; \qquad (13)$$

Let us assume that the different value of effective current $I_{ef}^{*} = I_{ef}[z(t - \tau)]$ is caused by the time delay τ. Then. (10) and (12) can be rewritten as follows (14) and (15):

$$z''(t) = \frac{f_{em,z}[z(t)]}{m} \cdot \left(\frac{I_{ef}[z(t-\tau)]}{I_{ef}[z(t)]} \right)^2 - g; \quad z(t \le 0) = z_0; \qquad (14)$$

$$\varphi''(t) = \frac{M_{em,xy}[\varphi(t)]}{I_{xy}} \cdot \left(\frac{I_{ef}[\varphi(t-\tau)]}{I_{ef}[\varphi(t)]} \right)^2; \quad \varphi(t \le 0) = \varphi_0; \qquad (15)$$

Numerical solution of equations (14) and (15) reveals instability of axial oscillations. Oscillation amplitude increases from 1 mm up to 15 mm in 10 s with an AC current delay of τ = 20 ms (Fig. 17). Calculated period of axial oscillations $T_{z,calc}$ = 305 ms appears to be in a good agreement with experiment $T_{z,exp}$ = (300 ± 20) ms. Meanwhile, the simplified model predicts also the damping of oscillations at τ = 250 ms and provides the solution to overcome undesirable instability in case of theoretically adjustable time delay τ.

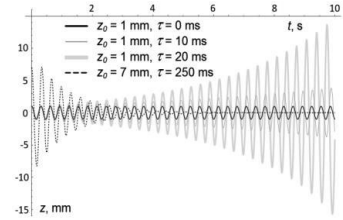


Fig. 17. Oscillations $z(t)$ of a solid levitating sample at a constant voltage and different values of AC current delay τ

Calculated oscillation period of twisting in xy-plane $T_{xy,calc}$ = 490 ms fits experimentally observed period of $T_{xy,exp}$ = (500 ± 20) ms (Fig. 18). Because of the much less pronounced dependence $I_{ef} = I_{ef}(\varphi)$, the same time delay of τ = 20 ms does not bring notable amplification of twisting in xy-plane. Therefore, only axial instability is detected in experiments. Experimental verification of the provided explanation forms the further plans of research.

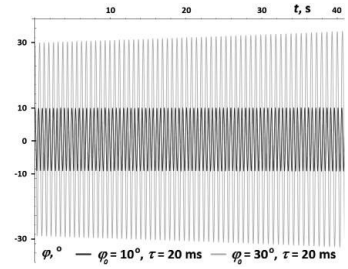


Fig. 18. Oscillations $\varphi(t)$ of a solid levitating sample at a constant voltage and different values of AC current delay τ

CONCLUSIONS

A three-dimensional model for numerical calculation of free surface dynamics of melt in an alternate EM field is developed on account of external coupling of *ANSYS Classic* and *ANSYS CFX*. The model is adjusted for the case of EM levitation taken into the full 3D consideration. The comparison of our k-ω SST calculation results to appropriate experimental measurements and results of other models for the steady state free surface in induction crucible furnace, induction furnace with cold crucible and EM levitation melting setup, as well as comparison of free surface small amplitude oscillation period to analytical estimation, revealed good correlation and approved accuracy of developed approach.

By means of horizontal and orthogonal EM fields of different frequencies, compared to the levitation in conventional inductor and zero Lorentz force on the symmetry axis, it is possible to increase the mass of the levitated liquid metal and to reduce the pronounced dependence on the surface tension.

Investigations by numerical simulation and corresponding successful contact-less melting experiments in the novel two-frequency levitation melting furnace have been performed using Al samples up to 500 g. and the levitation melting can now be applied for industrial applications. During the levitation melting experiments oscillation instability of solid samples has been observed. Instability has been explained by the small time delay in AC current adjustment due to the changed position of a sample if a constant voltage mode is used for generator control. A choice of a constant power mode ensured stable levitation of fully molten samples.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors are grateful to the financial support of the ESF project of the University of Latvia, contract No. 2009/0138/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/004 and the German Research Association, grant No. BA 3565/3-2. The authors would like to thank Prof. Dr.-Ing. O. Pesteanu (*1945-†2012) for the development of the novel two-frequency levitation melting method and acknowledge his contribution and support in the early stage of this research.

REFERENCES

[1] A. Umbrashko, E. Baake, B. Nacke, A. Jakovics, Modeling of the turbulent flow in induction furnaces. Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 37B, no. 5, pp. 831-838, October 2006.

[2] E. Baake, A. Umbrashko, A. Jakovics, Numerical Simulation of Turbulent Flows, Heat and Mass Transfer in Metallurgical Induction Processes. steel research international, vol. 78, no. 5, pp. 413-418, 2007.

[3] F. Negrini, M. Fabbri, M. Zuccarini, E. Takeuchi, M. Tani. Electromagnetic control of the meniscus shape during casting in a high frequency magnetic field. Energy conversion and management, N41, pp. 1687-1701, 2000.

[4] Y. W. Cho, Y. J. Oh, K. W. Yi, S. H. Chung, J. D. Shim. Numerical analysis of molten metal shape in cold crucibles by 3D FEM. Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., N4, pp. 11-22, 1996.

[5] E. Westphal. Elektromagnetisches und thermisches Verhalten des Kaltwand-Induktions-Tiegelofens. Doktor-Ingenieur Dissertation, Dusseldorf, VDI Reihe 21 Nr. 210, 138 S., 1996.

[6] F. Bernier. Optimierung des thermischen Verhaltens metallischer Dchmelzen in Kaltwand-Induktions-Tiegelofen. Doktor-Ingenieur Dissertation, Dusseldorf, VDI Reihe 19 Nr. 133, 138 S., 2001.

[7] M. Scepanskis, A. Jakovics, E. Baake, B. Nacke, Solid inclusions in an electromagnetically induced recirculated turbulent flow: Simulation and experiment. Int. Journal. of Multiphase Flow, 64 pp. 19-27, 2014.

[8] M. Kirpo, Modeling of turbulence properties and particle transport in recirculated flows. Ph.D. Thesis, University of Latvia, Riga, 184 p., 2008.

[9] O. Pesteanu, E. Baake, The multicell Volume of Fluid (MC-VOF) method for free surface simulation of MHD flows. Part I: Mathematical model. ISIJ International, vol. 51, no. 5, pp. 707-713, 2011.

[10] V. Bojarevics, A. Roy, K. A. Pericleous. Magnetic levitation of large liquid volume. Magnetohydrodynamics, no 4, pp. 339-351, 2010.

[11] K. Pericleous, V. Bojarevics, G. Djambazov, R. A. Harding, M. Wickins. Experimental and numerical study of the cold crucible melting process. Applied Mathematical Modelling, no. 30, pp. 1262-1280, 2006.

[12] V. Bojarevics, R. A. Harding, K. Pericleous, M. Wickins. The development and experimental validation of a numerical model of an induction skull melting furnace. Metallurgical and Materials Transactions, no. 35B, pp. 785-803, 2004.

[13] V. Bojarevics, A. Roy, K. Pericleous. Numerical model of electrode induction melting for gas atomization. International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources, Padua, Italy, May 18-21, Book of abstracts, pp. 11-18., 2010.

[14] S. Easter, V. Bojarevics, K. Pericleous. Numerical Modelling of Liquid Droplet Dynamics in Microgravity. Journal of Physics: Conference Series, 327, 012027, 2011.

[15] F. Hegewaldt, L. Buligins, A. Jakowitsch. Transient bath surface bulging at energization of an induction-type crucible furnace. Elektrowärme international, Nr. 1, S. 28-42, 1993.

[16] H. K. Versteeg, W. Malalasekera. Computational fluid dynamics. Second edition. Glasgow. Pearson Education Limited, pp. 40-115, 2007.

[17] O. Muck, German Patent 422004,.October 30, 1923.

[18] E. Okress, D. Wroughton, G. Comenetz, P. Brace, J. Kelly, Electromagnetic Levitation of Solid and Molten Metals J. Appl. Phys., 23 545-552, 1952.

[19] I. Egry, J. Szekely, The Measurement of thermophysical Properties in Microgravity Using Electromagnetic Levitation. Adv. Space Res., 11, pp. 263-266, 1991.

[20] V. Bojarevics, A. Roy, K. Pericleous, Magnetic levitation of large liquid volume. Magnetohydrodynamics, 46/4, pp. 317-329 (2010).

[21] V. Bojarevics, K. Pericleous, M. Cross, Modeling the dynamics of magnetic semilevitation melting Metall. Mater. Trans. B 31, pp.179-189, 2000.

[22] S. Spitans, Investigation of turbulent free surface flow of liquid metal in electromagnetic field, Ph.D. thesis, University of Latvia, 2015.

Innovative methods for optimal design of complex induction heating processes

Nacke B.
Institute of Electrotechnology
Leibniz University Hannover
Hannover, Germany
nacke@etp.uni-hannover.de

Nikanorov A.
Institute of Electrotechnology
Leibniz University Hannover
Hannover, Germany
nikanorov@etp.uni-hannover.de

Baldan M.
Institute of Electrotechnology
Leibniz University Hannover
Hannover, Germany
baldan@etp.uni-hannover.de

***Abstract*—Induction heating has today a wide range of applications in industrial production. Induction heating processes used for melting, through heating or heat treatment are complex processes due to coupled electromagnetic and thermal fields and nonlinear material properties. The main process parameters are the applied frequency, the heating time and the inductor geometry. The optimal design of the combination and interaction of these parameters is very complex. The paper describes different methods which were used in the past and three examples for innovative methods for the optimal design of complex induction heating processes. The first two examples are using a combination of optimization algorithms and numerical simulations, the third example a hierarchical optimization method for the design of induction heating processes.**

Keywords—Induction heating, optimal design, numerical optimization, inductor optimization, hierarchical optimization

I. INTRODUCTION

Induction heating has today a wide range of applications in industrial production. Induction heating is used for melting of metals, for heating before forging or rolling of metallic products or for heat treatment of metal, mainly steel pieces. All induction heating processes are very complex, because the processes are influenced by the interaction of coupled electromagnetic and thermal fields, the nonlinear behaviour of materials properties, the applied frequency and finally the shape of the inductor.

For the design of induction heating processes all these parameters have to be taken into account in order to get the required temperature distribution in the work-piece. The required temperature distribution can be homogeneous in the case of through heating for forging or rolling or defined non-homogeneous in the case of surface hardening. The temperature distribution is mainly influenced by the applied frequency and the heating time. Therefore, these two parameters have to be optimized for each induction process. Furthermore, for applications with required local or partial heating only, as it is typical for induction surface hardening, the shape of the inductor plays an important role. Therefore, beside the optimal design of the operational parameters, also the design of the inductor geometry is a major part of the overall design of induction heating processes.

In the past, the design of induction heating processes was carried out with the help of the knowledge of experts and finally verified or adapted by experiments. Due to the facts, that experimental work is very expensive and time consuming and the heated work-pieces became more complex, the quality requirements of the heated products and the production rate have been increased, induction heating processes in became more complex. Only expert knowledge was no more sufficient for the design of such complex processes and, therefore, numerical simulations were additionally used for the optimal design of such complex processes. Nevertheless, even in this case using numerical models, expert knowledge is needed to find the optimal design.

The next step in the development of intelligent design tools is the combination of optimization methods and numerical models in order to get finally the process optimization only by computer design. Today, first approaches for the design of complex induction heating processes by automatic computer optimization have been tested successfully using mathematical optimization algorithms in combination with numerical models.

The paper describes three examples for the optimal design of complex induction heating processes using innovative methods. The first two example are showing first applications of innovative methods for the design of induction heating processes using the combination of numerical modeling and mathematical optimization: the design of a transverse flux induction process for heating of strips and the design of an inductor for homogeneous and low-stress heating of graphite discs. The third example shows a hierarchical system of optimization for very complex induction heating systems with an application for induction surface hardening.

II. OPTIMAL DESIGN OF A TRANSVERSE FLUX INDUCTION HEATER

Heating of thin metal strip is an absolutely necessary process in many industrial production and processing lines. The field of application of strip heating is from annealing, coating and drying to continuous casting and rolling.

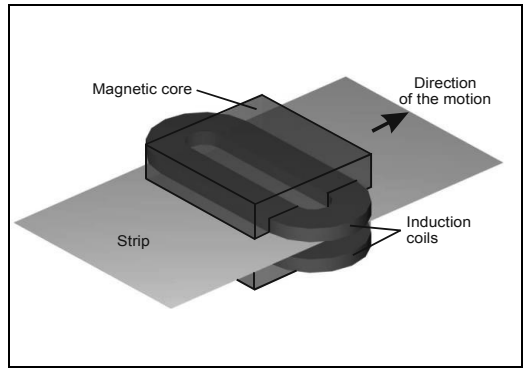


Fig. 1. Schematic view of TFH system

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

Transverse flux induction heating (TFH) (Fig. 1) offers many advantages in comparison with conventional gas-fired and electrical-resistance furnaces mainly used nowadays. The TFH technology allows heating even a thin strip from metals with high electrical conductivity with very high electrical efficiency. It can be used in many applications with much less specific energy consumption compared to conventional heating methods. Extremely small floor space required makes the TFH installations irreplaceable in continuous industrial lines. For successful industrial TFH applications it is necessary not only to choose the right basic concept of the system but to provide the optimum set of its design parameters also. Possibilities and potentials of the developed optimization approach are illustrated on the following example of TFH installation design [1].

According to the technological requirements to the heating process, integral parameters like efficiency and power factor should be optimised first of all. It can be done on the basis of extended parametrical studying of electrical characteristics depending on the geometry of the TFH system. These dependencies also allow estimating the behaviour of the strip temperature under the influence of different negative effects, for example position of the strip in the operating air gap. To be all the time in the field of high electrical efficiency, the correlation between some input data should be defined during the first step. In this way the number of independent variables can be reduced before to start the second step of design. The working field for independent variables could be fixed using the analytical formulations [2]. With a help of two-dimensional (2D) numerical simulation the analytical results are checked and corrected if necessary (Fig. 2).

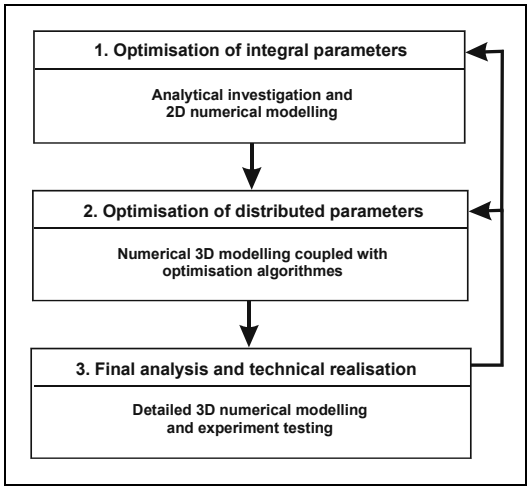


Fig. 2. Strategy of optimal design for TFH installation

The received dependencies are used during the second step of the design strategy to optimize the distributed parameters like temperature profile in the strip. To provide the automatic optimisation search the three-dimensional (3D) numerical models have been coupled with optimization algorithms. It allows finding an optimum solution with fine enough accuracy in acceptable time. Transformation of the received mathematical solution to engineering design should be done during the third step. After the final analysis and detailed 3D investigation, the behaviour of the developed TFH system and the heating stability could be examined by experimental tests. The influence of the induction coil input-output connections can be checked during this step as well.

Coupling between optimization algorithms and simulation packages is organised in modular style which allows building the optimization loop from universal bricks in a best way. Exchange of data between the modules is provided by pre- and post-processors created individually for each specific problem. Because of this structure, it is very easy to test different optimisation algorithms from the specially created library and simulation codes to choose finally the most effective combination. For example, described below optimum solution for TFH system has been found with the complex search as optimization algorithm and 3D HIHTEC program [3] as simulation code.

The created strategy and tools have been applied for optimal design of one TFH industrial application. The task was to increase the production rate of an already running annealing line by implementation of TFH unit as a strip pre-heater. Copper or copper alloys strip of 420 mm width must be heated starting from room temperature up to 300 °C. The temperature profile over the strip width at the outlet of the heating installation should be homogeneous with maximum temperature deviation of ±4 %. Taking into account high electrical conductivity of the heated material, the concept of TFH system with magnetic core has been chosen for further optimization (Fig. 3). This concept provides a high level of electrical efficiency even for copper or copper alloys strip. The shape of the induction coil heads intends to be rounded for easier manufacturing.

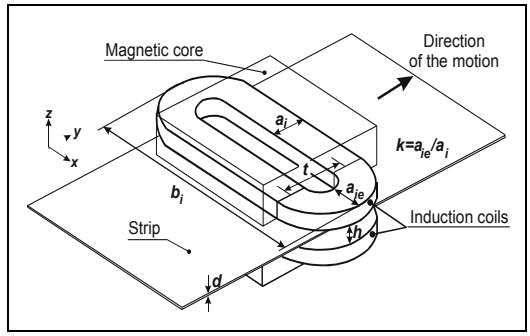


Fig. 3. Geometry and design variables for the example of optimal design

The dependency of the operating frequency on the pole pitch t was determined during the first step of optimization. Thus the frequency is included as an additional internal variable to the second step of automatic optimization. That is why for the presented example the set of independent variables consists of four parameters: length of the induction coil b_i, width of the induction conductor a_i, pole pitch t and so called coil head factor k, which is the ratio of the conductor width a_{ie} in the head of the coil to the width of the conductor a_i in the regular zone of the inductor. The goal function is defined as the ratio of the difference between maximum and minimum temperatures to the average temperature over the strip width at the end of the heating zone. The allowed range for independent design variables is

fixed during the first step of the strategy by analytical and 2D numerical tools and expert solution.

With the input data described above the automatic optimization procedure can be started. Four-dimensional optimization search coupled with 3D HIHTEC has required 305 calculations of the goal function till the stop criteria was reached. The curve in Fig. 4 demonstrates that the convergence process is stable enough. Moreover, the last steps of the search improve the goal function value insignificantly.

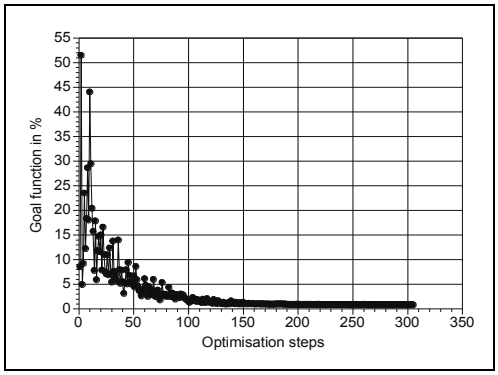


Fig. 4. Goal function behaviour during the optimization search

The optimization search gave the best set of the design variables for the TFH system (Table 1).

TABLE 1. RANGE AND OPTIMUM VALUES OF THE DESIGN VARIABLES

Variable	Range	Optimum value
Length of the induction coil b_i	350 mm - 600 mm	462 mm
Width of the induction conductor a_i	32 mm - 160 mm	122 mm
Pole pitch t	80 mm - 300 mm	220 mm
Coil head factor k	0,3 - 1,5	0,6
Frequency f	190 Hz - 700 Hz	255 Hz

Going to the region where the coil head factor is smaller then 1.0, very homogeneous temperature distribution over the strip width becomes possible. In opposite to the temperature distribution in the strip with a deviation of 10 % reached earlier without automatic optimization, the temperature profile after optimization is provided with a non-homogeneity of 0.6 % only (Fig. 5) [4].

To investigate the solution received by automatic optimization, the numerical calculations of the system with the optimum set of the design variables have been carried out. The reached electrical efficiency of 94.4 % for copper alloy is unbelievably high even for induction heating technology. Additional numerical investigation of the heating stability shows that the influence of strip position fluctuations inside the inductor in vertical direction to the temperature distribution can be neglected. At the same time the system is sensitive to the horizontal fluctuation of the strip position. It can require providing a special arrangement to improve the horizontal stability of the process. Thermal deformation of the strip during the heating is within one half of the air gap h between the inductors. It avoids the risk of any dangerous mechanical contacts of the strip to inductors and provides the safety operation of the installation.

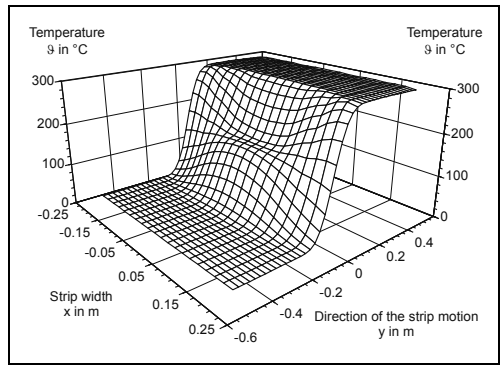


Fig. 5. Optimized temperature distribution in the strip

To validate the mathematical solution and to test its engineering realisation, an experimental TFH set-up has been developed and build at the laboratory of ETP. An infrared camera was used for precise measuring the strip temperature field. Steady-state mode of the heating was reached within 12 s. A brass strip of 0.8 mm thickness was used for the experiments. The optimum design of inductors in combination with optimum value of operating frequency provides the predicted very homogeneous temperature profile over the strip width (Fig. 6). The frequency can be also used for final tuning of the temperature profile in the strip directly in operation.

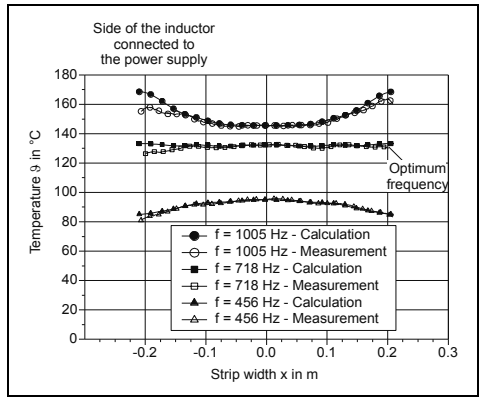


Fig. 6. Calculated and measured temperature profiles over the strip width

III. OPTIMAL DESIGN OF AN INDUCTION HEATER FOR A GRAPHIT DISC IN PLANETARY REACTORS

Planetary reactor consists of water-cooled stainless steel housing with quartz and easily replaceable graphite components including susceptor and satellites (Fig. 7). The disc shape susceptor is used as holder for the semiconductor wafers. The wafers are very thin crystal discs, on which the gas mixtures are deposited. The wafer holders, satellites, turn friction-free on gas cushions.

Fig. 7. View of the planetary reactor

During the process for the production of compound semiconductor layers, the raw materials, gases, are dispersed inside the reactor across the wafers. To obtain the crystal growth deposits, the wafers must be heated up to the process temperature of above 1100 °C. The heating is provided by a high-frequency induction system. An induction coil of "pancake" shape is mounted below the susceptor where the Joule heat is generated.

The graphite susceptor is covered with a thin layer of SiC to protect the graphite against chemically aggressive gas. Therefore, the lifetime of the susceptor is determined by how long the SiC layer is intact. The production cycles with heating up and cooling down lead to significant thermal stresses in the susceptor and the SiC layer. These stresses can result to cracking the SiC layer and its lifetime is reduced. The stress distribution in the susceptor and SiC layer depends on their temperature distributions. To provide as uniform as possible temperature field in the susceptor means to reduce the level of stresses in the SiC layer.

The steady-state temperature field in the susceptor depends on the shape of the induction coil while the transient temperature distribution can be controlled by the electric power. Optimization of the induction coil shape and investigation of temperature transients can be done by numerical simulation only.

A. Numerical models

To solve the problem, a numerical simulation strategy was developed first of all [5]. Generally, the problem requires a three-dimensional solution because the "pancake" shape induction coil has a three-dimensional geometry. In spite of the susceptor is of axisymmetric disc shape, it has several technological drillings. So, the susceptor geometry is three-dimensional as well. Finally, main cracks in the SiC layer depend on how big is the tangential component of the thermal stresses. This component of the stresses cannot be calculated in two-dimensional axisymmetric approach. At the same time, the use of three-dimensional modeling for automatic optimization is extremely ineffective because of long runtime required.

To find a compromise, both two- and three-dimensional modeling have been applied using the commercial package ANSYS [6]. Two-dimensional axisymmetric approach based on coupled electromagnetic and thermal analysis was used together with automatic optimization to search for optimal induction coil shape. It is also very effective for transient analysis, which includes big amount of calculations because of time steps. A three-dimensional electromagnetic and thermal model has been created to investigate how the technological drillings inside the susceptor influence on the electromagnetic field distribution and, finally, on the temperature distribution in the susceptor. The structural analysis must be carried out in three dimensions all the time. The temperature distribution, received in the thermal analysis, is used as input data for the structural one. A special converter has been developed to input the temperature field from the two-dimensional thermal solution into the three-dimensional structural model.

All created models include the electromagnetic and the thermal analysis as well as the structural calculation. They can simulate the steady-state or the transient heating and cooling processes in the planetary reactor. Temperature dependent material properties are taken into consideration by coupling between the electromagnetic and the thermal calculations. The heat exchange intensity on the susceptor surface is an extremely important parameter for the thermal analysis. However, these heat exchange conditions are of very complex nature. The heat flux from the susceptor surface is a result of convection and radiation phenomena. Intensity of both convection and radiation strongly depends on the gas temperature around the susceptor. Different effective values of convective heat exchange coefficient, emissivity factor and reference temperature for all the susceptor surfaces were used to avoid a calculation of gas flow by hydrodynamic analysis. These parameters have been defined so that the heat flux from the susceptor surfaces is close to the real values. Then the defined parameters were used in the thermal model.

Electromagnetic environment in the model includes all electromagnetically active components of the planetary reactor – induction coil, sucseptor, exhauster and metal ring (Fig. 8) – as well as non-conductive space around them. The chamber walls, made of stainless steel, limit the environment. They are taken into account by implementation of parallel magnetic flux boundary conditions.

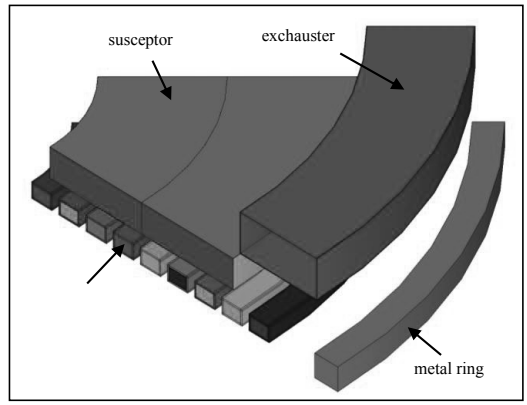


Fig. 8. Electromagnetic components of the reactor (a sector of 45°)

The thermal environment consists of the graphite susceptor with SiC layer. The steady-state thermal solution is based on the balance between the Joule heat, generated in the susceptor, and the thermal losses from the susceptor surfaces. In case of transient thermal modeling, the process is divided on small time steps. Each time step includes first the electromagnetic and then the thermal calculations.

The structural environment includes only the graphite susceptor and SiC layer as well. The temperature distribution from the thermal analysis is used to calculate the thermal stresses and deformation as a result of heat expansion phenomenon.

The two-dimensional axisymmetric approach (Fig. 9) is based on the assumptions that the induction coil of spire shape is presented as a set of concentric windings with the same current and the susceptor has no drillings. Three-dimensional models include the drillings inside the susceptor but no spire shape of the coil is taken into account. This assumption can be used because of the susceptor rotation which equalizes the temperature field in tangential direction. It makes possible to simulate one sector of the reactor against the full system.

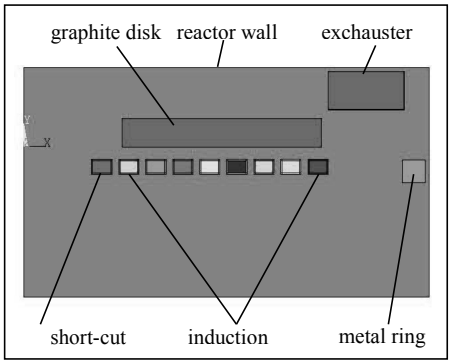


Fig. 9. Two-dimensional approach of modeling

B. Validation of the numerical model

The created models have to be validated because of several important assumptions were made during the modeling concept formulation. For this purpose, one planetary reactor with standard induction coil, shown in Fig. 9, have been simulated in two-dimensions. The temperature profile on the top surface of the susceptor could only be observed and measured during the experiments. That is why this temperature profile has been chosen for comparison in steady-state mode.

Fig. 10 shows the measured and the predicted numerically temperatures. The marked distance is measured from the inner radius of the susceptor. The solid curve is a predicted radial temperature profile over the susceptor. The temperature can be compared with the measured one in several points. Very good coincidence of numerical results with experimental data allows using the models for optimization of the induction coil. Additionally, to estimate the level of thermal stresses, the received temperature field has been used in three-dimensional structural analysis of the susceptor.

The calculations show that the maximum tension in the SiC layer was lower than the critical value for this material. However, the structural analysis, made for the susceptor with drillings, detected that the local tensions are concentrated around the ends of the drillings. Their level can exceed the level of tensions in the susceptor without drillings in two times. Thus, they can lead to cracking the SiC layer. To reduce this negative effect, the temperature distribution in the susceptor should be provided as homogeneous as possible by modifying the induction heating system.

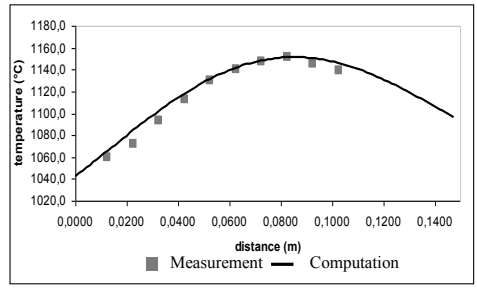


Fig. 10. Measured and predicted temperatures on the top of the susceptor

C. Optimization of the induction coil shape

The steady-state temperature distribution in the susceptor can be mainly homogenized by optimization of the induction coil shape. To solve the problem, the two-dimensional electromagnetic and steady-state thermal model has been combined with automatic optimization search code. The optimization search is based on Genetic Algorithm to make this time intensive calculation procedure as robust as possible [7]. Additionally, the data exchange between the model and the optimization code is organized via external data files. The set of independent optimization variables is transformed to the induction coil geometry in the input interface before to run the model. The received temperature distribution in the susceptor is a basis to calculate the goal function value in the output interface. This value is used by Genetic Algorithm to define the best direction of the search. The developed combination allows making an expert monitoring of the search during the optimization [8].

The next important step of the search preparation is to formulate the optimization task. It includes selection of the independent variables and formulation of the goal function. The short set of independent variables limits the flexibility to form the coil shape, while the long set increases dramatically the optimization time and can lead to local waves in the temperature distribution. That is why the optimization was started with three independent variables: two of them represent the coil geometry, while the coil current is used to reach the necessary temperature level (see Fig. 11). The coil consists of nine windings of fixed profile. The required inner and outer radius of the coil is reached by spacing between the windings, which was chosen uniform. To find as uniform as possible temperature distribution in the susceptor on the level of 1150 °C, the goal function was formulated as the maximum deviation of temperature from the prescribed value of 1150 °C. This goal function should be minimized during the optimization procedure.

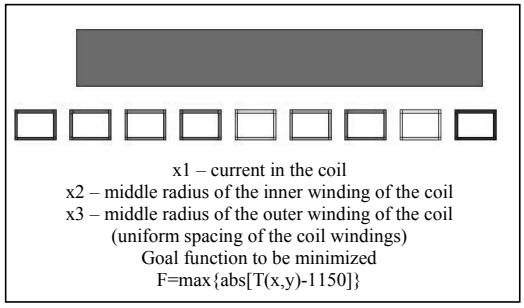


Fig. 11. Independent variables and goal function formulation

The found optimal coil shape provides the results shown in Fig. 12. The Joule heat distribution has increased its density near the inner and the outer borders of the susceptor to compensate additional thermal losses in these regions. The temperature field is very uniform in the regular zone of the susceptor. The maximum temperature deviations are in the upper corners because of high heat losses. Nevertheless, the reached uniformity of the temperature field in the susceptor is of ±22 K against ±66 K in case of the standard induction coil.

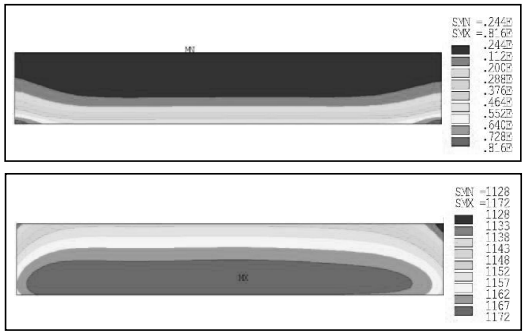


Fig. 12. Joule heat distribution and temperature field in the susceptor provided by the optimal induction coil

The optimum temperature distribution was input to the structural model without technological drillings in the susceptor. The tangential component of tensions in the SiC layer is shown in Fig. 13. The most dangerous tensions are concentrated at the outer border of the susceptor. However, the level of the tensions is much lower than in the case of the standard coil.

The induction coil of found optimum shape has been manufactured and tested in a laboratory set-up and then in an industrial planetary reactor. The predicted temperature field of minimized deviation was confirmed by measurements. The industrial use of the optimized coil increased significantly the lifetime of the susceptors.

Induction heating systems for several types of planetary reactors were investigated by using the developed tools. In some cases, it was not sufficient to optimize the induction coil by the inner and the outer radius only. The optimal solutions have been received by including additional independent variables to the optimization search. Such induction coils have more complex shape.

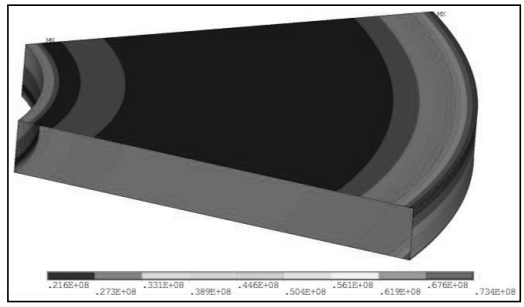


Fig. 13. Tangential component of tensions in SiC layer for optimized coil

IV. Hierarchical Optimization of Induction Hardening Systems

The design of induction hardening systems involves defining both the electrical regime and geometry of the induction coil. This implies a considerable number of degrees of freedom, which must be set in order to reach a given goal. In the last decades, the use of numerical simulations has been a key element in designing induction systems. Especially in the case of complex geometry work-pieces, using only one numerical model for establishing the whole degrees of freedom set can be extremely time consuming. In order to overcome this issue, the full problem may be divided into simpler ones [10-11].

Optimization plays a key role in designing induction heating systems [12]. Some optimization models dealing with induction hardening by means of numerical simulation [13] or experiments [14-18] can be found in the literature. Naar et al. [13] optimized frequency and current density to achieve a temperature rise in a fixed time. Qin et al. [14] presented a response surface method (RSM) for studying und optimizing the effect of five process parameters (feed velocity, input power, gap, curvature and flow rate) on temperature, microstructure, microhardness and phase transformation geometry in a spot continual induction hardening process. Kayacan et al. [18] applied a fuzzy approach to study the influence of coil air-gap, material diameter, cooling time, power, and frequency on the hardening depth and heating time.

In this chapter a hierarchical approach for fully optimizing a surface hardening induction system is described [9]. Starting from a complex geometry work-piece, the heating time, frequency and current that optimally provide the desired hardening depth is determined. The first part of the chapter describes the attempt to optimize the electrical regime by coupling a one-dimensional model with a multi-objective optimization algorithm. The second part investigates the use of a single-objective approach for optimizing, separately, frequency and heating time.

A. 1D numerical model

Numerical simulations were carried out with the commercial package ANSYS®. The one-dimensional numerical model has a planar shape and consists of a square work-piece and a massive copper coil (Fig. 14). Because the model is one-dimensional, every quantity changes only in the transversal direction (y in Fig. 14). The heating process has

been simulated through a harmonic electromagnetic analysis coupled with a transient thermal one. Both electrical and thermal material properties are temperature-dependent. In order to obtain reliable results in induction hardening simulation, the dependency of the magnetic permeability on the magnetic field strength must be taken into account [19]:

$$\mu = 1 + (2.41^{14.73 - \ln H} - 1)(1-(T/T_C)^2), \qquad (2)$$

where μ is the relative magnetic permeability, H the magnetic field strength [A/m], T the temperature [°C], and T_C the Curie temperature. The quenching phase, which is supposed to start immediately after the heating phase, has been simulated with an equivalent temperature dependent heat transfer coefficient (Fig. 15) [20]. The quenching time is 60 s, long enough to cool down the work-piece under 100 °C. Considering that the present work focuses more on the heating stage, it should be noted that neither the flow rate nor the quenching time is an object of the optimization. From the temperature history of each node of the mesh, making use of [21], the final distribution of martensite has been calculated. In this model, the content of martensite in one point is dependent on three aspects: whether the AC_3 temperature has been reached or not, the average cooling rate, and the temperature after the quenching phase. If necessary, the hardness distribution is easily obtainable from the microstructure calculations [11,21].

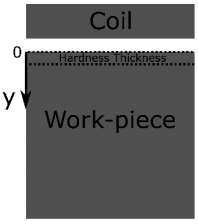


Fig. 14. Geometry of the 1D model

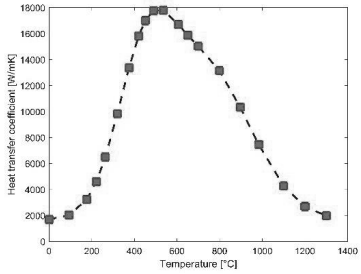


Fig. 15. Dependency of the heat transfer coefficient on temperature for simulating the quenching phase

B. Multi-objective optimization using the 1D model

A great benefit of the one-dimensional model is its non-dependence on the work-piece geometry. Once the 1D model has been coupled with an optimization algorithm, it establishes a tool able to estimate the optimal heating time and frequency. The current is a parameter of optimization too. However, the optimal current value cannot be directly used in the next hierarchical steps because it must be adapted to the surface power that is needed in order to heat the work-piece. At the same time, the results of 1D model enable to estimate the necessary power density and therefore the installation power needed. The parameters that affect results of optimization are the steel grade, the cooling medium, the cooling time and rate, plus, of course, the hardening depth. The carbon steel C56 is considered in this study. The cooling medium is water with an estimated quenching effect visible in Fig. 15. The results of the optimization are thus a function only of the hardening depth.

For the first investigations, it was decided to simplify the numerical model and to consider only the heating phase. In doing so, the hardening depth was identified with the part of the work-piece that has been heated up over the AC_3 temperature, i.e. over 850 °C. In other words, for example in the case of 3 mm hardening depth, a temperature of 850 °C has to be achieved 3 mm distant from the surface. The multi-objective optimization algorithm AMALGAM* [22] has been employed for the analysis. A three dimensional vector x of investigated variables (heating time, frequency and current) has been defined. The first attempt focused on the trade-off between three conflicting functions, i.e. surface temperature $f_1(x)$, energy consumption $f_2(x)$ and heating accuracy $f_3(x)$. Heating accuracy in this case means how the evaluated temperature in the hardening depth differs from AC_3. It turned out that such approach is ineffective in that case, since interesting is only in the part of the Pareto front in which $f_3(x)$ trends to zero.

The next step the optimization algorithm was modified. Similar to [23], a double loop was introduced (Fig. 16). AMALGAM* was used in the "external loop" where the vector variable is now two-dimensional (heating time and frequency) and two objective functions (f_1 and f_2) are considered. The "internal loop" is simply intended to find the right current that zeroes f_3 and it is based on a golden section search and a parabolic interpolation. In fact, given a frequency and a heating time, there is only one value of current that is able to reach the AC_3 temperature in the hardening depth. As a result, each point of the obtained Pareto front is a potential solution. Despite the considerable computational time, this approach is preferable.

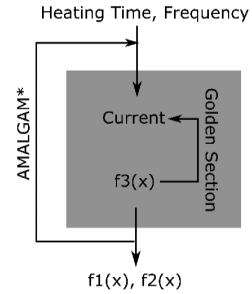


Fig. 16. Double-loop algorithm

The following presents the results obtained with 1 and 3 mm as hardening depths. Table 2 summarizes the search ranges of the variables.

TABLE 2. VARIABLE RANGES

	1 mm hardening depth	**3 mm hardening depth**
Heating time [s]	3 - 20	3 -20
Frequency [kHz]	10-100	1-20

Fig. 17 shows respective 1 and 3 mm Pareto fronts after 15 generations using a population of 25 individuals. Fig. 18, a and Fig. 18, b indicate instead the "image" of the Pareto front, i.e. the values that the variables assume, for the 1 mm case. As expected, the point with minimum surface temperature is characterized by the maximum time and the minimum frequency. But surprisingly, the front can be divided into two parts. In the "left" part all the points assume the minimum range frequency, whereas in the "right" one the heating time is always at minimum. From these results it can be concluded that the frequency plays a minor role compared to the heating time in terms of energy consumption. Further simulations with different time ranges and hardening depths showed analogous results. In other words, in this approach, the choice of the variable ranges directly affects the obtained Pareto front. Therefore, a new strategy was adopted.

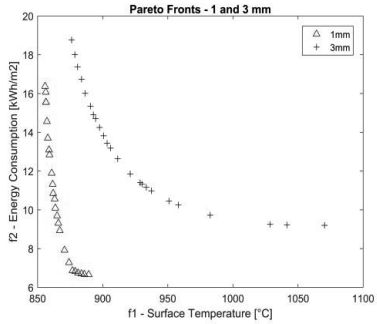


Fig. 17. Pareto fronts with 1 and 3 mm hardness depth

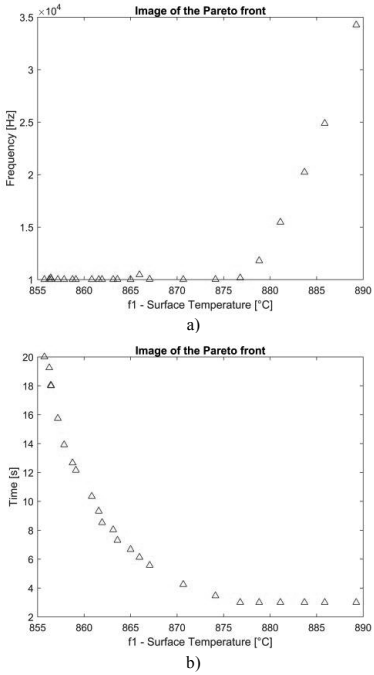


Fig. 18. Frequency assumed by the points of the Pareto front (a) and heating time of the non-dominant solutions (b)

C. Single-objective optimization of the 1D model

As described above, in the Pareto front, the point with the lowest energy consumption is the point with the optimal frequency and minimum time. It is relevant to underline that no constraints on the maximum available power are taken into account. This means that a multi-objective optimization approach is here overabundant. Considering a typical heating time, the optimal frequency could be evaluated considering the energy consumption as a unique objective function. Of course, even in this case, a "double loop" approach is required and for each frequency, the current value must be corrected.

Table 3 shows results of optimal frequency for several hardening thicknesses evaluated at different heating times. In the 1 mm hardening depth case, the energy consumption shows a clear minimum only if the heating time is short (3 s). The heating time partly influences the optimal frequency, especially in the case of 3 mm thickness. The values found are in good agreement with the literature [24] ("Reference" in Table 3).

TABLE 3. OPTIMAL FREQUENCIES FOR DIFFERENT HEATING TIMES AND HARDENING DEPTH

Hardening depth	Heating time	3 s	6 s	12 s	Reference
1 mm		42.4 kHz	not found	not found	60 kHz
3 mm		9.6 kHz	8.5 kHz	6.5 kHz	6.67 kHz
5 mm		3.0 kHz	3.2 kHz	3.0 kHz	2.4 kHz
8 mm		1.04 kHz	1.09 kHz	1.03 kHz	0.94 kHz

D. Trade-off between energy consumption and surface temperature

Once the frequency has been chosen, it was studied how the heating time influences the energy consumption and surface temperature. The heating time ranges from 3 to 20 s. Fig. 19, a shows results based only on the heating stage. Especially with small hardening depths, a heating time reduction could dramatically cut the energy consumption. Results in Fig. 19, b, Fig. 19, c and Fig. 19, d also involve the microstructure calculation.

Fig. 19, b illustrates the energy-temperature trade-off in the case where the minimum content of martensite in the hardening depth is 50 %. It is not possible to reach such result in the case of 8 mm thickness. Fig. 19, c and Fig. 19, d summarize the trends with 65 % and 75 % minimum martensite content respectively. In order to get 5 mm thickness with a minimum martensite content of 65 %, the heating time must be shorter than 6.5 s (Fig. 19, c). With 3 mm hardening depth instead, the heating time cannot be longer than 16 s in order to achieve a 75 % martensite content (Fig. 19, d).

V. CONCLUSIONS

Induction heating processes are widely used in industry. The design of induction heating processes is very complex due to the optimal design of applied frequency, heating time and inductor geometry depending on the desired time-dependent temperature distribution in the work-piece.

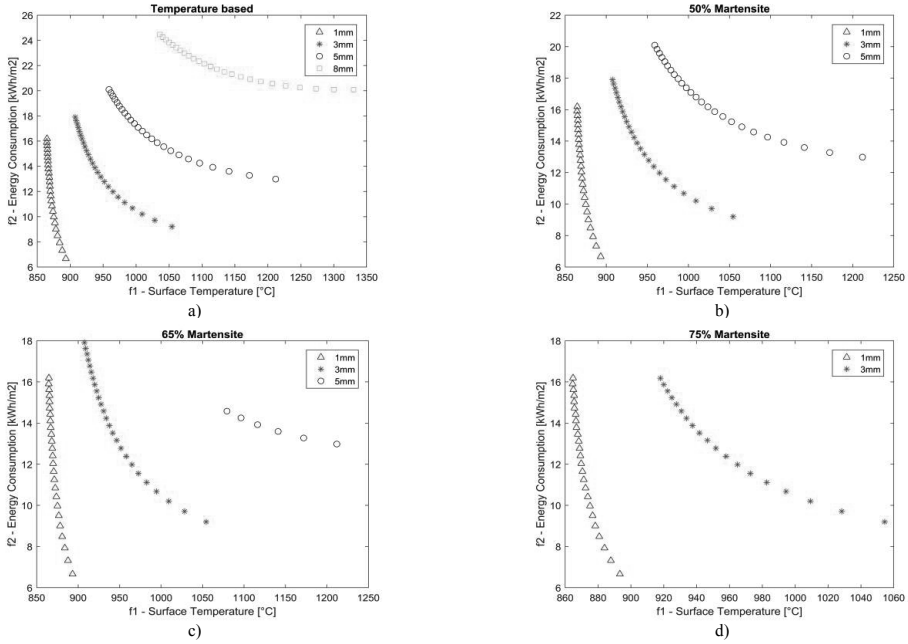


Fig. 19. Temperature based trade-off with 1, 3, 5, 8 mm (a) and microstructure based trade-off for minimum 50 % (b), 65 % (c), 75 % (d) martensite

In the past knowledge-based expert systems combined with experimental verification has been used. But due to the fact that experimental investigations are expensive and time consuming and induction heating processes became more complex, instead of experimental verification numerical simulation was used in order to verify the solution found by expert´s knowledge.

Today new innovative methods are developed and already tested in practise which combine numerical models with mathematical optimization algorithms. In the paper three examples of innovative methods for the design of complex induction heating processes are shown. The first two examples are using a combination of optimization algorithms and numerical simulation, the third example a hierarchical optimization method for very complex induction heating processes.

The examples show that these new methods can be successfully used in practise. In these cases the design process is much faster compared to previous ones and results in much higher quality and accuracy of the heating process.

REFERENCES

[1] A. Nikanorov, G. Nauvertat, H. Schülbe, B. Nacke and A. Mühlbauer, "Investigation, design and optimization of transverse flux induction heaters", Proceedings of the International Seminar on Heating by Internal Sources, Padua, September 12-14 (2001), ISBN 88-86281-64-1, 553-558.

[2] A. Ruhnke, „Systematische Untersuchung der induktiven Querfeld-Banderwärmung", PhD thesis, University Hannover, VDI-Verlag, Düsseldorf (1999).

[3] A. Mühlbauer, A. Muiznieks and H.-J. Lessmann, „Berechnung von dreidimensionalen elektromagnetischen Feldern bei der induktiven Erwärmung", Archiv für Elektrotechnik 77 (1994), 157-168.

[4] G. Nauvertat, A. Nikanorov and A. Mühlbauer, „Optimiertes Design induktiver Querfeld-Erwärmungsanlagen", Elektrowärme Internationa-nal 58 (2000) 1, 22-29.

[5] A. Nikanorov, B. Nacke and T. Zedler, "Design optimization of induction heater in planetary reactors for semiconductor industry", Proceedings of 7th International Scientific Conference of Young Scientists on Electrical Engineering, Electrotechnology, Energy, Novosibirsk, Russia, June 9-12 (2015).

[6] ANSYS 13.0 Documentation. ANSYS, Inc.

[7] D.E. Goldberg, "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning", Library of Congress Cataloging-in-Publication Data (1989).

[8] S. Galunin, M. Zlobina, Yu. Blinov, B. Nacke, A. Nikanorov and H. Schülbe, "Numerical optimization in design of induction heating systems". Proceedings of International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources. Padua, June 22-25 (2004), ISBN 88-86281-92-7, 457-463.

[9] M. Baldan, A. Nikanorov and B. Nacke, "Hierarchical optimization approaches in designing surface induction hardening induction systems", 9th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM 2018, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 424 (2018), 012067.

[10] T. Zedler, „Numerische Modellierung, Analyse und Design von induktiven Systemen für das Randschichthärten komplexer Werkstückgeometrien", PhD thesis, Sierke Verlag (2010).

[11] D. Schlesselmann, „Methoden zur numerischen Berechnung, Analyse und Auslegung induktiver Randschichthärteprozesse unter Berücksichtigung von magnetischen Sättigungseffekten", PhD thesis, PZH Verlag (2016).

[12] Yu. Pleshivtseva, E. Rapoport, B. Nacke, A. Nikanorov, P. Di Barba, M. Forzan, S. Lupi and E. Sieni, "Design concepts of induction mass heating technology based on multiple-criteria optimization", COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 36,2 (2017), 386-400.

[13] R. Naar and F. Bay, "Numerical optimization for induction heat treatment processes", Applied Mathematical Modeling, 37 (2013), 2074-2085.

[14] X. Qin, K. Gao, Z. Zhu, X. Chen and Z. Wang, “Prediction and optimization of phase transformation region after spot continual induction hardening process using response surface model”, JMEPEG, 26 (2017), 4578-4594.

[15] M. Onan, H.I. Unal, K. Baynal and F. Katre, “Optimization of induction hardened AISI 1040 steel by experimental design method and material characterization analysis”, Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, (2012), November 9-15 (2012), Huston, Texas USA.

[16] M.K. Misra, B. Bhattacharya, O. Singh and A. Chatterjee, “Multi response optimization of induction hardening process – a new approach”, Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Control and Optimization if Dynamical Systems, March 13-15 (2014), Kanpur, India.

[17] A. Kohli and H. Singh, “Optimization of processing parameters in induction hardening using response surface methodology”, Sadhana, 36, 2 (2011), 141-152.

[18] M.C. Kayacan and O. Colak, “A fuzzy approach for induction hardening parameters selection”, Material and Design, 25 (2004), 155-161.

[19] U. Lüdtke, „Numerische Simulation gekoppelter Felder in der Elektroprozesstechnick“, Habilitation (2013).

[20] A.D. Demichev, “Surface hardening by induction method”, Politechnika, Leningrad (1991).

[21] D. Schlesselmann, A. Nikanorov, B. Nacke, S. Galunin, M. Schön and Z. Yu, “Numerical calculation and comparison of profiles and martensite microstructure in induction surface hardening processes”, Proceedings of International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources, Padua, Italy, May 21-24 (2013), ISBN 978-88-89884-25-6, 127-134

[22] M. Baldan, T. Steinberg and E. Baake, “Self-adaptive multimethod optimization search applied to a tailored heating forging process”, Proceedings of Modelling for material processing, September 21-22, 2017 (2017), Riga, 191-200.

[23] S. Galunin, “Automatic optimization in designing of induction heaters based on numerical techniques”, Proceedings of XVIII International UIE-Congress, Hannover, June 6-9 (2017), 385-390.

[24] A. Sluhotsky and C. Ryskin, “Inductors for the induction heating”, Energia, Leningrad (1974).

Evolution of Induction Heating and Heat Treating as a Subject of Mathematical Modeling, Optimization and Design

Rudnev V.
Inductoheat Inc.
Madison Heights, Michigan, USA
rudnev@inductoheat.com

***Abstract*—Paper discusses some challenges faced by modern industry when applying electromagnetic induction systems for heating and heat treating metallic materials. Several recently developed innovative electromagnetic thermal technologies are reviewed and expectations for future technological developments are provided. An impact of stringent process specifications on system optimization, mathematical modeling, process control strategies and implementation of some of Industry 4.0 strategies and robotics in induction thermal industry is unveiled here as well.**

Keywords— induction heating, heat treating, surface engineering, metallic materials, electromagnetic induction, modelling, system design

I. INTRODUCTION

Today's metal working and heat treating industry must quickly adjust to a rapidly changing business environment, maximizing process flexibility and energy efficiency, yet still satisfy continuously increasing demands for higher-quality products. There are many ways to heat metallic materials including the use of induction heaters, gas-fired furnaces, fluidized bed furnaces, salt baths, infrared heaters, electric and fuel-fired furnaces, and others. Each method has its own advantages and limitations. Due to a number of factors summarized in [1], thermal processing by means of electromagnetic induction continues to grow at an accelerated rate replacing alternative thermal processes.

Induction thermal processing is a multifaceted, multidimensional phenomenon composed of complex interactions involving electromagnetics, heat transfer, materials science, metallurgy, circuit analysis and power electronics. These complex phenomena are tightly interrelated and highly nonlinear. Some of new technological requirements for the induction heating (IH) have become quite stringent and could not possibly have been satisfied even 5 years ago. Advances in theoretical and practical knowledge of electromagnetic induction, computer modeling capabilities, optimization tools and modern process control and monitoring have helped to overcome technological challenges.

Industrial thermal applications of electromagnetic induction are shown on Fig. 1 and can be divided into five large groups: heat treating, mass heating, special heating applications, induction melting, and induction welding. Due to a space limitation only selected technologies of the first two groups will be discussed here as an illustration of recent technological novelties and innovations.

Heating inductor and induction coil are terms used interchangeably for the electrical apparatus that provides the heating effect in the workpiece positioned in close proximity. An inductor is often simply called by induction professionals as a "coil", but its geometry does not always resemble the classic circular coil shape. As an example, Fig.2 shows an array of a virtually endless variety of geometries of heating inductors needed to accommodate a correspondent endless variety of workpieces (Fig.3). Certain know-how is associated with almost each application applying different coil/part geometry.

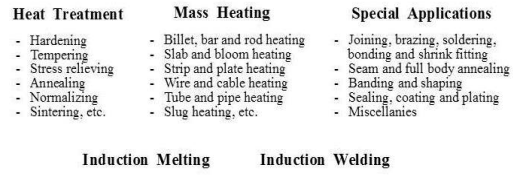


Fig. 1. Industrial thermal applications of electromagnetic induction [1]

Fig. 2. An array of a virtually endless variety of geometries of heating inductors

Fig. 3. An example of virtually endless variety of workpieces heated by electromagnetic induction.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

Heating inductor and induction coil are terms used interchangeably for the electrical apparatus that provides the heating effect in the workpiece positioned in close proximity. An inductor is often simply called by induction professionals as a "coil", but its geometry does not always resemble the classic circular coil shape. As an example, Fig. 2 shows an array of a virtually endless variety of geometries of heating inductors needed to accommodate a correspondent endless variety of workpieces (Fig. 3). Certain know-how is associated with almost each application applying different coil/part geometry.

II. Real-life challenges associated with tempoerature measurement and equipment flexibility

A. Subsurface Overheating

Some practitioners involved in IH prior to hot working (e.g., forging, rolling, upsetting and extrusion) incorrectly assume that with induction bar/billet heating the coldest temperature is always located at the core of the billet and the maximum temperature is always located at its surface. It is also often assumed that overheating does not occur if surface temperature that is measured by a pyrometer does not exceed the maximum permissible level. It is imperative to recognize that under certain but very realistic conditions the temperature maximum may be shifted further away from the surface marking its location somewhere beneath it.

An appearance of billet-sticking (Fig.4,left) and cracking (Fig.4,right) are often associated with subsurface overheating. Fig.4,middle reveals that severe overheating (localized melting) occurred below the surface [2]. A billet-sticking/fusion problem is more likely to occur with conventional power distribution along the induction line when the system runs at a rate slower than the nominal for which it was designed. Since the system puts more energy into the workpiece in the beginning of the heating line, too much energy soaks down into the subsurface area in cases when the line runs slowly. The presence of surface heat losses can reverse a commonly expected radial heat profile.

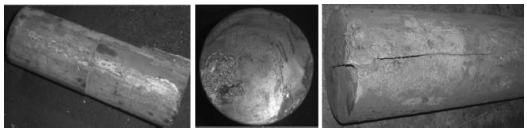


Fig. 4. An appearance of billet-sticking (left image) and cracking (right image) are often associated with subsurface overheating. Localized melting occurred below the surface (middle image) [2]

Case study [2]. An induction system for heating 0.064m diameter carbon steel billets at a production rate of 2500 kg/h is made up of three inline coils connected electrically in series and fed from a 1 kHz inverter. Fig. 5 shows surface-to-core profiles at an exit of the last coil when heating 0.051 m diameter carbon steel billets: Fig. 5, top - at a slower rate and Fig.5,bottom shows heat profiles when processing larger diameter billets at a nominal rate.

Note that in both cases the surface temperature that would be recorded by a pyrometer is the same. Further reduction in the diameter of the billets or production rate could worsen the severity of subsurface overheating that can manifest itself in billets sticking/fusion as well as grain boundary liquation / incipient melting and intergranular cracking. The location and magnitude of the subsurface overheating is a complex function of five major factors: steel grade, frequency, thermal refractory, final temperature, and power distribution along the heating line.

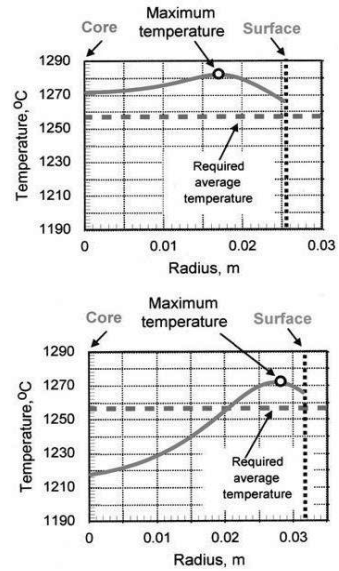


Fig. 5. Surface-to-core temperature profiles for using different process protocols [3]

Since in production environment internal temperatures cannot be easily measured nor even seen, they can only be simulated mathematically. Therefore, accurate temperature monitoring based on a reliable projection of temperature distribution is imperative in designing modern induction heaters.

For a number of years Inductoheat has included temperature profile modeling software iHaz™ in an equipment package of InductoForge™ systems (Fig.6). This software does not just simulate electromagnetic-thermal processes, but it also takes into consideration topology of a particular style of power supply, it's load matching capabilities and bus networking. Incorporation of the advanced computer modeling software into an equipment package represents a measurable step in implementation of Industry 4.0 strategy. The software also helps to generate the power settings for each inverter (in case of in-line systems), which can be downloaded into a PLC recipe and dynamically predicts the internal thermal conditions of heated workpieces.

Fig. 6. For a number of years Inductoheat has included temperature profile modeling software iHaz™ in an equipment package of InductoForge™ systems

B. Process Flexibility

In a modern, vibrant and globally-competitive market place, it is important not just to build a system that provides accurate heating but a system with superior process flexibility that allows quick adjustment to a rapidly changing business environment [3]. Long-term customers may move their production on a moment's notice. The producers must be able to get new business to cover lost business. One way to maximize the flexibility of induction heaters, ensuring the highest heating quality and minimizing energy consumption is applying modular IH technology. There are several variations of the modular design. InductoForge™ modular IH system allows adjusting, not only a power distribution along the heating line but also frequency (500 Hz to 6 kHz range) to optimize heating and allowing intelligent re-distribution of 3-D electromagnetic heat generation and energy consumption of each coil depending upon the production run.

For example, if today's market situation requires heating larger billets (e.g., 115mm dia.) then lower frequency (e.g., 500 Hz) produces a more in-depth heating effect and minimizes heat time, providing an improved radial temperature uniformity. If tomorrow the market situation changes, demanding heating of smaller size billets (e.g. 30mm), then appropriate inverters can be reconfigured to be able to produce higher frequency (e.g. 6 kHz). This results in a more surface-like heating effect, avoiding eddy current cancellation, maximizing heating efficiency and minimizing energy consumption. Since each coil can be controlled individually, the power distribution along an entire heating line can be re-balanced and optimized for particular production run based on software recommendations. If the line is running fast, more power can be shifted to the cold end of the heating line. If the line is running slow, the maximum power can be distributed closer to the hot end of the line increasing the efficiency of the heater and improving thermal conditions [1,3].

As expected, highly specialized application-oriented software utilizing advanced numerical simulation and optimization techniques will be an essential part of the package of induction machinery and … it does not have to be finite element (FEM) codes. In many cases, a combination of different numerical methods (including finite difference, finite volumes, finite elements, edge elements, boundary elements and others) provides substantial advantages over using a single modelling technique. The right choice of computational method and software depends on the application specifics.

III. Commonly Overlooked Metallurgical Subtleties of Induction Heat Treating

Due diligence is needed when deciding which mathematical model to apply and who should apply it. Though crude, the well-known saying "garbage in/garbage out" indicates the importance of having sufficiently accurate physical properties of the materials and have clear understanding of factors that may impact those properties. Otherwise erroneous modelling results may occur. Rapid heating of IH is one of factors that should be taken into consideration. Heat intensities can range from moderate rates (e.g., as low as 2°C–3°C/s for induction tempering) to high heat intensities (e.g., exceeding 800°C/s in gear hardening).

A. Induction Hardening

Induction hardening is commonly described as a process that involves the heating of the entire component or its portion to the austenitizing temperature, holding it, if necessary, and then rapidly cooling it to below the M_S temperature where the martensitic transformation begins. At the same time, there are less frequent cases where instead of forming martensitic structures it might be desirable to form predominately bainitic or pearlitic structures or mixed structures.

In the case of hardening steels, the critical temperatures are often determined by mathematical correlations that indicate an effect of certain additional chemical elements on positioning of critical temperatures. Unfortunately, some practitioners are unaware that those correlations might be misleading in the majority of induction hardening applications because they are valid only for the equilibrium heating conditions. Equilibrium condition simply does not exist in IH. Metallurgically inclined professionals are aware that rapid heating affects the kinetics of austenite formation, shifting it toward higher temperatures in order to create conditions conducive to the required diffusion-based processes and producing an austenitic structure with a sufficiently uniform distribution of carbon. Presence of significant microstructural and chemical segregations in the prior (parent) microstructure could have a measurable impact on a degree of heterogeneity of formed austenite after rapid heating. A number of studies were conducted to quantify the impact of heat intensity rates and prior microstructure on a shift of critical temperatures producing continuous heating phase transformation diagrams (CHT).

However, it is not widely known even among metallurgists that when heat intensities exceed about 20-30°C/sec, instead of the normal order of critical temperatures: A_{c1}, A_{c2}, A_{c3}, rapid heating can switch an order to A_{c2}, A_{c1}, A_{c3}. On the basis of the information provided by Orlich et al. [3,4], there are many steels that exhibit such a behavior. This change might be critical in some IH applications (including hardening, as well as subcritical and intercritical processing) leading to unexpected occurrence of severe eddy current cancellation and drastic efficiency reduction, which could shift a relatively easy job to an almost impossible one [1].

B. Dimensional Stability

There are numerous factors impacting performances of induction hardened components. One of the most important characteristics is associated with a minimization of part's distortion after heat treating. However what is equally important is the repeatability/consistency of the heat treatment results. Due to obvious reasons, there will always be a distortion (to different degree though) after heat treatment (phase transformations associated with heat treatment is one of the reasons for that). A repeatable distortion can be compensated at previous operation steps of the manufacturing chain.

There is a technical terms used in heat treat community - Distortion Engineering or Distortion Management. The term of Distortion Engineering was originally proposed by Professor Peter Mayr from University of Bremen, Germany. Distortion Engineering requires the consideration of all process stages of the manufacturing chain in order to ensure a geometrical accuracy and performance of the final product.

If for whatever reason, it is inevitable to have size and shape distortion of components after heat treatment, then an entire manufacturing chain should be analyzed and the most appropriate manufacturing step(s) should be selected to compensate for a distortion.

C. Induction Tempering of Steels

Tempering (also referred as stress relieving, subcritical annealing, etc.) represents a large group of processes called subcritical heat treatment where modification in engineering properties is achieved without austenization. The tempering process takes place after the steel is hardened, but is no less important step in a component's manufacturing chain. The transformation of austenite to martensite through quenching creates a hard structure. Untempered martensite is often considered too brittle for commercial use, exhibiting low toughness and ductility. The magnitudes and distributions of residual stresses after hardening might not always be desirable and need to be adjusted by applying tempering. Untempered martensite may also be associated with dimensional instability.

Work hardening takes place as a result of a cold work (e.g., rolling or drawing) increasing a number of dislocations (crystal imperfections), changing a dislocation pattern, producing elongated grains and increasing hardness and brittleness. In such applications, subcritical treatment helps to adjust the hardness and grain structure of workpieces; otherwise, it might be too difficult to continue cold working. Transforming elongated grains into predominantly equiaxed grains, restoring toughness and ductility of steel, will improve its conditions before the next cold-work process. Several engineering properties (e.g., yield strength, fracture resistance, the ductile-to-brittle transition temperature, corrosion resistance, and others) can be enhanced.

Conventional longer-time lower-temperature oven/furnace tempering and shorter-time higher-temperature induction tempering are proven technologies and have been widely used in such industries as automotive, off-road, agricultural, etc. Application specifics may call for one process being more preferable over other.

Induction tempering offers a single-part processing. Its in-line capability can be very beneficial in eliminating delayed cracking. Because of economics, individual part traceability, and manufacturing flexibility, induction tempering is becoming more prevalent.

One hurdle to the wider acceptance of induction tempering is that some process engineers are not comfortable with rapid tempering. They feel that an oven or box furnace that heats the entire part and holds it at needed temperature for 1-2 hours is more suitable.

There are numerous studies devoted to a comparison of engineering properties of various steels tempered under different techniques: longer-time lower-temperature furnace tempered versus shorter-time higher-temperature induction tempered. In many cases, it has been reported that furnace tempering and induction tempering reveals very similar improvements in steel's properties.

Although both methods (conventional tempering and induction tempering) are proven technologies, regardless of achieving similar as-tempered hardnesses they can provide the tempered parts with different (*to some degree*) engineering properties (including tensile and yield strength, impact toughness, bending strength, reduction of area, high-load and low-load fatigue strength, etc.). However, it does not mean that one tempering method is always better than another.

Studies conducted by various researchers have suggested that rapid tempering at high temperatures (500 to 700°C range) can improve impact toughness and reduce or even eliminate temper embrittlement (TE) thanks to an increase of nucleation sites and formation of fine dispersed cementite particles.

Recent studies conducted by scientists from Colorado School of Mines [6] suggest that such undesirable phenomenon as tempered martensite embrittlement (TME) that might appear within 200 to 400°C range can be minimized or, in some cases, even eliminated by applying rapid tempering. For example, it has been reported that for SAE 4340 steel rapid tempering can enhance impact toughness by an impressive margin that exceeds 43% at strength level of 1.7 GPa and strength is improved over 0.5 GPa at an impact toughness of 30 J compared to conventional slow tempered steel [6].

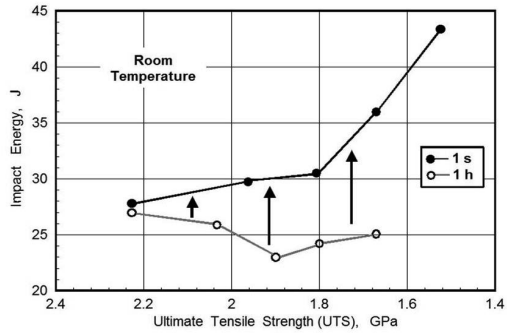


Fig. 7. Comparison of room temperature impact energy (J) for conventional (1 h) and short-time (1 s) tempering conditions as a function of ultimate tensile strength (UTS). Figure was re-created from [6]

Therefore, the effect of tempering on engineering properties is not as well defined and can vary, depending on the specific loading conditions, component's functionality, and the steel grade.

IV. Maximizing Cost-Effectiveness of Induction Hardening

Technical confidence, quality, price, delivery and longevity have traditionally been the five key benchmarks in judging induction hardening equipment by commercial heat treaters [7]. Because of a number of current developments these five are joined by a six one that is equally important – technical flexibility. Under current conditions, heat treat contracts may move from supplier to supplier on an annual basis. Thus, suppliers trying to win these contracts may seek out and source the appropriate equipment to do the processing, purchase the equipment, start the equipment up and complete a Production Part Approval Process (PPAP) to be in production in a short period of time. Because of these market conditions modern

heat treat equipment must allow easy re-tooling and re-programming to process different parts.

Today, the automotive industry is implementing light-weight initiatives in vehicle design to meet more stringent federal Corporate Average Fuel Economy regulations. Similar changes are occurring in off-road, aerospace, agricultural and other industries. Every metallic part in the engine, drivetrain, frame, and safety and exhaust systems is being revised to minimize weight and optimize critical engineering properties as well as residual stress distribution. Designers reduce cross sections, drill lightening holes and use custom shapes and alloys to accomplish these goals [7]. These new challenges push heat treaters to demand innovations from induction equipment suppliers to deliver products that can perform.

Geometrical irregularities and discontinuities distort the magnetic field generated by an inductor, potentially causing local temperature variations altering metallurgical quality and may produce excessive distortion. For example, scan hardening stepped shafts with diameter changes of appreciable size, variable wall thickness hollow sections and sharp shoulders can produce unwanted hardness pattern deviations and metallurgically undesirable structures. Additionally, it is often specified for multifunctional complex geometry components to have significantly different hardness case depths along component's length. This would naturally call for a corresponding variation of heat generation depth during scanning. Frequency is the most powerful parameter that directly affects the depth of heat generation. Unfortunately, the great majority of commercially available power sources for IH are designed to deliver a certain frequency that cannot be instantly and deliberately changed during the scan hardening.

In many cases and depending upon component's topology and hardening requirements, the available frequency may be considerably higher or lower (*in folds*) than its optimal value for a particular portion of the workpiece. If the available frequency is noticeably higher than desirable, it produces a smaller-than-ideal depth of the heat generation that may not be sufficient for proper austenization of the subsurface region at required hardness depth. Therefore, additional time is needed to allow the thermal conduction to provide needed heat flow from the workpiece's surface towards required depth. This is commonly accomplished by a reduction of both scan rate and power density (otherwise the surface can be overheated). Unfortunately, this adds unnecessary cycle time and can lead to undesirable metallurgical results. In contrast, if the available frequency is lower than optimal frequency, an exceedingly deep austenized layer and excessive distortion may be produced. In order to reduce the negative impact of using lower than desirable frequency, the majority of induction heat treaters are trying to suppress a thermal conduction by increasing both scan rate and power density [1,7].

While process protocol modifications to suppress or promote thermal conduction can help reduce the negative impact of using other-than-optimal frequencies, they often cannot eliminate it and can also negatively affect the metallurgical quality, stress distribution (both: transient and residual) and distortion characteristics. Taking into consideration, a topology of modern components, a single optimal frequency rarely exists to accommodate a wide variety of part geometries, which is why conventional scan hardening with fixed frequency must always compromise between achieving metallurgical quality, production rate and process capability.

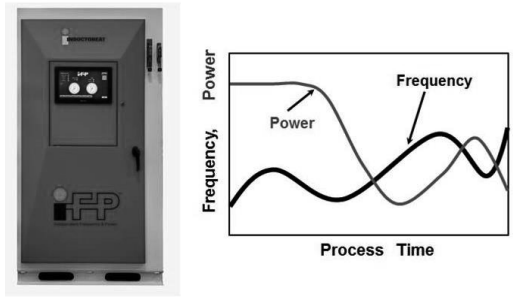


Fig. 8. A new generation of Statipower® IFP™ inverters (left image) developed by Inductoheat Inc. allows independently and instantly (like a CNC machine) to control frequency and power in a pre-programmed manner during heating cycle (right image) optimizing electromagnetic, thermal and metallurgical conditions.

Obviously, in order to address geometrical subtleties of heat treated parts in an optimal manner, it would be advantageous to apply various combinations of frequency and power at various process stages. Unfortunately, the great majority of available inverters do not have such capability. A new generation of Statipower® IFP™ inverters developed by Inductoheat (Fig.8,left) eliminates this limitation allowing independently and instantly (like a CNC machine) to control frequency and power in a pre-programmed manner during heating cycle (Fig.8,right) optimizing electromagnetic, thermal and metallurgical conditions. This technology has been on the '*wish list*' of commercial heat treaters for some time. Statipower®-IFP™ is a true digital microprocessor-based control inverter technology specifically designed for IH needs and allowing instant and independent adjustment of frequency (within 5–60 kHz range).

REFERENCES

[1] V. Rudnev, D. Loveless, and R. Cook, Handbook of Induction Heating, 2nd ed., CRC Press, 2017, 750p.

[2] V. Rudnev, "The day after tomorrow – the future of induction heating", a keynote lecture presented at XVIII International UIE-Congress "Electrotechnologies for Material Processing" in Hannover, Germany, June, 2017.

[3] G. Doyon, D. Brown, V. Rudnev, Ch. Van Tyne, "Ensuring quality of inductively heated billets", Forge, April, 2010, pp.14-17.

[4] J. Orlich, A. Rose, "Atlas zur Warmebehandlung der Stahle", Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, Germany, (Band 3), 1973.

[5] J. Orlich, A. Rose, "Atlas zur Warmebehandlung der Stahle", Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, Germany, (Band 4), 1976.

[6] V.K.Judge, J.G.Speer, K.D.Clarke, K.O.Findley, A.J.Clarke, Rapid Thermal Processing to Enhance Steel Toughness, *Scientific Reports*, Vol.8, n.1, January 11, 2018.

[7] G. Doyon, V. Rudnev, C. Russell, J. Maher, "Revolution-not evolution-necessary to advance induction heat treating", Advanced Materials & Processes, ASM Int'l, Sept., 2017, p.72-80.

Проблемы и конструктивные методы прикладной теории управления техническими системами с распределенными параметрами

Рапопорт Э.Я.
Самарский государственный технический университет, Институт проблем управления сложными системами РАН
г. Самара, Россия
edgar.rapoport@mail.ru

Плешивцева Ю.Э.
Самарский государственный технический университет, Институт проблем управления сложными системами РАН
г. Самара, Россия
yulia_pl@mail.ru

***Abstract* — The approaches and methods for further development of applied theory of systems with distributed parameters are suggested to solve problems of open-loop controllability, construction of program optimization, a wide range of vector problems of optimal control and analytical designing of automatic regulators.**

Ключевые слова — система с распределенными параметрами, управляемость, оптимальное управление, векторная оптимизация, альтернансный метод, управление с обратной связью.

Введение

Среди сложных систем особое место занимают бесконечномерные системы с распределенными параметрами (СРП), отличающиеся пространственно-временным распределением управляемых величин и характеризующиеся огромным числом приложений в самых различных предметных областях. В настоящее время, начиная с основополагающих работ А.Г. Бутковского, получен целый ряд фундаментальных результатов (А.Г. Бутковский, Г.Л. Дегтярев, А.И. Егоров, Ю.В. Егоров, В.А. Коваль, Ж.-Л. Лионс, К.А. Лурье, И.М. Першин, В.И. Плотников, Л.М. Пустыльников, Т.К. Сиразетдинов, А.В. Фурсиков, Ф.Л. Черноусько, В.А. Якубович и др.), совокупность которых можно охарактеризовать как создание и существенное развитие основ теории управления СРП.

В то же время, чрезвычайно широкий спектр актуальных прикладных задач управления СРП, отличающихся друг от друга целым рядом играющих принципиальную роль специфических особенностей, как правило, не может быть решен «прямым» применением обобщенного формализма известных теоретических схем, вынужденно абстрагирующихся от подобного рода дополнительных факторов. В целях разработки конструктивных, приемлемых в инженерной практике решений таких задач оказывается необходимым, во-первых, предельно допустимое в рамках требуемой точности упрощение модельных описаний СРП и, во-вторых, существенное использование дополнительной информации о базовых закономерностях предметной области. В настоящей работе предлагаются некоторые возможные пути развития в указанном направлении прикладной теории управления СРП.

Гранты РФФИ (проекты №18-08-00048, №19-08-00232)

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

1. Программная управляемость СРП

Фундаментальная проблема управляемости, без решения которой лишается смысла сама постановка задачи управления, оказывается весьма сложной применительно к СРП в условиях оценки состояния распределенной системы в бесконечномерном фазовом пространстве. При этом большое значение приобретает мало исследованная задача программной управляемости (ЗПУ), в которой необходимо обеспечить перевод объекта в требуемое конечное положение на заданном множестве программных траекторий в пространстве состояний СРП, реализующих требуемую динамику движения объекта к заданному целевому множеству.

Применительно к моделям СРП, описываемым линейными многомерными уравнениями в частных производных второго порядка параболического типа, ЗПУ сводится к определению условий разрешимости описывающих обобщенные решения исследуемых краевых задач интегральных уравнений Фредгольма первого рода в изображениях Лапласа относительно искомых внутренних $\tilde{u}(X,p), X \in V$ или граничных $\tilde{g}(X,p), X \in S$ управляющих воздействий (УВ) для заданных программ изменения управляемой величины $\tilde{Q}(X,p),\ X \in V$ [1]:

$$\begin{aligned} \tilde{Q}(X,p) &= \int_V \tilde{G}(X,Y,p)\tilde{u}(Y,p)\,dV,\ X,Y \in V; \\ \tilde{Q}(X,p) &= \int_S \tilde{G}(X,Y,p)\ \tilde{g}(Y,p)\,dS,\ X \in V,\ Y \in S. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь $\tilde{G}(X,Y,p)$ – изображение функции Грина рассматриваемой начально-краевой задачи; V – заданная односвязная область изменения пространственных аргументов $\tilde{Q}(X,p)$ с кусочно-гладкой границей S и p – комплексная переменная преобразования Лапласа.

Точное решение (1) представляется в форме его разложения в ряд по собственным функциям модели СРП, если сумма квадратов коэффициентов этого ряда, непосредственно определяемых требуемым поведением модальных составляющих $\tilde{Q}(X,p)$, также образует сходящийся ряд [1]. Последнее условие представляет собой

необходимое и достаточное условие разрешимости ЗПУ для любых интегрируемых с квадратом на V функций $\tilde{Q}(X,p)$, непосредственно проверяемое на первом этапе по решению частной задачи управляемости по асимптотически устойчивому стационарному конечному состоянию объекта. Программная управляемость на всем множестве заданных траекторий обеспечивается для объектов, управляемых по стационарному состоянию, в условиях малостеснительных ограничений, следующих из известных теорем сравнения положительных рядов [1].

Известное условие разрешимости уравнений (1) только при совпадении областей определения пространственных аргументов X и Y выхода объекта и управляющих воздействий приводит к принципиальной разнице в ЗПУ с внутренними и граничными УВ, первая из которых может быть решена для $\tilde{Q}(X,p)$, заданных во всей области $V \ni X$, а вторая – только в некоторых ее сечениях, подобных S, при правильной форме V [1].

Применительно к типичному в приложениях случаю заранее фиксируемого условиями технической реализации представления УВ в форме взвешенной суммы заданных функций пространственных переменных ЗПУ оказывается разрешимой только для заданных траекторий в отдельных точках $X_i \in V, i = \overline{1,r}$, число r которых равно числу искомых сосредоточенных УВ, выступающих в роли весовых коэффициентов указанной суммы [1]. Если при этом управляемая величина с допустимой погрешностью описывается с учетом только r ее модальных составляющих, то получаемое решение ЗПУ обеспечивает программную управляемость по заданным траекториям во всей области V с погрешностью, которая уменьшается с возрастанием r.

Предлагаемый подход распространяется на ЗПУ взаимосвязанных физически неоднородных СРП, которые приводятся к определению необходимых и достаточных условий разрешимости интегральных уравнений вида (1), составляемых в данном случае относительно заданных программных траекторий для каждого из объектов, корректируемых взаимосвязями с остальными объектами [2].

Полученные результаты апробированы применительно к представляющим самостоятельный интерес ЗПУ процессов нестационарной теплопроводности [1,2]. Показано, что в условиях малостеснительных ограничений подобные объекты оказываются управляемыми или неуправляемыми (по любым заданным траекториям $Q(X,t)$ во всей области V или в пределах заданных геометрически подобных S сечений V соответственно при управлениях $u(X,t),\ X \in V$ или $g(X,t),\ X \in S$), если граничные условия заданных траекторий согласуются или не согласуются с граничными условиями начально-краевой задачи, моделирующей поведение СРП.

2. Краевые задачи оптимального программного управления

Разработка конструктивных методов решения краевых задач оптимального управления (ЗОУ) по заданному критерию качества до настоящего времени остается одной из основных проблем теории СРП. Ее решение для стандартных двухточечных схем с фиксированными концами траекторий движения системы либо вообще не существует из-за неуправляемости объекта относительно требуемого конечного состояния СРП (в том числе, по типичной причине его несогласованности с граничными условиями модельных описаний объекта), либо приводит к технически нереализуемым алгоритмам управления, а переход к дискретным аппроксимациям ведет к существенным погрешностям по величине функционала качества и потерям физических особенностей СРП [3,4].

В такой ситуации конструктивный подход к ЗОУ СРП состоит в переходе к задаче управления при заданном целевом множестве, отвечающем допустимым значениям ε отклонений управляемой величины $Q(X,t^*)$ в конечный момент t^* процесса управления от требуемого конечного состояния $Q_c(X)$, оцениваемых применительно к представляющим наибольший интерес для приложений ситуациям в равномерной метрике в пределах области V изменения пространственных аргументов X [3-7]:

$$\Phi(t^*) = \max_{X \in V} \left| Q(X,t^*) - Q_c(X) \right| \le \varepsilon. \qquad (2)$$

Методы алгоритмически точного решения подобного рода краевых задач оптимального управления в классической теории СРП отсутствуют.

Стандартные процедуры принципа максимума Понтрягина, распространяемого на бесконечномерные модели модального описания СРП, в целом ряде ситуаций непосредственно определяют при такой постановке ЗОУ СРП параметрическое представление искомых пространственно-временных программных управлений, конечного состояния $Q(X,t^*)$ и критерия оптимальности I с точностью до вектора $\Delta^{(N)} = (\Delta_i^{(N)}),\ i = \overline{1,N}$, определенным образом упорядоченной совокупности параметров $\Delta_i^{(N)}$. Число N этих параметров находится по установленным правилам в зависимости от величины ε в (2), которые в большинстве случаев сводятся к простому соотношению [3-7]:

$$\begin{aligned} &N = \upsilon, \text{ если } \varepsilon_{\min}^{(\upsilon)} \le \varepsilon < \varepsilon_{\min}^{(\upsilon-1)}; \\ &\varepsilon_{\min}^{(\upsilon)} = \min_{\Delta^{(\upsilon)}} \left[\max_{X \in V} \left| Q(X,\Delta^{(\upsilon)}) - Q_c(X) \right| \right]. \end{aligned} \qquad (3)$$

В более общем случае в роли параметрических характеристик может быть использован набор $\psi_k^{(N)} = (\psi_{ki}^{(N)}),\ i = \overline{1,N}$, финишных значений N первых переменных бесконечной системы сопряженных уравнений принципа максимума при равных нулю конечных значениях остальных ее компонент («ψ - параметризация») с последующим построением конструктивной процедуры отображения $\psi_k^{(N)}$ на множество $\Delta^{(N)}$ [6,7].

В итоге осуществляется точная (в рамках рассматриваемых моделей СРП) редукция исходной ЗОУ СРП к специальной задаче полубесконечной оптимизации (ЗПО) на экстремум функции $I(\Delta^{(N)})$ конечного числа

переменных $\Delta^{(N)}$ с бесконечным числом ограничений на $Q(X,\Delta^{(N)})$ в каждой точке $X \in V$ согласно (2), эквивалентных одному ограничению на функцию максимума в (2) [3-7]:

$$I(\Delta^{(N)}) \to \min_{\Delta^{(N)}};$$
$$\Phi(\Delta^{(N)}) = \max_{X \in V} \left| Q(X,\Delta^{(N)}) - Q_c(X) \right| \le \varepsilon. \quad (4)$$

Решение $\overline{\Delta}^{(N)}$ ЗПО (4), однозначно определяющее искомое оптимальное управление, может быть найдено по конструктивной технологии альтернансного метода, распространяющего на рассматриваемые задачи оптимизации известные результаты теории нелинейных чебышевских приближений в условиях некоторых малостеснительных для прикладных задач допущений и существенно использующего дополнительную информацию о базовых закономерностях предметной области [3-8]. Метод базируется на специальных альтернансных свойствах $\overline{\Delta}^{(N)}$, согласно которым предельно допустимая величина $\Phi(\overline{\Delta}^{(N)})$ в (4), равная ε, достигается в некоторых точках $X_j^0 \in V$, $j = \overline{1,R}$, число R которых оказывается равным числу всех искомых параметров оптимального процесса, включая кроме $\overline{\Delta}^{(N)}$ априори неизвестную величину минимакса $\varepsilon_{\min}^{(N)}$ в (3), если заданное в (4) значение $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(N)}$:

$$R = \begin{cases} N, \text{ если } \varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(N)}; \\ N+1, \text{ если } \varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(N)}. \end{cases} \quad (5)$$

При наличии диктуемой закономерностями предметной области дополнительной информации о характере зависимости $Q(X,\overline{\Delta}^{(N)})$ от $X \in V$, позволяющей идентифицировать точки $X_j^0 \in V$, альтернансные свойства $\overline{\Delta}^{(N)}$ приводят в условиях (5) к замкнутой относительно всех неизвестных системе уравнений

$$Q(X_j^0,\overline{\Delta}^{(N)}) - Q_c(X_j^0) = \pm\varepsilon, \; j = \overline{1,R} \quad (6)$$

с однозначно определяемым знаком ε в (6) для каждой из точек X_j^0, разрешаемой известными численными методами.

Подобная методология и вычислительная технология альтернансного метода распространяется на широкий круг модельных представлений СРП, включая их численное моделирование [3,8].

Альтернансный метод распространен на типичные для приложений ЗОУ СРП в условиях интервальной неопределенности параметрических характеристик объекта [3,5,8,9]. В соответствии со стратегией управления по принципу наилучшего гарантированного результата в данном случае $I(\Delta^{(N)})$ и $\Phi(\Delta^{(N)})$ в (4) определяются в форме функций максимума на множестве допустимых значений неопределенных факторов. Сказанное приводит к более сложным минимаксным ЗПО с континуумом ограничений, рассматриваемых на расширенном множестве элементов, включающем кроме пространственных переменных все допустимые значения параметрических характеристик объекта [3,5,8,9]. Модифицированный вариант альтернансного метода решения подобных ЗПО с соответствующим обобщением базовых соотношений (3), (5), (6) предложен в [5].

Альтернансный метод решения ЗОУ СРП широко апробирован на целом ряде задач управления объектами технологической теплофизики, в том числе, применительно к ответственным электротехнологическим установкам и производственным комплексам обработки металла давлением для линейных и нелинейных, аналитических и цифровых моделей СРП в усложненных постановках с учетом характерных фазовых ограничений при выборе в качестве критериев оптимальности базовых технико-экономических показателей применительно к различным типам управляющих воздействий и режимам работы объектов [3-5,8,10].

3. Векторные задачи параметрической оптимизации

Целый ряд прикладных ЗОУ СРП, формулируемых с общих позиций системного подхода, приводит к их постановке в усложненных условиях векторной формы предъявляемых требований к критериям оптимальности, учитываемым ограничениям и выбору управляющих воздействий.

A. Модели и методы многокритериальной оптимизации СРП

Характерные оценки эффективности функционирования сложных систем по совокупности различных частных показателей качества I_p, $p = \overline{1,\sigma}$, $\sigma > 1$ приводят к актуальной многокритериальной векторной задаче (МЗУ) выбора возможных альтернатив управляющих воздействий $u(t) \in [u_{\min}, u_{\max}]$ в условиях неполной определенности целей процесса управления.

Традиционная технология решения МЗУ на множестве Парето существенно упрощается путем перехода с помощью соответствующих процедур нормирования к относительным равнозначным оценкам λ_p частных критериев эффективности

$$\lambda_p(u) = \frac{I_p(u) - I_p^*}{I_p^0 - I_p^*}, \; 0 \le \lambda_p(u) \le 1;$$
$$I_p(u) = \int_0^{t^*} f_{0p}(\overline{Q},u)\,dt \to \min_u \quad (7)$$

при известных оптимальном $\left(I_p^*\right)$ и максимальном $\left(I_p^0\right)$ значениях, определяемых в условиях ограничения вида (2) при замене ε на соответствующее частной задаче значение ε_p.

Подобный переход позволяет осуществить процедуру точной редукции исходной МЗУ к однокритериальной вариационной задаче с дополнительными ограничениями на значения λ_p, решение которой $u^*(t)$ заведомо является парето-эффективным решением МЗУ [11,12].

При описании СРП в пространстве его модальных составляющих $\bar{Q} = (Q_n)$, $n = 1, 2, ...,$ расширяемом вводом новых фазовых переменных

$$\frac{dz_p}{dt} = f_{0p};\ z_p(t^*) = I_p(u);\ p = \overline{1,\sigma}, \tag{8}$$

такая задача в условиях (2) приводится к виду [11, 12]:

$$\begin{aligned} &I = \frac{1}{t^*}\int_0^{t^*} \lambda^0 dt = \lambda^0 = \text{const} \to \min_{u\in\Omega};\\ &\frac{z_p(t^*) - I_p^*}{I_p^0 - I_p^*} \le \lambda^0;\\ &\Omega = \left\{u(t) : u_{\min} \le u(t) \le u_{\max}; \Phi(t^*) \le \varepsilon\right\}. \end{aligned} \tag{9}$$

Последующая параметризация $u^*(t)$ с помощью стандартных процедур принципа максимума приводит подобно (4) к задаче полубесконечной оптимизации, усложняемой по сравнению с (4) ограничениями на λ_p в (9) [11,12]:

$$\begin{aligned} &I = \lambda^0(\Delta^{(N)}) \to \min_{\Delta^{(N)}};\\ &\Phi(\Delta^{(N)}) \le \varepsilon;\ \varepsilon \le \varepsilon_p,\\ &\lambda_p(\Delta^{(N)}) = \frac{I_p(\Delta^{(N)}) - I_p^*}{I_p^0 - I_p^*} \le \lambda^0,\ p = \overline{1,\sigma}. \end{aligned} \tag{10}$$

Дальнейший переход к ее эквивалентной минимаксной форме без этих ограничений

$$I_1 = \max_{p\in\{1,\sigma\}} \lambda_p(\Delta^{(N)}) \to \min_{\Delta^{(N)}},\ \Phi(\Delta^{(N)}) \le \varepsilon \tag{11}$$

сводит задачу (10) к совокупности типовых ЗПО

$$I_{2p_1} = \lambda_{p_1}(\Delta^{(N)}) \to \min_{\Delta^{(N)}};\ \Phi(\Delta^{(N)}) \le \varepsilon,\ p_1 = \overline{1,\sigma} \tag{12}$$

для всех $p_1 = \overline{1,\sigma}$, на решениях которых $\Delta^{(N)} = \Delta^{[p_1]}$ вычисляются $\lambda_p(\Delta^{[p_1]}) \forall p = \overline{1,\sigma}$. За решение $\bar{\Delta}^{(N)}$ задачи (10) принимается $\Delta^{[p_1^*]}$ при таких $p_1 = p_1^*$, для которых выполняются неравенства $\lambda_p(\Delta^{[p_1^*]}) \le \lambda_{p_1^*}(\Delta^{[p_1^*]}) \forall p = \overline{1,\sigma}$ [12].

В наиболее употребительном в приложениях частном случае с выбором в качестве критерия оптимальности максимальной точности приближения $Q(X, t^*)$ к Q_c задача (10) существенно упрощается и непосредственно сводится к типовой форме [11,12]

$$\Phi(\Delta^{(N)}) \to \min_{\Delta^{(N)}}. \tag{13}$$

Решения ЗПО (12), (13) и частных задач оптимизации проводятся по схеме альтернансного метода.

Предлагаемая технология решения МЗУ СРП обобщается на задачи оптимизации с интервальными неопределенностями параметрических характеристик объекта аналогично подобной задаче однокритериального управления.

Полученные результаты апробированы на представляющем самостоятельный интерес примере МЗУ ответственным процессом предварительного индукционного нагрева перед операциями горячего прессования металлических полуфабрикатов в производственных комплексах «печь – пресс» [11,12].

B. Задачи параметрической оптимизации СРП с комбинированными ограничениями на конечное состояние объекта управления

Наряду с детерминированными однокритериальными ЗОУ СРП, рассматриваемыми в условиях (2), (4), самостоятельный интерес представляет их расширенная постановка с одновременно предъявляемыми различными ограничениями вида (2), (4).

$$\begin{aligned} &\Phi_k(\Delta^{(N)}) = \max_{x\in V}\left|F_k(Q(X,\Delta^{(N)})) - Q_{ck}(X)\right| \le \varepsilon_k,\\ &k = \overline{1,w},\ w > 1, \end{aligned} \tag{14}$$

где $F_k(Q(X,\Delta^{(N)}))$ – заданные функции своих аргументов и $F_1(Q(X,\Delta^{(N)})) = Q(X,\Delta^{(N)})$ при $k = 1$.

В частности, подобные задачи возникают применительно к техническим объектам, функционирующим в составе технологических комплексов, взаимосвязи между элементами которых диктуют необходимость перехода к векторному варианту учета ограничений на конечное состояние СРП [13].

Дальнейший переход к стандартной форме ЗПО с одним эквивалентным ограничением обеспечивается линейной сверткой заданных в (14) и нормируемых при различающихся допусках ε_k ограничений с весовыми коэффициентами $a_k \in A_w = \{a_k \ge 0, \sum_{k=1}^{w} a_k = 1\}$, играющими роль искомых переменных в задаче линейного программирования на максимум этой свертки [13]. В итоге исходная ЗПО приводится в отличие от (4) к следующему виду:

$$I(\Delta^{(N)}) \to \min_{\Delta^{(N)}};$$
$$\Phi_{\Sigma}(\Delta^{(N)}) = \tag{15}$$
$$= \max_{y \in V_1} \sum_{k=1}^{w} a_k \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_k} \left| F_k(Q(X, \Delta^{(N)})) - Q_{ck}(X) \le \varepsilon_0 \right|$$

для любого из выбираемых значений $\varepsilon_0 = \varepsilon_j$, $j \in \{\overline{1,w}\}$. Здесь $\Phi_{\Sigma}(\Delta^{(N)})$ определяется на расширенном по сравнению с (4) множестве $V_1 = V \times A_w$ элементов $y = (X, \bar{a})$, $\bar{a} = (a_k)$.

Разработан конструктивный вычислительный алгоритм решения задачи (15) по схеме альтернансного метода в усложненных условиях возможности выполнения альтернансных свойств $\bar{\Delta}^{(N)}$ в различных точках $X_j^0 \in V$ на различных активных ограничениях в (14), опознаваемых среди их общего числа w по ходу предлагаемой вычислительной процедуры [13].

Полученные результаты апробированы на примере ответственной технологии предварительного нагрева металлических полуфабрикатов перед последующими операциями обработки давлением с учетом требуемых конечных температурных кондиций нагреваемых изделий как по условиям заданной точности их достижения, так и по условиям минимизации энергопотребления на последующей стадии пластического деформирования [13].

C. Параметрическая оптимизация в задачах многоканального управления СРП

Целый ряд прикладных ЗОУ СРП, прежде всего ЗОУ взаимосвязанными ρ объектами с распределенными параметрами, формулируется в условиях многоканальных управляющих воздействий (УВ) применительно к построению многомерных и многосвязных систем управления. Подобные ЗОУ редуцируются после параметризации УВ к ЗПО вида (4) усложненной структуры [14]:

$$I(\Delta^{(N)}) \to \min_{\Delta^{(N)}};\ \Phi_m(\Delta^{(N)}) =$$
$$= \max_{X \in V} \left| Q_m(X_m \Delta^{(N)}) - Q_{cm}(X_m) \right| \le \varepsilon_m,\ \ m = \overline{1,\rho};$$
$$\Delta^{(N)} = (\Delta_l^{(m)}),\ m = \overline{1,\rho},\ l = \overline{1,l_m};\ \Delta_l^{(m)} = (\Delta_{lq}^{(m)}), \tag{16}$$
$$q = \overline{1,N_{lm}};\ N = \sum_{m=1}^{\rho} \sum_{l=1}^{l_m} N_{lm},$$

где l_m – заданное число компонент векторного УВ, каждая из которых определяется с точностью до выбора N_{lm} параметров $\Delta_{lq}^{(m)}$.

Задача (16) может быть решена по модифицированной схеме альтернансного метода, отличающейся от задачи одноканального управления увеличенной размерностью $\bar{\Delta}^{(N)}$; специфическим требованием одинаковой длительности процесса управления для всех составляющих векторного УВ; многовариантными возможностями выбора чисел N и N_{lm} в (16); усложненным характером пространственной конфигурации конечных состояний $Q_m(X_m, \bar{\Delta}^{(N)})$, $m = \overline{1,\rho}$, и как следствие – процедурами детализации альтернансных свойств $\bar{\Delta}^{(N)}$ для различных возможных альтернатив [14].

4. Управление с обратными связями в СРП

Центральная задача синтеза автоматических регуляторов является наиболее сложной проблемой теории СРП, известные решения которой найдены только для некоторых частных случаев (Г.Л. Дегтярев, В.А. Коваль, Т.К. Сиразетдинов, И.М. Першин, О.Ю. Торгашова и др.). Для ряда прикладных задач конструктивные методы синтеза могут быть получены на основе структурной теории распределенных систем [15]. В настоящей работе предлагаются некоторые другие подходы к решению более широкого круга задач управления с обратными связями в СРП.

A. Аналитическое конструирование агрегированных регуляторов в СРП

Эффективный подход к достаточно широкому кругу задач синтеза в СРП базируется на идее перехода к управлению агрегированными макропеременными $\gamma(\bar{Q}, \bar{\beta})$, формируемыми в виде некоторой функции вектора $\bar{Q} = (Q_n), n = \overline{1,N_1}$, учитываемого числа N_1 модальных составляющих управляемой величины и коэффициентов передачи $\bar{\beta} = (\beta_n),\ n = \overline{1,N_1}$, обратных связей (А.А. Колесников). Проблема сводится к построению замкнутой системы, реализующей двухэтапную организацию алгоритма управления, минимизирующего сопровождающий квадратичный критерий качества – сначала асимптотически устойчивое движение объекта из начального состояния к притягивающему многообразию $\gamma(\bar{Q}, \bar{\beta}) = 0$, а затем – вдоль этого многообразия к положению равновесия в начале координат фазового пространства $Q_n = 0,\ n = \overline{1,N_1}$, где требуемое качество процесса управления обеспечивается соответствующим выбором $\bar{\beta}$.

Указанная задача синтеза может быть решена для достаточно широкого круга моделей СРП (в том числе нелинейных) для модальных переменных приведенной линейной системы, характеризуемой собственными числами μ_n^2 [16]:

$$\frac{dQ_n}{dt} = -\mu_n^2 Q_n + f_n(\bar{Q}) + b_n u(t),\ n = \overline{1,N_1};$$
$$u(t) \in [u_{\min}, u_{\max}] \tag{17}$$

с заданными функциями f_n, известными коэффициентами b_n и ограниченным сосредоточенным управляющим воздействием $u(t)$.

Описание поведения макропеременной дифференциальным уравнением первого порядка

$$T\frac{d\gamma}{dt}+\gamma=0 \qquad (18)$$

обеспечивает ее принадлежность к подсемейству устойчивых экстремалей, минимизирующих квадратичный функционал качества

$$I=\int_0^{\infty}\left[\gamma^2+T^2\left(\frac{d\gamma}{dt}\right)^2\right]dt. \qquad (19)$$

Использование специальных форм нелинейных макропеременных [16]

$$\gamma\left(\bar{Q},\bar{\beta}\right)=\mathrm{th}\left[L_1+L_2\mathrm{th}\left(kQ_0\right)+\sum_{n=1}^{N_1}\beta_nQ_n\right];$$
$$L_1=\frac{1}{2}\left(u_{\max}+u_{\min}\right);\ L_2=\frac{1}{2}\left(u_{\max}-u_{\min}\right); \qquad (20)$$
$$\frac{dQ_0}{dt}=\frac{1}{T_0}u_0\left(t\right),\ k=\mathrm{const},\ u\left(t\right)=L_1+L_2\mathrm{th}\left(kQ_0\right)$$

во-первых, обеспечивает субоптимальный по переменному в фазовом пространстве критерию оптимальности характер процессов управления в СРП, удовлетворяя типичным требованиям достижения максимального быстродействия или минимизации типичного квадратичного критерия качества соответственно на больших или малых расстояниях от притягивающего многообразия; во-вторых, приводит к формированию линейных алгоритмов пропорционального регулирования при движении к положению равновесия вдоль этого многообразия:

$$u\left(t\right)=-\sum_{n=1}^{N_1}\beta_nQ_n, \qquad (21)$$

и в-третьих, учитывает ограничения на управляющее воздействие $u\left(t\right)$ [16].

Подстановка вычисленных на модели (17) полных производных $\frac{d\gamma}{dt}$ в уравнение (18) приводит к функциональному уравнению, непосредственно разрешаемому относительно искомых алгоритмов «условного» управления $u_0\left(t\right)$ в (20) на входе интегратора, дополняющего структуру объекта [16]:

$$u\left(\bar{Q},\bar{Q}_0\right)=-T_0\frac{\mathrm{ch}^2\left(kQ_0\right)}{kL_2}\left\{\frac{1}{2T}\mathrm{sh}\left(2L_1+\right.\right.$$
$$+2L_2\mathrm{th}\left(kQ_0\right)+\left.\sum_{n=1}^{N_1}\beta_nQ_n\right)+ \qquad (22)$$
$$\left.+\sum_{n=1}^{N_1}\beta_n\left[-\mu_n^2Q_n+f_n\left(\bar{Q}\right)+b_n\left(L_1+L_2\mathrm{th}\left(kQ_0\right)\right)\right]\right\}.$$

Предлагаемый выбор макропеременных во многих случаях приводит к существенному упрощению структуры агрегированных регуляторов, с малой погрешностью сводимых к типовым алгоритмам пропорционального (согласно (21)) с ограничениями регулирования переменных состояния СРП с коэффициентами передачи линейных обратных связей, обеспечивающих асимптотическую устойчивость положения равновесия нелинейной замкнутой системы [16]:

$$u\left(\bar{Q}\right)=\begin{cases}-\sum_{n=1}^{N_1}\beta_nQ_n,\ u_{\min}\le\sum_{n=1}^{N_1}\beta_nQ_n\le u_{\max};\\ u_{\max},\ -\sum_{n=1}^{N_1}\beta_nQ_n\ge u_{\max};\\ u_{\min},\ \sum_{n=1}^{N_1}\beta_nQ_n\le u_{\min}.\end{cases} \qquad (23)$$

B. Программная реализация обратных связей в СРП

В условиях интервальной неопределенности действующих на объект управления ограниченных нестационарных возмущений $h\left(t\right)$ представляет существенный интерес проблема построения автоматических регуляторов для такого рода не полностью определенных моделей замкнутых систем. Один из возможных конструктивных способов решения этой проблемы состоит в переходе от отличающейся затруднениями принципиального характера задачи синтеза алгоритмов обратной связи к их программной реализации (А.Б. Куржанский, Р. Габасов, Ф.М. Кириллова). Данный подход может быть распространен на системы с распределенными параметрами [17]. Согласно данному способу, текущие состояния объекта, оцениваемые по измеряемым сигналам обратных связей в заранее фиксированные моменты времени $t_k,\ k=\overline{1,M},$ на протяжении процесса управления при $t\in\left[0,t^*\right]$, рассматриваются в качестве известных начальных состояний объекта, относительно которых на последующих стадиях находятся по принципу гарантированного результата оптимальные программные управляющие воздействия $u_k^*\left(t\right),\ t\in\left(t_k,t^*\right)$. Они определяются из условий «попадания» в допустимую область конечных состояний ансамбля траекторий движения СРП, порождаемого всеми допустимыми интервальными возмущениями $h\left(t\right)$ в пределах каждой из указанных стадий.

Реализуемые на объекте управляющие воздействия $u^*\left(t\right),\ t\in\left[0,t^*\right]$ компонуются из участков изменения прогнозируемых расчетным путем $u_k^*\left(t\right)$ на протяжении шага дискретизации δ и автоматически формируют в итоге в реальном времени требуемый алгоритм обратной связи при достаточном быстродействии вычислительных процедур и доступности измерения с требуемой точностью распределенного выхода объекта, осуществляемого известными способами построения наблюдателей состояния СРП:

$$u^*\left(t\right)=\left\{u_k^*\left(t\right),t\in\left[t_k,t_k+\delta\right]\right\},$$
$$t_k=k\delta;\ k=\overline{0,M};\ \left(M+1\right)\delta=t^*. \qquad (24)$$

Задача синтеза сводится, таким образом, к решению последовательности задач робастного программного управления «суживающимися» по мере продвижения к концу процесса управления ансамблями траекторий движения СРП с фиксируемыми обратными связями начальными состояниями и заданным целевым множеством. Каждая из таких параметризуемых задач в подобных (2) условиях чебышевских оценок этих множеств сводится на интервале $t \in \left[t_k, t^* \right]$ к разрешаемой альтернансным методом ЗПО вида (4), которая усложняется по сравнению с (4) определением I_{1k} и Φ_k в форме функций максимума по $h_k(t)$ [17]:

$$\begin{aligned} & I_{1k}\left(\Delta^{(N_k)}, t_k, t^*\right) = \max_{h_k(t)} I_k\left(\Delta^{(N_k)}, h_k, t_k, t^*\right) \to \min_{\Delta^{(N_k)}}; \\ & h_k(t) = h(t),\ t \in \left(t_k, t^*\right); \\ & \Phi_k\left(\Delta^{(N_k)}, t_k, t^*\right) = \\ & = \max_{X, h_k} \left| Q\left(X, \Delta^{(N_k)}, t_k, t^*\right) - Q_c(X) \right| \le \varepsilon_k. \end{aligned} \tag{25}$$

C. Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов (АКОР) в линейно-квадратичных задачах управления СРП

Известный метод прогонки аналитического решения типичной задачи АКОР в динамических системах использует классические условия трансверсальности на гладкой границе целевых множеств конечных состояний объекта управления [18]. Существенный интерес представляет такая задача применительно к СРП с целевым множеством вида (2), для которых эти условия не выполняются.

Применительно к модальному описанию СРП линейной системой уравнений вида (17) с детерминированным ограниченным внешним возмущением $\eta(t)$

$$\begin{aligned} & \frac{dQ_n}{dt} = -\mu_n^2 Q_n + k_n u(t) + b_{\eta n}\eta(t),\ n = \overline{1, N_1}; \\ & \bar{Q}(t) = \left(Q_n(t)\right); \end{aligned} \tag{26}$$

требованиям (2) к конечному состоянию объекта и типовому квадратичному критерию качества

$$\begin{aligned} & I(u,\eta) = \int_0^{t^*} \Big[\rho_Q \sum_{n=1}^{N_1} Q_n^2(t) + u^2(t) - \\ & -\rho_\eta \eta^2(t) \Big] dt \to \min_u \end{aligned} \tag{27}$$

стандартная процедура принципа максимума приводит к программному оптимальному управлению $u^*(t)$ в форме линейной функции сопряженных переменных $\psi_n(t)$ с известными коэффициентами k_n

$$u^*(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{N_1} k_n \psi_n(t). \tag{28}$$

Последуюшая ψ -параметризация [6,7] $u^*(t)$ обеспечивает редукцию к разрешаемой альтернансным методом относительно $\bar{\Delta}^{(N)}$ ЗПО (4), где в роли $\Delta^{(N)}$ фигурирует вектор $\psi_k^{(N)} = \left(\psi_{ki}^{(N)}\right),\ i = \overline{1, N},$ конечных значений первых N сопряженных функций $\psi_n\left(t^*\right)$ в условиях $\psi_{ki}^{(N)} = 0,\ i = \overline{N+1, N_1}$.

Последующая технология применения метода прогонки в целях синтеза оптимальных регуляторов усложняется необходимостью использования решения $\bar{\Delta}^{(N)} = \bar{\psi}_k^{(N)}$ ЗПО (4) и вычисляемого на этом решении вектора $\bar{Q}^*\left(t^*\right)$ вместо классических условий трансверсальности.

В итоге после некоторых преобразований указанная технология приводит к нестационарному линейному алгоритму синтеза

$$\begin{aligned} & u^*\left(\bar{Q}, t, \eta\right) = \frac{1}{2} k T_1 T_2 \bar{Q}(t) + T_1 T_3 \eta(t), \\ & k = (k_n),\ n = \overline{1, N_1}, \end{aligned} \tag{29}$$

где матрицы T_1, T_2, T_3 вычисляются по установленным зависимостям от элементов матричной экспоненты однородной П-системы дифференциальных уравнений принципа максимума, конечных значений $\bar{\psi}_k^{(N)}$, $\bar{Q}^*\left(t^*\right)$ и вектора начальных состояний объекта $\bar{Q}(0)$.

Переход к обратным связям по измеряемому выходу СРП требует в общем случае построения наблюдателя состояния полного или пониженного порядка.

Если по условиям требуемой точности моделирования СРП можно ограничиться учетом N первых уравнений системы (26), то при выборе числа r измерителей состояния $Q_u\left(X_u, t\right) = \left(Q\left(x_{uj}, t\right)\right),\ j = \overline{1, r}$ в точках $x_{uj} \in V$, равного размерности N вектора $\bar{\Delta}^{(N)}$, линейный алгоритм синтеза принимает подобный (29) вид:

$$\begin{aligned} & u^*\left(Q_u, t, \eta\right) = \frac{1}{2} k T_1 T_2 \Phi_u^{-1} Q_u\left(X_u, t\right) + T_1 T_3 \eta(t); \\ & \Phi_u = \left[\varphi_n\left(\mu_n, x_{uj}\right) \right],\ n = \overline{1, N_1};\ j = \overline{1, r},\ N_1 = N = r, \end{aligned} \tag{30}$$

где φ_n – собственные функции начально-краевой задачи, описывающей поведение СРП.

Задача АКОР в условиях интервальной неопределенности $\eta(t)$ представляет собой дифференциальную игру с антагонистическими воздействиями, в роли которых с позиций стратегии гарантированного результата высту-

пают $u(t)$ и $\eta(t)$. В условиях существования седловой точки игры принцип максимума приводит к аналогичному (28) алгоритму для $\eta^*(t)$, вычисляемому методом прогонки с использованием классических условий трансверсальности $\psi_n^*(t^*) = 0,\ n = \overline{1, N_1}$.

Можно показать, что задача синтеза теперь сводится к построению оптимального регулятора в рассмотренных выше условиях воздействия детерминированного возмущения, совпадающего с $\eta^*(t)$. Построенный по такому алгоритму закон обратной связи отвечает верхней оценке достигаемых на множестве допустимых возмущений значений I в (27) и ε в (2).

Заключение

Предложены конструктивные методы решения ряда актуальных прикладных задач программного и позиционного управления системами с распределенными параметрами в типичных для технических приложений условиях оценок конечных состояний управляемого объекта в равномерной метрике. Реализация предлагаемых подходов базируется на соответствующих обобщениях применительно к исследуемым задачам технологии альтернансного метода, являющегося дальнейшим развитием теории нелинейных чебышевских приближений.

Список литературы

[1] Rapoport E.Ya. Open-Loop Controllability of Multidimensional Linear Systems with Distributed Parameters // Journal of Computer and Systems Science International, 2015, Vol. 54, No 2, pp. 184-201.

[2] Rapoport E.Ya. Open-Loop Controllability of Interconnected Heterogeneous Systems with Distributed Parameters // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2017. Vol. 56. No 4. Pp. 561-575.

[3] Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. М.: Металлургия, 1993. 278 с.

[4] Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2009. 677 с.

[5] Рапопорт Э.Я. Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации. М.: Наука, 2000. 336 с.

[6] Pleshivtseva Yu.E., Rapoport E.Ya.. The Successive Parametrization Method of Control Actions in Boundary Value Optimal Control Problems for Distributed Parameter Systems, Journal of Computer and Systems Sciences International, 2009, Vol. 48, No 3, pp. 351-362

[7] Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu. E. Algorithmically Precise Method of Parametric Optimization in Boundary-Value Optimal Control Problems for Distributed Parameter Systems, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2009, Vol. 45, No 5, pp. 464-471.

[8] Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012, 309 с.

[9] Рапопорт Э.Я. Робастная параметрическая оптимизация динамических систем в условиях ограниченной неопределенности // Автоматика и телемеханика. 1995. № 3. с.86-96..

[10] Pleshivtseva Yu.E., Rapoport E.Ya. Joint Optimization of Interrelated Thermophysial Processes in Metal Working Systems Based on System Quality Criteria // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2013, vol.49, No 6, pp. 527-535.

[11] Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E. Technology of Solving Multi-Objective Problems of Control of Systems with Distributed Parameters // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2017. Vol. 53. No4. Pp. 316-328.

[12] Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Метод многокритериальной оптимизации управляемых систем с распределенными параметрами // Труды СПИИРАН, 2018. Вып. 5(60). С. 64-96.

[13] Pleshivtseva Yu.E., Rapoport E.Ya. Parametric Optimization of Systems with Distributed Parameters in Problems with Mixed Constraints on the Final State of the Object of Control // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2018, Vol. 57, No5, pp. 723-737.

[14] Рапопорт Э.Я. Метод параме трической оптимизации в задачах многоканального управления системами с распределенными параметрами // Изв. РАН. Теория и системы управления, 2019, № 4. С. 36-50.

[15] Rapoport Ya. Structural Parametric Synthesis of Automatic Control Systems with Distributed Parameters, Journal of Computer and Systems Sciences International, 2006. Vol. 45 No 4. PP. 553-566.

[16] Rapoport E.Y. Analytical Construction of Aggregated Controllers in Systems with Distributed Parameters // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2012, vol.51, N3, p.375-390.

[17] Rapoport E.Ya. Open-Loop Implementation of Feedbacks in Parametric Optimization Problems for Incompletely Determined Systems with Distributed Parameters // Journal of Computer and Systems Sciences Internatuional, 2016. Vol. 55. No.3. Pp. 365-379.

[18] Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.: Физматлит, 2007. 440 с.

Modern energy-saving electrotechnologies
Современные энергосберегающие электротехнологии

Numerical modeling of double high-frequency longitudinal welding of cladded pipes

Baake E.
Institute of Electrotechnology
Leibniz University Hannover
Hannover, Germany
baake@etp.uni-hannover.de

Nikanorov A.
Institute of Electrotechnology
Leibniz University Hannover
Hannover, Germany
nikanorov@etp.uni-hannover.de

Ebel W.
Institute of Electrotechnology
Leibniz University Hannover
Hannover, Germany
ebel@etp.uni-hannover.de

***Abstract*—This paper deals with numerical modeling of longitudinal high-frequency (HF) induction welding of cladded pipes using double frequency approach. Solutions are proposed to reach the required temperature distribution at the welding edge for the cladding composite of S355 and Alloy 625 with single and double frequency. An advanced consideration of magnetic and other material properties was performed to simulate the dominating physical effects of HF welding. By the use of FEM analysis, the theoretical capability of an inductive longitudinal welding process for cladded pipes has been demonstrated. Despite some simplification, the dominating effects of the longitudinal welding were considered by the presented model. In the context of the research, a correlation for welding speed, welding frequency and temperature distribution with industrial relevance was found for the cladded pipe welding. Industrial scale process windows for both, single frequency and simultaneous double frequency is presented in this work.**

Keywords—induction high-frequency welding, numerical modeling, cladded pipes

I. Introduction

Today, cladded pipes are widely used in natural gas transportation systems, power plants and the chemical industry. Combination of two different metals within one pipe offers high corrosion and abrasion resistance in an economical way. Until today the cladded pipes are manufactured by discontinuous arc welding, weld cladding or mechanical bracing with comparatively low production rates [1], [2]. Bended cladded sheet material, which is metallurgically bonded by explosive cladding, cold roll or hot roll bonding, serves as the feedstock for the welding process. Induction welding is a state of the art process in longitudinal welding of single material pipes [3]. It is widely used in the almost all industries [4]. Despite its very high productivity up to 200 m/min and energy efficiency, inductive longitudinal welding is not applied in the manufacturing of cladded pipes.

II. Problem description and Solution Approach

The presented solution approach is considered to represent an industrial scale inductive pipe welding process. In such plants, the pipe is made from a metal sheet, which is bended in several steps by roll-forming to a circular, almost closed, cross section. This profile is transferred with the feed rate v_s through the inductor. The inductor is inducing perimeter current in the pipe, which follows the edge contour closing the loop at the welding point. The welding point appears, where the squeezing rolls enforce the edges to join. The heating of the pipe edge contour is mainly determined by two electromagnetic effects: the electromagnetic skin effect is forcing the current to the surface with higher frequencies.

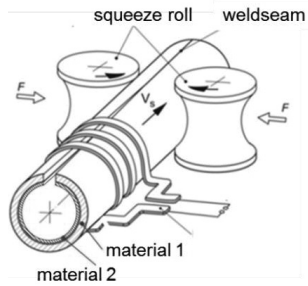
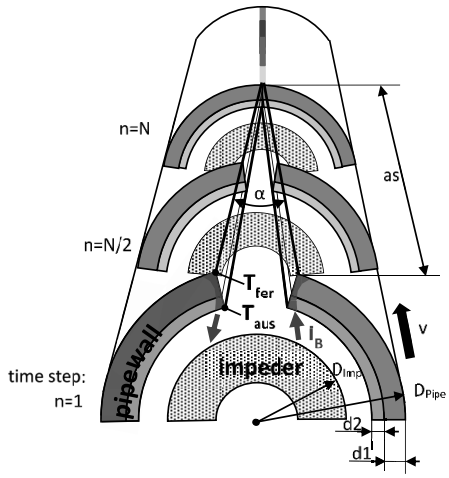


Fig. 1. Schematic overview of inductive pipe welding process

The second dominant effect is the proximity effect. This effect describes the attraction of two HF currents with opposing directions. Those opposite currents can be observed on the two pipe edges between the inductor and welding point. The two effects affect the Joule heat in the pipe edges at the heat affected zone (HAZ). The size and development of the HAZ depends largely on electric, material and geometrical parameters.



d1: thickness of carrier material, d2: thickness of cladded material,
D_{Pipe}: pipe diameter, D_{Imp}: impeder diameter,
as:distance between current feeding point and welding point,
α: welding angle, v: welding rate, IB: welding current, f: welding frequency,
mat1: carrier material, mat2:cladding material

Fig. 2. Numerical model with 2D model steps along the pipe edge move

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

In this work, a two-dimensional(2D) dynamic model is created to determine the influence of the main pipe welding parameters, such as feed rate, vee angle, distance of inductor to the welding point, geometry of cross sections and the electrical parameters. The dynamic model is able to represent the three-dimensional(3D) induction welding as shown in [5]. This can be done, as due to proximity effect, where the inductor has only a localized effect on current distribution, but a weak effect on the welding edge current.

The model is created in the FEM software ANSYS® Mechanical APDL and includes a weak coupled algorithm for the electromagnetic and thermal solution [6]. The consideration of material properties is assured by the backflow of thermal results into the electromagnetic solution in every time step. The Joule heat distribution is extracted from every electromagnetic solution and transferred to the thermal solution. The thermal solution calculates the results of the temperature distribution from the given Joule heat. In the next time step, the updated material properties are considered in the electromagnetic solution. Furthermore, the magnetic field dependent relative magnetic permeability is also considered in the model. ANSYS® Mechanical has no option to simulate the field dependent magnetic permeability in the harmonic solution. Therefore, a cyclic adaptation of the magnetic permeability is installed in the algorithm. This iteration is coupled with the electromagnetic solution and repeats the calculation until the relative magnetic permeability converges. The convergence criterion is fixed to the power allocation in the ferrite and austenitic alloys.

III. Material Properties

Electro- and thermo-physical properties of the cladded pipe materials are pivotal to reproduce the physical effects in the simulation. Due to the non-linearity of the material parameters for the alloys used, the process behavior is highly sensitive to the change of any input properties. To obtain precise results, physical properties of used material need to be considered and determined from ambient temperature to the melting (or liquefaction) point. In this context, the specific electrical resistance and the thermal conductivity are considered as shown in Fig. 3 and Fig. 4.

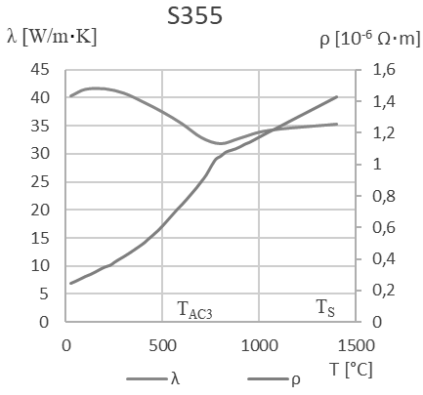


Fig. 3. Specific electrical resistance ρ and thermal conductivity λ of S355 [7], [8]

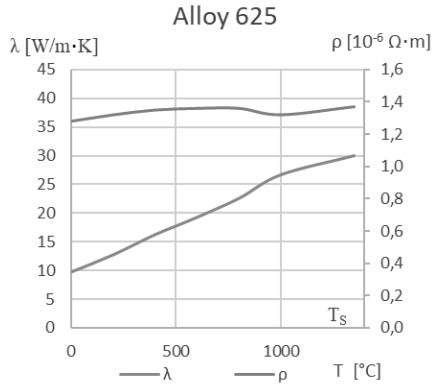


Fig. 4. Specific electrical resistance ρ and thermal conductivity λ of Alloy 625 [9] (extrapolated to the melting points)

The liquefaction temperatures of the alloys used are given as T_L(S355) = 1471ºC [10] and T_L(Alloy 625) = 1340ºC [11]. The function for the temperature dependent specific heat capacity for each alloy [7], [9] is complemented by the enthalpy of the fusion distribution function *h(T)*, which integral equalizes the enthalpy of fusion value L_f. The heat of fusion is calculated by the pure element enthalpy of fusion and the mass proportion of each element in the alloy. For the S355, the heat of fusion is determined as $L_{f\,S355} = 266\ kJ/kg$ which is close to reference value $L_{f\,S355,lit} = 268\ kJ/kg$ [12]. For the nickel-based Alloy 625, the enthalpy of fusion is calculated as $L_{f\,A625} = 338.4\ kJ/kg$.

In the context of material precision, a particular look on the relative magnetic permeability of the backing steel S355 and the ferrite material of the impeder is made. Except the consideration of temperature depending change up to the Curie temperature, magnetic field dependence must also be taken into account (Fig. 5).

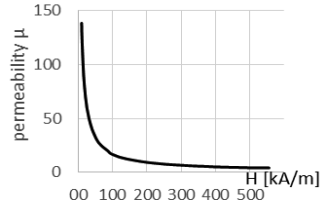


Fig. 5. Magnetic field dependent permeability of S355 at 20°C

Equation (1) is an approximation function for the real part of relative magnetic permeability μ_r, introduced by Fisher [13, pp.286-299] and transferred from the magnetic flux *B(H)* to the relative magnetic permeability $\mu_r(H)$ relation.

$$\mu_r(H) = 1/(\mu_0\,(a_f + b_f\,|H|)) \qquad (1)$$

By choosing $a_f = 390\ m/H$ and $b_f = 0.697\ m^2/V_s$ [8, p.67] as coefficients for the soft magnetic material S355 [14], the magnetic field dependency of material S355 is taken into account. For the impeder an adapted magnetic saturation function, with a starting pitch is used as shown in Fig. 6.

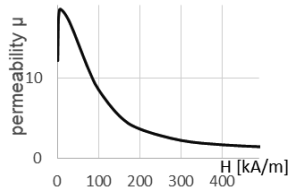


Fig. 6. Magnetic permeability of the ferrite impeder in depence on magnetic field strength

Due to choice of the factors a_f and b_f, the resulting relative permeability is dimensionless as required. For the temperature-field dependence of the magnetic permeability, equation (2) is used, with a function $\varphi(T)$ representing the temperature dependence of the permeability.

$$\mu_r(H,T) = \varphi(T)\,(\,\mu_r(H) - 1) + 1 \qquad (2)$$

This function is taken from [15, p.76] and redrawn in Fig. 7.

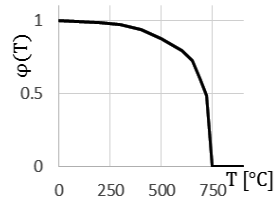


Fig. 7. Temperature dependent function of permeability φ(T) [15]

The saturation effect is correlated with the welding current and can be indirectly used for the process control by two input parameters. The change of current frequency influences the electromagnetic skin depth and therefore the required welding current. The second influence on the saturation is the welding rate, which is also positively correlated to the required current. Due to the complexity of the process, both input parameters have side effects. For example, a lower feed rate increases the effect of the divergent heat conductivity of materials by extending the process time.

The 2D dynamic model has some limitations in the representation of the process: For example, the longitudinal heat transfer and effect of adverse current circuit on the pipe inside cannot be displayed. Despite this the model represents the main physical effects of welding in the cross section and can be used for the task of finding matching process parameters.

IV. Single Frequency Welding

The correct simulation of the welding of cladded pipes strongly relates to the material properties and their proportion to each other. The temperatures T_{ref} for the S355 and T_{aus} (Fig. 2) for the Alloy 625 at both edges of the joint serve as the target variable. The aim is to reach the liquefaction temperature of both alloys when the joining surfaces get in contact. The 2D dynamic model has some limitations in the representation of the process: For example, the longitudinal heat transfer and effect of adverse current circuit on the pipe inside cannot be displayed. Despite this the model represents the main physical effects of welding in the cross section and can be used for the task of finding matching process parameters.

Welding with single frequency (SF) is possible by adapting the frequency and the feed rate to the geometrical parameters. Therefore, a feed rate – frequency curve can be found for each material combination and geometrical setup. For a given setup (d1 = 2 mm, d2 = 1 mm, Dpipe = 60 mm, Dimp = 42 mm, as = 90 mm, α = 2º, mat1: S355, mat2: Alloy 625) a corresponding correlation of feed rate – welding velocity is presented in Fig. 8.

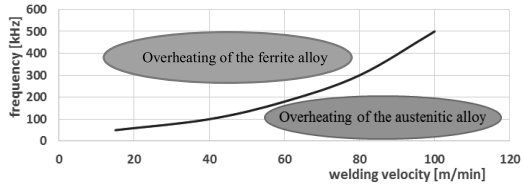


Fig. 8. Frequency depence on welding velocity for desired welding temperature at the join edge

As shown in Fig. 8, the frequency should match the chosen welding speed to melt both alloys at the desired position. Industrial welding generators usually do not offer the high enough flexibility to adapt the frequency in a wide range to the demanded feed rate in practical use. Therefore, the use of double frequency for the longitudinal welding of cladded pipe was investigated.

V. Simultaneous Double Frequency Welding

Welding with two simultaneous frequencies permits a higher flexibility for the operative adaptation of the welding process to industrial scale variations in pipe geometry and material. For a fixed geometrical and material setup, the usable range of feed speeds depends on the spread of the upper and lower frequency of the energy source.

For the use of double frequency, the simulation algorithm needs an adaptation in context of electrical calculation. The electromagnetic solution of each frequency is calculated in a separated solution step (Fig. 9).

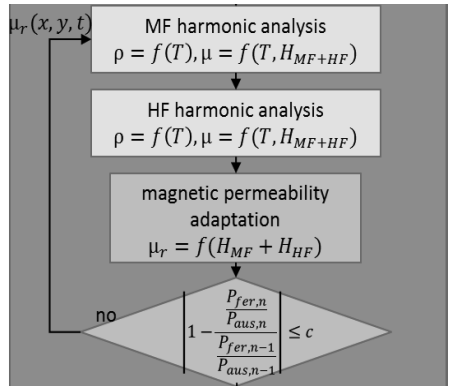


Fig. 9. Algorithm extension for the electromagnetic solution of two simultaneous frequencies with a permeability adaptation

For the iterative adaptation of relative magnetic permeability, the RMS values of the magnetic fields of each value is summarized. After the convergence criteria in the pipe is reached, the resulting Joule heat distribution of both frequencies is transferred to the thermal solution algorithm.

To lower the welding speed, it is necessary to increase the relative absorbed power in the ferrite steel layer in proportion to the austenitic alloy. This is necessary as the ferrite S355 offers a higher heat conductivity (Fig. 10).

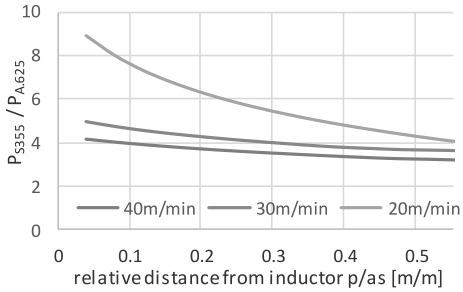


Fig. 10. Total power proportion between the two layers for different welding velocities

The examined frequencies for the research are $f_{HF} = 220\ kHz$ for upper and $f_{MF} = 10\ kHz$ for the lower frequency. From Fig. 8 it can be taken, that with the chosen frequencies the minimum and maximum welding velocities are $v_{min} = 10\ m/min$ and $v_{max} = 68\ m/min$. For the welding velocity of $v = 40\ m/min$, the desired temperature distribution can be reached by setting a MF to HF current ratio of $f_{HF}/f_{MF} = 4.06$ (see Fig. 11). Further suitable material combinations, such as S235 for the carrier material and X5CrNi18 or X2CrNiMo17 as cladding materials, can be found for the presented longitudinal seam welding approach.

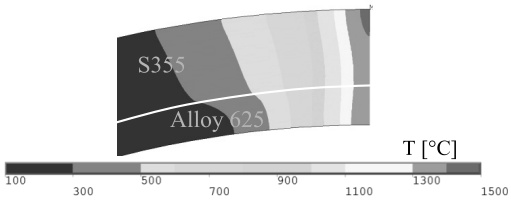


Fig. 11. Temperature distribution for the welding velocity v = 40 m/min and $f_{HF}/f_{MF} = 4.06$

VI. Conclusions

By the use of FEM analysis, the theoretical capability of an inductive longitudinal seam welding process for cladded pipes can be demonstrated. Despite some simplification, the main dominating effects of the longitudinal seam welding were considered by the developed model. Industrial scale process windows for both, single frequency and simultaneous double frequency are presented in this work. The verification was performed on a cladding material combination of S355 and Alloy 625 with strongly divergent material properties, where several effects were used to reach the melting temperatures in the joint edges. The developed approach was also applied to other material combinations, which are not presented in this paper. Potentially, a wide range of metal combinations comprising ferrite alloys as carrier and austenitic alloys as cladding material can be welded by the presented approach. Therefore, a precise material properties determination needs to be existent. Future investigations will highlight the influence of inductor and the full 3D model. Also, thicker-walled cladded pipes are about to be examined for the inductive HF welding.

Acknowledgment

The IGF-project 19041 BG / FOSTA No. P 1183 of the Research Association for Steel Application (FOSTA) was supported by German Federation of Industrial Research Associations (AiF) in the frame of the Industrial Collective Research program (IGF) from Federal Ministry for Economic Affairs and Energy.

References

[1] X. Meng, G. Qin, Y. Zhang, B. Fu, and Z. Zou, “High speed TIG-MAG hybrid arc welding of mild steel plate,” J Mater Process Technol, vol. 214, no. 11, pp. 2417–2424, 2014.

[2] J. Sabbaghzadeh, M. Azizi, and M. J. Torkamany, “Numerical and experimental investigation of seam welding with a pulsed laser,” Opt Laser Technol, vol. 40, no. 2, pp. 289–296, 2008.

[3] B. Nacke and E. Baake, *Induktives Erwärmen*. Essen: Vulkan Verlag GmbH, 2014.

[4] B. Grande and O. Waerstad, “Consistent quality in high-frequency tube and pipe welding,” 2011

[5] A. Nikanorov, E. Baake, H. Brauer, and C. Weil, “Approaches for Numerical Simulation of High Frequency Tube Welding Process,” in Modelling for Electromagnetic Processing, 2014, no. 1, pp. 445–450.

[6] W. Ebel, M. Kroll, A. Nikanorov, and E. Baake, “Nummerische Simulation des HF-Längsnahtschweißens,” Prozesswärme, vol. 2, 2018.

[7] Peil, U., Wichers, M., “Schweißen unter Betriebsbeanspruchung – Werkstoffkennwerte zur Temperaturfeldberechnung für einen S 355 J2 G3,” *Stahlbau*, vol. 74, no. 11. pp. 249–257, 2005.

[8] Nörenberg, C., “Bestimmung elektromagnetischer Material-eigenschaften für Rohrstähle mit Hilfe experimenteller Untersuchungen und numerischer Simulation.,” Leibniz Universität Hannover, 2017.

[9] M. Woite GmbH, “2.4856,” 2017. http://woite-edelstahl.info/24856de.html.

[10] E. Le Guen, M. Carin, R. Fabbro, F. Coste, and P. Le Masson, “3D heat transfer model of hybrid laser Nd:Yag-MAG welding of S355 steel and experimental validation,” Int J Heat Mass Transf, vol. 54, no. 7–8, pp. 1313–1322, 2011.

[11] Corrosion Materials, “Alloy 625,” 2008. www.corrosionmaterials.com.

[12] Winczek, J., Gawrońska, E., “The modeling of heat affected zone (HAZ) in submerged arc welding (SAW) surfacing steel element,” Metalurgija, 2016.

[13] Fischer, J., Moser, H., “Die nachbildung von Magnetisierungskurven durch einfache algebraische oder transzendente Funktionen,” Arch. für Elektrotechnik, vol. 42, no. 5, pp. 286–299, 1956.

[14] Lim, K., Hammond, M., “Universal Loss Chart for the Calculation of Eddy Current Losses in Thick Steel Plates,” Proc. Inst. Electr. Eng., vol. 117 (4), pp. 857–864, 1970.

[15] Nacke, B., “Ein Verfahren zur numerischen Simulation induktiver Erwärmungsprozesse und dessen technische Anwendung.. Universität Hannover,” Leibniz Universität Hannover, 1987.

Optimal design of magnetic flux concentrators in induction heating

Baldan M.
Institute of Electrotechnology
Leibniz University Hannover
Hannover, Germany
baldan@etp.uni-hannover.de

Cetin M.
Institute of Electrotechnology
Leibniz University Hannover
Hannover, Germany
cetinmustafa93@gmail.com

Nikanorov A.
Institute of Electrotechnology
Leibniz University Hannover
Hannover, Germany
nikanorov@etp.uni-hannover.de

Nacke B.
Institute of Electrotechnology
Leibniz University Hannover
Hannover, Germany
nacke@etp.uni-hannover.de

***Abstract*—Magnetic flux concentrators (MFCs) are widely used in induction heating systems for concentration, shielding or redistribution of the magnetic field. They provide an accurate heat pattern control and improve the performance of the entire installation. In this paper, the coupled electromagnetic-thermal model simulates the entire system, and it takes into account the hysteresis losses in magnetic flux concentrators, as well as the cooling effect of the water in the coil. Firstly, it is investigated how the geometry of the flux concentrator influences the electromagnetic efficiency and the temperature distribution. Secondly, making use of a multi-objective optimization code, the trade-off between maximum temperature in the work-piece and in the MFC is studied.**

Keywords—magnetic flux concentrators, induction heating, FEM, multi-objective optimization

I. Introduction

Magnetic flux concentrators are materials, other than copper coil, that are used in induction systems to alter the flow of the magnetic field [1]. The benefits of using magnetic flux concentrators include improvement of induction coil and process efficiency, increase of power factor, reduction of coil current, precise control of the magnetic field and resulting heat pattern. Use of MFCs ranges from hardening [2] to tube welding [3], to crystal growth [4] applications, just to name few examples.

Ferromagnetic materials can be divided into two groups: hard and soft. Hard magnetic materials are characterized by a hysteresis loop with a relative big area and thus high hysteresis losses. On the other hand, soft magnetic materials have a relative small shaped hysteresis loop. Soft magnetic materials are therefore a good choice for guiding magnetic flux lines, while keeping the losses low. There are three families of MFCs: ferrites, steel laminations, and soft magnetic composites (SMC) [1], [5]. Ferrites are often used in high frequency applications, like induction tube welding or brazing. They show high permeability at low field and have elevate electrical resistivity, which reduces eddy current losses. However, they present a low saturation flux density, elevated brittleness and hardness, which makes the manufacturing of complex geometries challenging. Laminations are preferred for low and middle frequencies. High saturation flux density, high permeability, and little losses at low frequencies are the main advantages. The drawbacks include bad performances in 3D magnetic fields, limited machinability, laborious assembling and frequency limits. Lastly, soft magnetic composites are made from ferrous particles covered with a thin insulation layer, mixed with organic or inorganic binder, and pressed at high pressure. They can work in a large range of frequencies and they are characterized by an amount of losses comparable to ferrite at high frequencies and laminations at low frequencies. The drawbacks are limited dimensions and high costs. Recently, the possibility of using generative manufacturing for the production of MFCs has been investigated [6].

The use of numerical simulations has been a powerful tool in the last decades in designing induction-heating systems. Typically, if magnetic flux concentrators are present, they are assumed to have a constant magnetic permeability and they are not taken into account in the thermal solution. Nevertheless, there are many real cases when the concentrators fail due to, for instance, the too hot copper. Just few works in the literature are available, where the temperature field is computed in the MFCs [1], [5], [7]. In [7], Nemkov et al. studied the steady-state temperature distribution in the induction coil and in the flux concentrator in a seam annealing process. With a frequency of 1 kHz, it turned out that Fluxtrol® A behaved better than laminations, i.e. a lower maximum temperature in the MFC was reached. One of the purposes of this paper is the development of a holistic numerical model of induction heating. The thermal analysis is carried out in the work-piece as well as in the flux concentrators and in the coil. The considered MFC is Fluxtrol® 50 [8], a soft magnetic composite for middle-to-high frequencies. The novelty of this work is in the search for an optimal shape of MFCs. Firstly, it is investigated how the geometry of the magnetic flux concentrators affects the electromagnetic efficiency and the temperature distribution. Secondly, a multi-objective optimization task determines the optimal trend between maximum temperature in the MFC and in the work-piece.

II. Computational Model

The sketch of Fig. 1 shows the geometry of the 2D planar model [9]. The magnetic flux concentrator surrounds the one-turn coil. High thermally conductive glue (blue on Fig. 1) is put between MFC and copper. In orange is represented the region where water flows. A transient thermal and time-harmonic electromagnetic coupled problems are solved. The numerical solution of the EM analysis is carried out by applying the well-known A-V formulation, where $\vec{A}$ means magnetic vector potential, while V stands for the electrical scalar potential [10]. To ensure the uniqueness of the vector potential, the Coulomb gauge condition is employed. The resulting equations are:

$$\begin{aligned}
&\nabla\times[\nu]\nabla\times\{\vec{A}\}-\nabla\nu_e\nabla\cdot\{\vec{A}\}+[\sigma]\left\{\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}\right\}+[\sigma]\nabla V=\{0\}\\
&\nabla\cdot\left([\sigma]\left\{\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}\right\}-[\sigma]\nabla V\right)=\{0\}\\
&\nabla\times[\nu]\nabla\times\{\vec{A}\}-\nabla\nu_e\nabla\cdot\{\vec{A}\}=\{\vec{J_S}\}
\end{aligned}\tag{1}$$

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

where the first two expressions refer to the electrically conductive regions, and the third one - to the non-conductive portions. $[\nu]$ is the reluctivity matrix, $\nu_e = \frac{1}{3} tr[\nu]$, $[\sigma]$ is the electrical conductivity matrix, $\overrightarrow{J_S}$ is the applied current density. The spatial discretization occurs with quadrilateral and triangle shape nodal elements (Fig. 2).

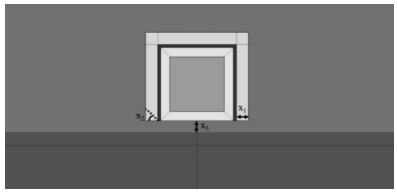


Fig. 1. Sketch of the planar system: a flat inductor is surrounded by a MFC

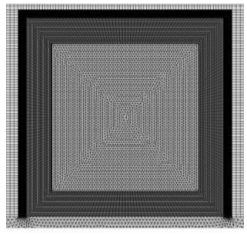


Fig. 2. Detail of the mesh in the coil, MFC, glue layer, and water

The work-piece is made of 42CrMo4 (1.7225), a magnetic steel widespread in automotive driving elements. We refer to [11] for the electrical resistivity values. It is instead used the reference [12] for the expression of the magnetic permeability, which is temperature and magnetic field intensity dependent:

$$\mu_r(\left|\overrightarrow{H}\right|,T) = \begin{cases} 1789\cdot(1-\frac{T^2}{750^2})+1 \\ (2.41^{14.73-\ln(\left|\overrightarrow{H}\right|)}-1)(1-\frac{T^2}{750^2})+1 \\ 1 \end{cases} \quad (2)$$

where $\overrightarrow{H}$ is the magnetic field and T is the temperature. The first equation of (2) is used when $\left|\overrightarrow{H}\right|$ is lower than 500 A/m and T is smaller than 750 °C (Curie point). The second one refers to higher field cases, when the temperature is still below Curie. Lastly, the third one is to use above 750 °C. The electromagnetic properties of Fluxtrol® 50 are available in the manufacturer's data sheet [8]. However, the available values of magnetic permeability are limited to low-middle magnetic field intensities. Considering the analytical expression of the BH curve from [13]:

$$\vec{B}(\left|\overrightarrow{H}\right|) = \mu_0\left|\overrightarrow{H}\right| + B_S\frac{H_a+1-\sqrt{(H_a+1)^2-4H_a(1-a)}}{2(1-a)} \quad (3)$$

with $H_a = \mu_0\left|\overrightarrow{H}\right|(\mu_{r,i}-1)/B_s$, the parameters $B_S, a, \mu_{r,i}$ were fit in order to achieve the best agreement between mathematical equation and available data. Table I summarizes our findings. This expression could be also used with high magnetic field intensities.

TABLE I. OPTIMAL PARAMETERS OF THE BH CURVES STARTING FROM THE DATA SHEET

B_S	a	$\mu_{r,i}$
1.2	0.45	55

Once obtained the solution of the electromagnetic problem, a thermal problem on the same geometry is solved; the temperature field distribution is calculated, exept from the surrounding air, everywhere. We made use of the following Fourier equation [10]:

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t} = \{L\}^T([D]\{L\}T) + \bar{q} \quad (4)$$

where ρ is the mass density, c is the specific heat, $\{L\}$ is a derivative operator, $[D]$ represents the thermal conductivity matrix, and $\bar{q}$ is the heat generation rate per unit volume. In our system, there are two kinds of heat sources: Joule and hysteresis losses. The Joule losses play a dominant role in the work-piece and in the coil. On the other hand, they are generally low in the MFC and in the glue layer, being their electrical conductivity orders of magnitude lower compared to metals. As shown in [14]-[15], in magnetic steels at typical working frequencies of induction heating, hysteresis losses are negligible in comparison to the Joule ones. The overall density of losses [W/cm^3] of Fluxtrol® 50 is given by the manufacturers [8]:

$$P_{MFC} = 2.73 f^{1.125}\left|\vec{B}\right|^{2.3} \quad (5)$$

Here f denotes the frequency (kHz) and $\vec{B}$ is the magnetic flux density (T). Convection and radiation thermal losses are considered for the outer surfaces of the work-piece, MFC and inductor. Thermal properties of 42CrMo4 are taken from [11]. It is worth noting that Fluxtrol® 50 has a thermal conductivity of 6 W/mK [8], which is three times higher than the value of the glue [16].

In order to simulate the cooling effect of water, the inner section of the coil is divided into two parts. The first one consists of a frame-shape area that laps the wet surface of the coil. It is wide as the thermal boundary layer, i.e. the distance from the wall where the flow temperature has essentially reached the free stream value. Since the maximum velocity of the water is typically few meters per second, the flow is turbulent. In [17], a turbulent Couette flow is studied. It comes out that for large Reynolds numbers the flow has a two-layer structure. The thin wall layer thickness may be determined as [17]:

$$\delta = \frac{\nu}{u_\tau} \tag{6}$$

ν is the kinematic viscosity and u_τ is the friction velocity [17]. We assume that also the flow inside the coil has a two-layer structure and the thermal boundary layer is supposed equal to δ [18]. Of course, a more reliable estimation would require a CFD simulation. The average velocity (v_m) of the water in the coil could be found with:

$$v_m = \frac{P_C}{c\rho A \Delta T}. \tag{7}$$

Here P_C is an estimation of the losses in the copper, c and ρ the specific heat and density, respectively, of water, A the section where water flows, ΔT the temperature difference between outlet and inlet. Now, the heat transfer coefficient (h) is calculated in a first approximation using the Nusselt number calculated by the following equation which is, however, only valid for small changes in temperature of the cooling medium [19].

$$h = 2500 v_m^{0.8} L^{-0.2}. \tag{8}$$

Based on (8), an equivalent thermal conductivity (λ_{eq}) is given to the thermal boundary layer:

$$\lambda_{eq} = h\delta. \tag{9}$$

We notice that the choice of δ is not so binding, since thicker thermal boundary layers result in higher conductivity values.

The second layer is square shape and it is supposed to have a constant temperature of 20 °C.

Each simulation consists actually of several heating stages. In this way, a quasi-steady state regime in the temperature distribution of the coil and MFC is reached. At each stage, it is supposed that the starting temperature of the work-piece is 20 °C. Vice versa, the temperature values of the remaining geometry are read from the previous stage.

III. Multi-objective optimization

An unconstrained multi-objective optimization problem can be formulated as follows:

$$\text{“minimize”}\ \vec{y} = \left(f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), ..., f_m(\vec{x})\right),\ \vec{x} \in \overrightarrow{X} \tag{10}$$

where $\vec{x} = (x_1, x_2, ..., x_n)$ is the design vector, $\overrightarrow{X} \subseteq \Re^n$ is the feasible design space, and $\vec{y}$ is the m-vector of object values. The search is for finding those solutions for which improvement in one objective can only occur with the worsening of at least one other objective. These are called non-dominated solutions and they form the “Pareto-front”.

AMALGAM* [20] is a population based evolutionary algorithm that we developed and successfully applied in an inductor design case. It is proved that employing parallelization could reduce the CPU time to affordable costs even with computationally intensive simulations [21]. However, parallelism is not only a way for solving problems more rapidly, but also for developing new and more efficient search models: a parallel evolutionary algorithm can be more effective than a sequential one, even when executed on a single processor [21]. That is why we include parallelization in AMALGAM* for solving (10). The number of individuals in the population is a multiple of the cores.

A. Formulation of the optimization problem

In this study, (10) has two objective functions (m = 2) and three design variables (n = 3). Our aim is to find the best trade-off between maximum temperature in the work-piece and MFC:

$$f_1(\vec{x}) = -\max_{WP} T,\ f_2(\vec{x}) = \max_{MFC} T \tag{11}$$

The design vector is $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3)$, where x_1 represents the thickness of the magnetic flux concentrator, x_2 is the angle between the MFC and the horizontal plane, x_3 is the distance between MFC and work-piece (Fig. 1).

IV. Simulation and Optimization Results

Before dealing with the optimization outcomes, we illustrate some findings, result of a parametrical analysis in two case study.

A. Case study 1

In this case, the heating time of each stage is 6 s and the resonance frequency is 10 kHz. The current that fed the coil is supposed to be constant during the process. It has a value of 2700 A and it allows reaching a maximum temperature in the work-piece of approximately 1000 °C. 6 heating stages are enough for reaching quasi-steady state conditions.

The thicker is the MFC, the higher is the maximum temperature in both work-piece and concentrator (Fig. 3).

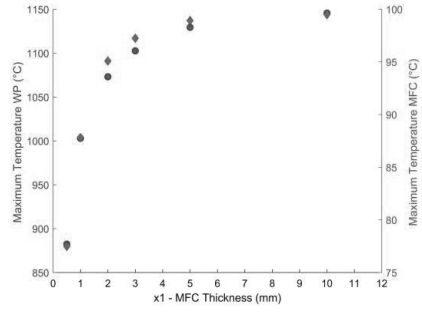


Fig. 3. Maximum temperature in the work-piece (WP) and MFC

However, the temperature growth becomes rather small when the thickness is bigger than 4 mm. With raising depths of MFC the losses in the coil tend to increase because, on the one hand the current is pushed more and more towards the work-piece, on the other the temperature in the copper goes up. The profile of the losses in the MFC (Fig. 4) has a peak for x_1 equal to 0.5 mm. Then they get smaller, since the average value of the magnetic flux density decreases. However, since the copper losses are one order of magnitude greater than the ones in the MFC, bigger MFC thicknesses imply worse efficiencies (Fig. 5).

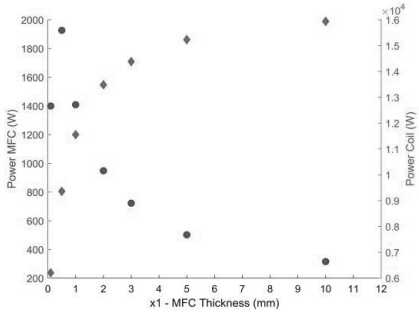


Fig. 4. Losses in the MFC and in the coil in dependency of the thickness of the concetrator

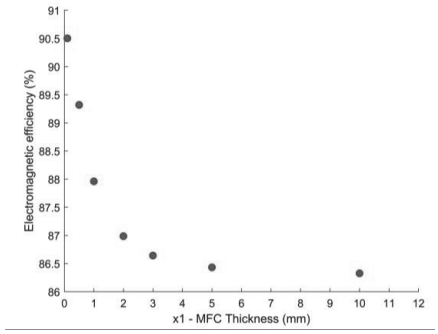


Fig. 5. Electromagnetic efficiency a the end of the process with different thicknesses of MFC

B. *Case study 2*

In comparison to case study 1, different regime parameters were considered, i.e. the frequency is now 100 kHz and the excitation current is 1500 A. As before, a maximum temperature in the work-piece of approximately 1000 °C is achieved.

Fig. 6 illustrates the losses in the MFC weighted at the power in the work-piece. The case with 100 kHz shows a slight rise in comparison to case study 1. Qualitatively, results regarding maximum temperatures and induced powers look similar to Fig. 3 and 4.

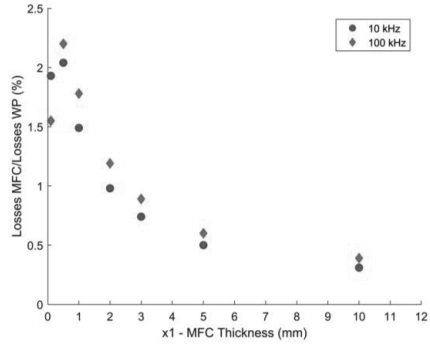


Fig. 6. Comparison of the relative value of the losses in MFC between case study 1 (10 kHz) and 2 (100 kHz)

C. *Multi-objective optimization*

In Table II one can see the boundaries of the variables of the design vector.

TABLE II. VALUES THAT THE DESIGN PARAMTERS COULD ASSUME

$x_1(mm)$	$x_2(°)$	$x_3(mm)$
0.5-10	0-45	2-10

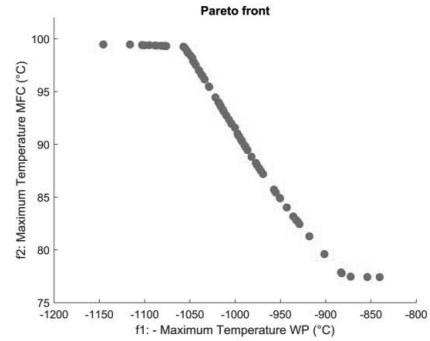


Fig. 7. Non-dominated solutions of the problem formulated in (9)

The population is composed by 24 individuals, while 30 is number of iterations [20]. The resulting Pareto front could be divided into three blocks (Fig. 7). In the left hand side, the maximum temperature of the MFC remains practically constant, while f_1 rapidly increases. All these solutions are characterized by the thickest possible MFC (x_1 equal to 10 mm), with x_3 that ranges between 2 and 3.3 mm. The angle (x_2) remains smaller than 20°. The individuals in the central part of the Pareto front are instead characterized by the shortest work-piece to coil distance (2 mm), and they have a thickness of MFC between 1.7 and 0.5 mm. In most of the solutions x_2 oscillates in the range 20-40°. Lastly, solutions in the right part have $x_1$equal to 0.5 mm and different combinations of x_2 and x_3. This part of the front is for our purpose not relevant, because while the temperature in the WP decreases, the one in the MFC remains practically constant.

V. CONCLUSIONS

In this paper we analysed the temperature distribution in the whole induction heating system. We showed that, in the presented study, with an adequate cooling, the maximum temperature in the MFC does not exceed 100 °C. Despite this value is below the maximum possible working temperature declared by the manufacturers, it would be convenient to reduce it as much as possible, i.e. for increasing the lifetime. From the results of the optimization, we can conclude that such reduction occurs only with thinner layers (0.5-1.7 mm) of MFC and angles between 20 and 40°.

REFERENCES

[1] R. Goldstein, "Magnetic flux controller in induction heating and melting," ASM Handbook, Volume 4C, Induction and Heat Treatment, 2014, pp. 633-645.

[2] D. Schlesselmann, Z. Yu, A. Dalinger, and B. Nacke, "New applications of numerical simulation in inductive surface hardening with flux concentrators," HTM J. Heat Treatm. Mat., 70, 2015, pp. 40-49.

[3] F. Dughiero, M. Forzan, C. Pozza and E. Sieni, "A traslational coupled electromagnetic and thermal innovative model for induction welding of tubes," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 2, 2012, pp.483-486.

[4] H. Heidari, M.H. Tavakoli, S.O. Sobhani, and M. Honarmandnia, "Influence of magneitc flux concentrator on the induction heating process in crystal growth systems-geometry investigation, CrystEngComm, 20, 2018, pp. 7857-7865.

[5] V. Nemkov, "Magnetic flux control in induction systems," Heat Processing, 3, 2014, pp. 81-88.

[6] T. Steinberrg, M. Baldan, A. Nikanorov, E. Baake, "Numerical investigation of generative manufactured magnetic flux concentrators for induction heating applications," Proceedings of the XVIII International UIE-Congress, Hannover, June 6-9, 2017, pp. 391-396.

[7] V. Nemkov, R. Goldstein, "Increasing inductor lofe by predicting coil copper temperatures," Heat Treating Progress, September/October 2007, pp. 44-49.

[8] https://fluxtrol.com/inc/pdf/Fluxtrol-50-Specs.pdf

[9] F. Li, X. Li, X. Qim amd Y. Rong, "Study on the plane induction heating process strenghtened by magnetic flux concenraor based on response surface methodology", Journal of Mechanical Science and Technology, 32 (5), 2018, pp. 2347-2356.

[10] ANSYS Inc., "Theory reference for the mechanical APDL and mechanical applications," Release 12.0, 2009.

[11] M. Schwenk, "Numerische Modellierung der Induktiven ein- oder zwei- Frequenzrandschichthärtung," KIT Scientific publihing, 2012.

[12] U. Lüdtke, „Numersiche Simulation gekoppelter Felder in der Elektroprozesstechnik", Habilitation, 2013.

[13] P. di Barba, M.E. Mognaschi, D.A. Lowther, F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi, and E. Sieni, "A benchmark problem of induction heating analysis," International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 53, 2017, pp. 139–149.

[14] A. Sluhotsky, C. Ryskin, " Inductors for induction heating," Leningrad, Energia, 1974.

[15] D. Schlesselmann, "Methoden zur numerischen Berechnung, Analyse und Auslegung induktover Randschichthärteprozesse unter Berücksichtigung von magnetischen Sättigungseffekten," Garbsen, PZH Verlag, 2016.

[16] https://www.muellerbestellung.de/mediafiles/Datenblaetter/Thermiglue_TL_23010_DE.pdf.

[17] H. Schlichting and K. Gersten, Boundary Layer Theory, Springer, 1999.

[18] https://wiki.epfl.ch/me341-hmt/documents/lectures/slides_06_Laminar%20and%20turbulent%20boundary%20layers.pdf.

[19] S. Schubotz, and B. Nacke, "Modelling and verification of convective heat transfer coefficient for induction applications," International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 53, no. S1, 2017, pp. 79-88.

[20] M. Baldan, T. Steinberg, and E. Baake, "Self-adaptive multimethod optimization applied to a tailored heating forging process," IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 355, 2018, 012016.

[21] F. Luna and E. Alba, "Parallel multiobjective evolutionary algoirthm," Handbook of Computational Intelligence, Springer, 2014, pp. 1017-1031.

Design optimization automation for luminaire reflectors using COMSOL Multiphysics and performance comparison against Zemax OpticStudio

Birjukovs M.
Department of Physics
University of Latvia
Riga, Latvia
mihails.birjukovs@lu.lv

Jegorovs A.
Department of Physics
University of Latvia
Riga, Latvia

Jakovics A.
Department of Physics
University of Latvia
Riga, Latvia
andris.jakovics@lu.lv

Klokovs A.
Vizulo
Riga, Latvia
aleksejs.klokovs@vizulo.com

Felcis I.
Baltic Research Center
Riga, Latvia
ingmars.felcis@brc-lab.com

***Abstract*—This work showcases the complete design pipeline based on COMSOL Multiphysics for one of the luminaire models manufactured by Vizulo. Generation of optimization targets, ray tracing models and utilized optimization algorithms are described. The authors also evaluate the performance of COMSOL against Zemax OpticStudioPremium, a specialized optics design suite widely used by the optics industry. Out-of-the-box version of both packages are tested: ray tracing and optimization performance are compared. It is found that, while OpticStudio' ray tracer is by far superior, OpticStudio is greatly outperformed by COMSOL in optimization tasks for considered problems. Other aspects of both packages are also analyzed.**

Keywords — luminaire design, ray tracing, optimization, COMSOL Multiphysics, Zemax OpticStudio

I. Introduction

Luminaires are generally simple systems in terms of the underlying physics, but given the greatly varying customer demands, as well as the many constraints imposed by production processes and illumination and electromagnetic safety standards, efficient product design is virtually impossible without integrating computer assisted optimization into the concept-to-product pipeline. The output of seemingly simple optical systems is in most cases extremely sensitive to variations of design parameters and physical intuition may not apply.

This work describes the complete design pipeline for one of the products developed as part of the cooperation agreement between the University of Latvia (UL) and Vizulo, a major manufacturer of LED-powered luminaires based in Latvia. The product is a line of industrial OAK series luminaires (light fixtures used for illumination of storage facilities, hangars, industrial installations, etc.) that includes three distinct winged reflector geometry configurations. The objective was to find the optimal designs that yield target spatial distributions of emitted light, while satisfying a set of constraints.

Two different simulation packages were considered: COMSOL Multiphysics, a versatile multi-purpose simulation tool, and Zemax OpticStudio (ZOS), a specialized optical system design program commonly used by the optics industry. Both packages were tested out-of-the-box, without modifications. Due to security considerations and per request of Vizulo, luminaire geometry dimensions and numerical values of output intensity are hidden throughout this article. Everything else is shown unaltered.

II. Problem Formulation

In Fig. 1, a general layout of an OAK luminaire is shown – two parallel LED rows span the length of the luminaire and each of the individual LEDs has a known generated light intensity distribution specification that can be readily imported into both COMSOL and ZOS; LEDs are attached to plates that are mounted on top of the electronics compartment (below the LEDs, not shown in Fig. 1) with a winged reflector fastened in between. There are also smaller side reflectors on either end of the luminaire. Finally, a thin glass plate is attached above the LED plate.

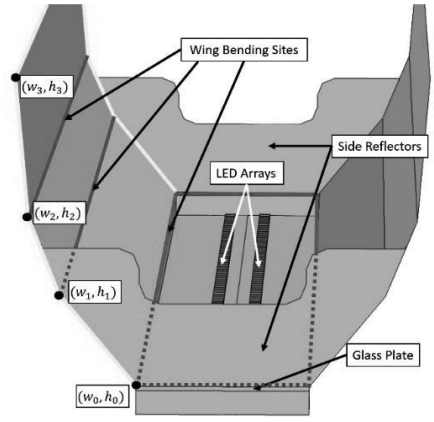


Fig. 1. COMSOL Multiphysics representation of a sample luminaire geometry. The yellow contour indicates the main reflector wing, while the red one shows the perimeter of the glass plate. Black dots indicate reference points (with framed coordinates) used to set up the optimization problem. Blue lines represent the reflector wing bending sites.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

The physical picture is as follows: unpolarized light is released from LEDs; light is partially reflected and refracted (refraction index is wavelength-dependent) at the glass plate boundaries and intensity is redistributed between reflected and transmitted portions; reflector surfaces (base, sides and wings) are modelled as glossy surfaces, where combined specular and diffuse reflections, as well as intensity absorption occur. Reflection processes depend on the surface diffusivity and absorption coefficients (both ranging from 0 to 1), whereas bulk absorption is given by the imaginary part of the refractive index. Material and surface properties are taken either from manufacturer specification sheets or from COMSOL and ZOS databases.

In standard laboratory photometric tests, the light that exits the luminaire optical system reaches a light sensor that scans the produced intensity output over different directions. This is done by setting up a stationary sensor and rotating the luminaire to different positions at a certain distance from the sensor, which is equivalent to a fixed-orientation light source illuminating a hemisphere of an equal radius centered about it. This detection hemisphere setup is used in COMSOL and ZOS numerical models.

III. The Design Pipeline

A. Generating Optimization Targets

The most characteristic aspect of an OAK reflector is its lighting intensity distribution along the C0-C180 photometric arc (its projection onto the luminaire plane is orthogonal to the largest luminaire dimension. Intensity distribution optimization along this arc is thus the primary objective.

Wolfram Mathematica was used to generate target photometries. An initial intensity distribution along the C0-C180 arc was imported from COMSOL after tracing rays for an initial geometry. The distribution was then deformed such that it conformed to what the client had envisioned– this was done by mapping shaping functions over the distribution, while conserving total power.

The developed code and the editing process were set up in a way that allowed live fine-tuning of targets, which significantly reduced the effort for both UL and Vizulo, since real time feedback between either party decreased the number of iterations needed to arrive at the desired target distribution. The target was then exported to COMSOL.

B. Ray Tracing

The characteristic dimensions of luminaires and their optical system elements by far exceed the visible light wavelengths, so propagation of light is modelled in the geometrical optics approximation. Thus, the method of choice is ray tracing. Non-sequential tracing is used, wherein no predefined paths are assumed for rays.

COMSOL Multiphysics Ray Tracing module is based on Hamiltonian optics and the finite element method (FEM) [1,2]. The ray tracer is time-dependent and employs a Monte-Carlo approach. First, grids with a preset number of ray release sites are initialized on LED active surfaces. Second, ray wave vector space is discretized over a controlled number of azimuthal and polar directions at each release site. Wave vectors are then randomly sampled from the imported LED spatial intensity distribution, wherein greater intensity in a certain direction implies greater probability that the wave vector of a given ray will be initialized in that direction. Upon release, light source power is distributed among rays[2].

To initialize ray release, one must mesh the surfaces that the rays are released from or interact with, as well as refracting domains. Once the release is initialized, the initial ray coordinates $\vec{q}$, wave vectors $\vec{k}$ and transmitted power are passed as initial dependent variables to the ray tracer, which solves a system of Hamilton equations [2]:

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = -\frac{\partial \omega}{\partial \vec{q}}; \quad \frac{d\vec{q}}{dt} = \frac{\partial \omega}{\partial \vec{k}}; \; \omega = \frac{c|\vec{k}|}{n(\vec{q})} \qquad (1)$$

where c is the speed of light in vacuum, n is refractive index, which, in general, is a function of position within the medium (gradient index or GRIN media). The advantage of FEM-based ray tracers is that refraction index variations can be precisely captured and accounted for with flexible FEM meshing. Moreover, this kind of ray tracer can be seamlessly integrated into any other FEM simulation with compatible physics. For homogeneous media, such as air and glass in the present system, the equations (1) reduce to:

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = \vec{0}; \quad \frac{d\vec{q}}{dt} = \frac{c}{n|\vec{k}|}\vec{k} \qquad (2)$$

In addition to 6 dependent ray variables directly handled by the tracer, the set of auxiliary ray variables includes 1 initial (S_{init}) and one current (S_0)0-th Stokes parameter (the other 3 pairs are identically zero for unpolarized light). S_0 represents power currently transported by a ray. One also has 2 initial (r_{01} and r_{02}) and 2 current (r_1 and r_2) principal radii of wave front curvature, which govern the evolution of the wave front given by the ray set [2].

In between collision events, S_0 for each ray is related to equations of motion (2) as follows:

$$S_0 = S_{init}\frac{r_{01}r_{02}}{r_1 r_2} \qquad (3)$$

$$\frac{dr_k(s)}{ds} = -1; \; r_k(0) = r_{0k}; \; k = 1, 2 \qquad (4)$$

where s is ray path length traced since the previous collision or release. Negative r_k indicate that the wave front is locally expanding, while positive values indicate convergence [1,2].

Transitions between regions where there is a jump discontinuity in refractive index and collisions with opaque boundaries are handled via vector form equations that govern specular reflection and refraction directions:

$$\vec{e}_r = \vec{e}_i - 2\vec{e}_i \cos\theta_i \qquad (5)$$

$$\vec{e}_t = \mu\vec{e}_i + \gamma\vec{n}; \; \mu = \frac{n_1}{n_2}; \; \gamma = -\mu\cos\theta_i + \cos\theta_t \qquad (6)$$

where $\vec{e}$ are unit direction vectors and indices i, r, t stand for incidence, reflection and transmission, respectively.$\vec{n}$is the surface normal vector and θ are angles between $\vec{e}$ and$\vec{n}$[2]. The angle of refractionθ_t in (6) is given by the Snell's law. n_1 stands for the medium of incidence, 2 – the refracting medium.

Auxiliary variables are reinitialized during each ray/boundary collision event. Power redistribution coefficients for reflection and transmission of linear polarization components parallel and perpendicular to the ray incidence plane (given by $\vec{e}_i$ and $\vec{n}$) are used as (squared) multipliers to update S_{init} and are computed from Fresnel equations. Ray power loss at opaque boundaries is determined by reflection coefficients of surface materials – S_{init} is simply multiplied by its squared value. The changes inr_{01} and r_{02}due to interactions with boundaries are updated based on their latest values using the Stavroud is method[2,3].

Collision detection is resolved by numerically solving equations given by geometry shape functions (interpolated over mesh nodes) with respect to incoming ray coordinates [2].Precision increases with mesh quality, reciprocal solver time step size and reciprocal wall tolerance. Here, linear shape functions are used for flat surfaces and curved boundaries are approximated with quadratics.

Glossy reflector surfaces reflect rays diffusely, which is implemented as follows: when a ray/boundary collision is detected, a random number between 0 and 1 is generated from a uniform distribution – if it is greater than the diffusivity coefficient, specular reflection occurs according to (5), otherwise the ray is reflected diffusely, in which case a random wave vector is sampled from the Lambert cosine distribution (or a user-defined anisotropic model) and assigned to the reinitialized reflected ray, which then propagates normally according to (2) [2].

For GRIN media, the set of linear partial differential equations (1) governing the motion of every ray are converted to a set of linear ordinary differential equations using FEM, which are then solved using lower level numerical methods. In case of homogeneous media, equations (2) can be integrated immediately. Generalized Alpha method was chosen for time stepping, generalized minimum residual (GMRES) method plus Jacobi method were used to update ray tracer variables for each time step. Based on model dimensions, a maximum ray propagation distance is set so that all sufficiently intense rays reach the detector. Solver accuracy thresholds are defined and ray intensity thresholds for reflections at the glass plate boundary are set to avoid initializing and tracing secondary rays of negligible intensity. An upper limit for secondary rays generated via multiple reflections is also specified. Thresholds and solver parameters are then optimized using benchmark simulations to improve performance without neglecting important effects.

Rays that reach the detection surface deposit power onto mesh elements and are excluded from the next solver time step. Power deposited at detector elements is divided by their areas, yielding local intensity [2].Moving average smoothing is performed across the detector. Averaging window (spherical)size is determined by mesh size and ray density. Averaging and mesh settings are chosen such that high frequency noise is filtered out without removing physical features in the intensity distribution.

C. Optimization

Reflector shaping technology available to Vizulo is such that free shape optimization cannot be performed – instead, wing bending can only be done at 1 to 3 symmetric bending sites per wing, (see Fig.1). However, this simplifies the optimization model setup, since one can use luminaire symmetries and explicitly parametrize the geometry. Due to technical reasons related to assembly, the lower part of reflector geometry, including LED placement, remained unchanged. By projecting the wings onto the side reflector plane, one can define 6 optimization variables – two sets of bending site coordinates (blue lines in Fig. 1) in the side reflector cross section and 2 wing tip coordinates (designations shown in Fig. 1).

Here, one must consider two constraints: first, reflector wing total length may not exceed an upper limit (too much material used per reflector unit) or fall below a certain threshold (shorter wings are more difficult to shape); second, optimization variable domains must be such that wing boundary collisions or overlaps do not occur. The goal of the simulation is to match the C0-C180 luminaire photometry as closely as possible to the target defined by Vizulo engineers. Target distributions and solution intensity profiles are in the form of a discrete set of coordinate, time and intensity values – this means that the objective function that must be minimized is the sum of squared differences between the two set nearest neighbors. Secondary objectives (more photometric planes, energy efficiency, etc.) can be integrated and controlled via weights in the sum of objective functions. The problem is then as follows:

$$\min_{\vec{x}} \sum_{i,k} g_k (I_{ik}(\vec{x}) - I_{0k})^2 \tag{9}$$

$$\sum_k \sqrt{(w_k - w_{k-1})^2 + (h_k - h_{k-1})^2} \in [L_{min}, L_{max}] \tag{10}$$

$$x_k \in [a_k, b_k] \tag{11}$$

where I is lighting intensity for a given solution point (i index) or a target point (0 index) for the k-th objective, g_k are objective weights, $\vec{x}$ is the optimization variable vector, a_i, b_i and L_{min}, L_{max} are simple bounds (11) and general constraint thresholds (10), respectively. Initial conditions can either be taken from a set of known experimentally tested configurations, or from a set of feasible ray trace solutions obtained via Monte-Carlo sampling of the design space (COMSOL).

COMSOL is equipped with several optimization algorithms, both gradient-based and gradient-free. For the problem outlined above, gradient-free optimization is performed. Also, while the design space (6 dimensional) is concave, it can be argued that feasible initial configuration points have line of sight to most of the design space. Thus, three optimization approaches were tested: coordinate search (based on [4], chapter 7), Nelder-Mead (based on [4], chapter 8), constrained optimization by linear approximation (COBYLA, based on [5]), which are the most suitable among the arsenal provided by COMSOL Multiphysics [6]. Nelder-Mead and coordinate search were tested with both Lagrange multipliers and penalty-based constraint handling (COBYLA uses its own penalization algorithm [5]).

COMSOL allows for detailed tuning of optimization solvers settings, the most important ones being optimization variable scales and optimality tolerance. Variable scales, in addition to normalization, allow one to control how the algorithms traverse the design space. The above-mentioned algorithms are set to automatically terminate and return the best solution if no improvement over the current best objective function value can be found when variable step (or simplex size) becomes less than the product of variable scale and the optimality tolerance [6]. This makes the optimization process predictable and controllable by the user.

IV. Optimizing Reflector Shapes

First, benchmarking both with reduced and full sets of optimization variables was performed for the optimization algorithms to determine the most suitable for the above defined problem.

Tests indicate that COBYLA consistently outperforms Nelder-Mead – both generate very similar optimal reflector configurations, but COBYLA requires much fewer iterations and is less sensitive to variable scaling. Lagrange-based Nelder-Mead was very difficult to stabilize and even then, required many more iterations than the penalized version. Coordinate search (expectedly) performs worst of all. For the latter two approaches, forced termination was often required. Thus, COBYLA was used to optimize all OAK luminaire variants.

Further tests show that COBYLA is robust enough to reach targets even from significant distances in the design space, and optima found from different initial conditions were in good agreement. It should be noted that constraint compliant optimal configurations with identical objective function values were not encountered during tests, including design space sampling (Monte-Carlo or uniform grid “brute force”).

Once the optimal settings for COBYLA were established, the now complete optimization pipeline was applied to initial Vizulo reflector designs. Fig 2. illustrates initial and optimized photometries of OAK luminaire Narrow (a,b), Medium (c,d) and Wide (e,f) models. The Narrow variant was designed to deliver intense, focused illumination; Medium was conceived as a versatile light source with moderate coverage; Wide was intended for sideways focused illumination and maximum area coverage.

Narrow intensity distribution had to be made more focused and stretched out along the C90-C270 arc (orthogonal to C0-C180), Medium was to illuminate the region designated in Fig. 2c more homogeneously, while Wide illumination area had to be extended along the C0-C180 arc, while focusing more power at the edges of the illuminated area (Fig. 2e). As seen in Fig. 2b, 2d and 2e, all objectives were successfully accomplished, which was verified by photometric measurements performed at the Baltic Research Center lab with assembled optimal luminaires.

After designing a number of prototypes with various reflector coatings and LED placement patterns, it was noted that all optimal reflectors had a monotonously diverging wing shape, which allowed to impose additional, stricter constraints on the 6 optimization variables, resulting in better wing span constraint compliance, fewer iterations to optimum and shorter target-to-prototype times. On average, it currently takes 8-12 hours of optimization (about 45-60 iterations) to obtain a functional design. In fact, tests indicate that desired optima, if physically exist, could be reached from any feasible starting configuration within 2-3 optimization rounds even with deliberately unrealistic initial configurations.

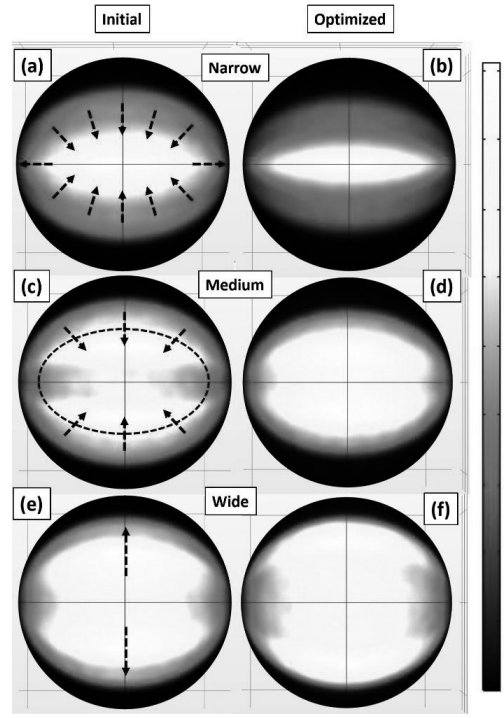


Fig. 2. Initial (a,c,e) and optimized (b,c,f) light intensity distributions over the detector hemisphere for Narrow (a,b), Medium (c,d) and Wide (e,f) OAK luminaire models. Dashed black arrows represent the desired deformation directions for intensity distributions.

V. Benchmarking ZOS and COMSOL

A. Ray Tracing Benchmark

ZOS is a specialized optics simulation software, offering a much greater variety of tools for ray and optical system analysis than COMSOL, as well more extensive libraries of materials, coatings, surface scatter functions, LED source functions etc. In the present study, ZOS models, like COMSOL, are run in non-sequential ray tracing mode. It must be noted that methods that are used for ray tracing in ZOS are not disclosed by its developers.

To compare the performance of COMSOL and ZOS, one needs identical benchmarking conditions. Both programs record data on detectors and post-process it differently. The hight unability of COMSOL allowed to reduce the implementation differences my mimicking ZOS features. Those that could not be replicated were disabled. Tests were run with identical luminaire geometry, mesh, light sources, material properties and number of rays. All post-processing features were switched off.

A variety of ray detector types can be set up to gather ray data and statistics. In this case, Detector Polar provides the most convenient way to measure intensity distribution, but, as seen during benchmarking, its working principle has considerable shortcomings. Mesh generation for the detector is controlled by specifying numbers of radial and azimuthal segments [7]. Since mesh size gradient cannot be controlled, overly fine mesh segments are generated right above the luminaire, which produces unphysical oscillations and anomalous intensity peaks in computed intensity distributions. This occurs because element intensity equals to deposited power normalized by element area, so relatively small contributions may be greatly amplified at very small elements, while neighbor elements with few ray hits yield contrasting minima.

Results indicate that the optics-oriented Zemax ray tracer by far outperforms COMSOL's generalized solvers. Both packages yield benchmark results that are in very good agreement (Fig 3.). Studies suggest that ZOS solves the benchmark about two orders of magnitude faster than COMSOL, on average. If optical elements are introduced and scattering/absorption is enabled, ZOS solution times increase quite significantly, as expected, but so do COMSOL's, and ZOS's advantage persists. It should also be noted that in this case COMSOL required at least 12 Gb of memory for good solution accuracy, whereas ZOS hardly used memory at all. However, this can be circumvented by solving problems over multiple ray release times.

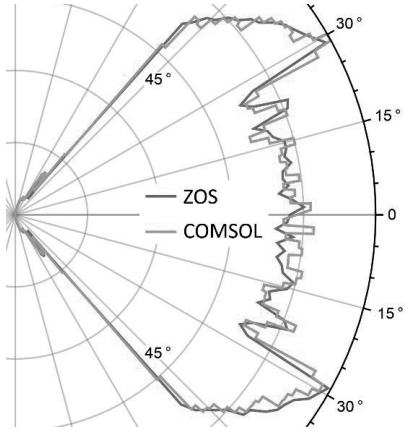


Fig. 3. Results of a typical COMSOL versus ZOS ray tracing benchmark. Note the blue curve representing ZOS – it has a minimum interpolation order 1, while COMSOL (orange) can use interpolation order 0. Other than that, all other settings were identical.

B. Optimization Benchmark 1

The following optimization algorithms are available in ZOS: two local – Damped Least Squares and Orthogonal Descent; two global– Global and Hammer [7]. Principles and implementations for each method are not explicitly stated or referenced by ZOS developers. Global algorithms are used in this work, mainly because the locations of optima within the design space are usually not *a priori* known even approximately and, unlike COMSOL, ZOS cannot perform Monte-Carlo sampling of the design space in the non-sequential tracing mode.

In the current release of ZOS, it is not possible to set up targets as a data or photometry files. Instead, preset objective functions that compare detected intensity against a prescribed value [7] had to be assigned to the detector element-by-element. Exploiting a pattern in element ordering [7], target generation and formatting for ZOS was automated using Wolfram Mathematica.

A significant issue with ZOS's optimization algorithms is their constraint enforcement implementation, which uses linear penalty functions [7] – this allows constraints to be easily violated, unless heavily weighted. High penalty weights, however, makes the algorithms focus on feasibility rather than optimality.

Once the problem wa sset up, an optimization algorithm had to be chosen. No information abou tthe settings was supplied, nor could they be edited. Thus, it was not very clear how the algorithm covered local or global design spaces, and when its termination criteria were met (or what they were).The user is given very little feedback from ZOS: only the 10 best objective function values, the number of explored systems, optimization cycles, as well as elapsed time are displayed.

Optimization Benchmark 1 was an OAK luminaire with fixed geometry and a variable shape lens inserted instead of the default glass plate. Lens profile was formed using a quadratic polynomial and set up to be controlled by a single parameter. A sample luminaire configuration and two possible lens shapes are shown in Fig. 4.The objective was to find the lens shape parameter such that the resulting optical system yields a photometry as close to the target as possible. Targets were generated by tracing rays for specific lens parameter values.

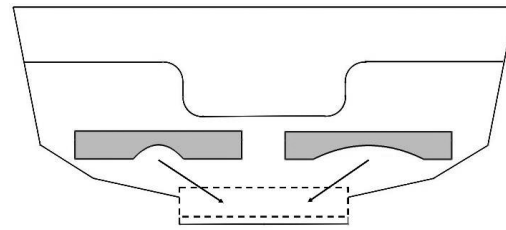


Fig. 4. The geometry used for Optimization Benchmark 1. The dashed black contour indicates the location of the lens. Two possible lens shapes given by different optimization variables are shown above it. Only the lens shape, controlled by a single parameter, is affected by the optimization process.

Constraints were imposed to avoid unrealistic lens shapes. An important ZOS disadvantage was noticed immediately – it required a very high number of optimization iterations. Even though it very clearly outperformed COMSOL in ray tracing, here the advantage was lost completely. Reducing ray tracing quality to speed up the process was only viable up to a certain threshold, since Monte-Carlo based ray tracing relies on sheer ray numbers to approximate the actual physics, so the impact of lower ray density on objective compliance is detrimental and simulations may yield inconsistent results.

For this reason, to simplify the benchmark and gather more statistics faster, scattering and absorption were disabled, and the number of rays was optimized to

distinguish only the main photometric features of the system. It is not yet clear exactly how the number of used target detector elements affects ZOS solution time, but it is presumed that the effect on solution time might me noticeable(this is even suggested in [7]) due to overhead produced by many objective function updates for each of thousands of iterations.

This benchmark is not at all trivial – as evidenced by brute force design space sampling, the case exhibits an oscillatory objective function map. While there is a global minimum, two more local minima are in proximity. This, while being a simple parameter case, simulates the problem encountered during actual reflector optimization – while unique optima have been observed, they are not always high-contrast.

Solving this case using ZOS Global Optimization algorithm required ~ 2100 iterations or ~ 5h to find the global minimum. One of the neighboring local minima was found in ~ 700 iterations or ~ 2h.In practice, it yields a photometry that is very similar to that of the global optimum.

This benchmark was also run with COMSOL's COBYLA and Nelder-Mead algorithms. The process, on average, required about as much time to optimum as ZOS, but the number of iterations was drastically different: 1000-2000 for ZOS versus at most 17 for COMSOL. Moreover, by tweaking COMSOL settings, one could predictably reach certain results. For ZOS algorithms, it has been observed that they tend to spend too much time in certain areas of the design space, being effectively idle. It was also noted that if the constraints were violated, ZO Soften did not return to the feasible domain and continued with out-of-bounds sampling.

C. Optimization Benchmark 2

Next, the authors tested ZOS by running actual OAK reflector optimization, having previously studied the case rather extensively using COMSOL. Due to insufficient CAD design capabilities of ZOS, geometry was manipulated with SOLIDWORKS through Live-Link. Here, ray scattering and absorption were enabled. First, preliminary tests, wherein some of the variables were fixed, were carried out. Global Optimization for 3 variables converged successfully within 1000-3000 iterations (11-34 hours).

With 6 variables, the progress rate decreased drastically. Of all optimization runs, only one terminated successfully but resulted in an unfeasible solution after more >7000 iterations or ~ 85 h. As seen in Fig. 5, the ZOS solution, highlighted with a dashed red line, has an unacceptably large reflector length, although the photometry is somewhat close to the target. Note the COMSOL solution, labeled with a dashed blue line, which is very close to the upper wing span limit. COMSOL started from an identical initial reflector and successfully reached the target within 10 hours.

Unfortunately, ZOS simply does not provide adequate controls and means of monitoring without modifications or cumbersome coding within ZOS environment, which precludes improvements to results. As such, the authors are left with the solution as it is seen in Fig. 5.

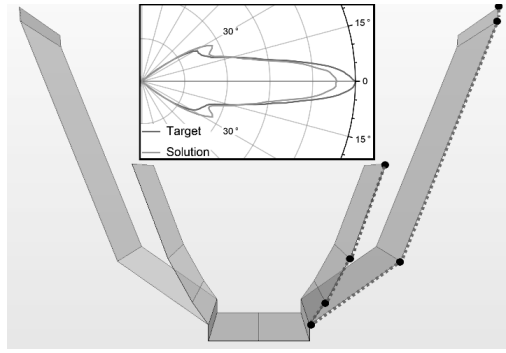


Fig. 5. ZOS (dashed red line) and COMSOL (blue) solutions to Optimization Benchmark 2. ZOS solution's wing span is much greater than that of COMSOL's, which is very close to the upper wing span limit.

VI. CONCLUSIONS

The developed luminaire design framework allowed to automate most of the pre- and post-processing routines, eliminating human operators from most of the pipeline, and its optimization models are efficient enough to produce a functional design in a matter of hours, largely due to COMSOL's robust optimization algorithms and highly customizable models. A series of optimal luminaire prototypes with various reflector coatings and LED configurations has been developed and deployed to market.

Benchmarking results indicate that OpticStudio clearly outperforms COMSOL in ray tracing, being about two orders of magnitude faster. On the other hand, COMSOL's optimization capabilities proved to be superior, with significantly less iterations to optimum and better stability. As such, OpticStudio would be the choice for simulating complex optical systems design testing, since it also offers a much broader spectrum of optics analysis features. For optimization of systems with many design variables and nonlinear constraints, from initially bad or arbitrary designs, however, the developed COMSOL-based framework would be recommended, owing to its high degree of customizability and robustness, as well as detailed documentation. Another factor to consider is pricing.

Disclaimer: the authors of this manuscript do not in any way endorse or represent Zemax, COMSOL or Vizulo.

REFERENCES

[1] L.D. Landau and E.M. Lifshitz, The Classical Theory of Fields, 4th ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 1975.

[2] COMSOL Multiphysics Ray Optics Module User's Guide

[3] O.N. Stavroudis, The Optics of Rays, Wavefronts, and Caustics, Academic, 1972.

[4] A.R. Conn, K. Scheinberg, and L.N. Vicente, Introduction to Derivative-Free Optimization, MPS-SIAM Series on Optimization, SIAM, 2009.

[5] M. J. D. Powell "A direct search optimization method that models the objective and constraint functions by linear interpolation," in Proc. Sixth Workshop on Optimization and Numerical Analysis, vol. 275, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL, 1994, pp. 51–67

[6] COMSOL Multiphysics Optimization Module User's Guide

[7] Zemax OpticStudio User Manual

[8] COMSOL Multiphysics Reference Manual

PV Energy Sharing

A. K. Dey
Process, Energy and Environmental Technology Station,
University of Johannesburg
Johannesburg, South Africa
kdey@uj.ac.za

***Abstract* — Harvest combined energy distribution system is an important part of power regulator scheme in delivery of electricity with efficient way. The aim at investigating how renewable energy distribution can increase the efficiency of energy sharing frameworks in power network by modelling households interactions and providing integrated model for uninterrupted power source. This advance Energy based technology delivers a logic methodological structure to receive at convincing integrated solutions to compound energy difficulties, by implementing a holistic, system-based approach. Therefore, research and development activities are being required to automate the electric power sharing system utilizing with advancements in the area of control system and energy management technology. The optimum allocation of sharing energy will depend on the target function used to evaluate the different options.**

Keywords— PV solar, energy, integrated system, power sourcec and demand.

I. INTRODUCTION

The target function can comprehend both technical and logical aspects. Integrated group of demand node energy storage & sources Systems is a comprehensive and flexible concept used of how to look at all facets of energy within a community. By means of its adjustment, innovative systems are will to accommodate power sharing technology of a multi-objective optimization method to simultaneously address and quantify the trade-offs among competing objectives, energy consumption, and system optimization. The optimal utilization of the energy requirements of a group of demand node this optimum should be seen in the scope of energy efficiencies aspects. Energy demand that require continuous and highly reliable service may rely on internal generation to supply load demand in case of service interruption, i.e. they can operate as a mutual agreement. This system can be described as a development of the concepts of energy sharing and combined source grouping. The aim of the technique is to find a combine integer optimization scheme for the implement of a single mathematical model to provide all possible power system alternatives within the superstructure, beside with appropriate clarification algorithms and an optimization under uncertainty strategy to study the impact of control technology over long term horizon on the energy consumption/efficiency impacts of sharing system. This structure has decentral controlling characteristic that is responsible for regulate all other energy sources and battery storage unit.

II. SYSTEM METHODOLOGY

The concept of power optimization in individual sources can be extended to multiply discrete sources. This means power transfer form one source to another sources is regulate between two buildings using identical controller and similar distribution manner. The power might be produce one site or can be request from other site according to demand of the power in this power network. Considering optimization between two battery banks is also share or exchange power from one to another storage unit using automated switching scheme. Let's consider state of charge (SOC) of both batteries are specified as $Q_{soc1} \geq Q_{soc2}$, the scheme may be connected battery pack number 1 with Q_{soc1} to the common bus at no load, on the other side battery pack number 2 connected with Q_{soc2} to the common bus at small load. When the load increases, there should be a transient voltage drop on the DC bus and it is easy to compare bus voltage with the open circuit voltage of the battery banks not connected to the main dc bus. When bus voltage drops down the set voltage of a battery pack, it needed to switching to the dc bus. When load increases, there is a bus voltage drop down due to the increasing discharge current and voltage drop is defined by $(V_{bus,a} - V_{bus,b})$ where $V_{bus,a}$ is indicate prompt voltage value of the bus before voltage drop occurs and $V_{bus,b}$ is indicate the prompt voltage value after voltage drop occurs. On the other side let's consider voltage difference is defined by $(V_{PV} - V_{bus,b})$, where V_{PV} is indicate sources voltage from PV solar panels not connected to the load. The first threshold, θ represent the minimum require voltage drop on the dc bus $[(V_{bus,a} - V_{bus,b}) > \theta]$ while a second threshold, φ represent minimize required voltage drop on the dc bus $[(V_{PV} - V_{bus,b}) > \varphi]$. For medium load, switches of the battery banks with a lower voltage of the SOC may not be closed.

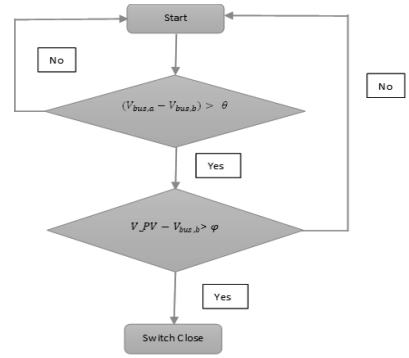


Fig. 1. The algorithm to close the switches

When there is no load, the battery connected to the dc bus, which has the maximum state of charge. This means bus voltage is not require more than the set resting voltages of other batteries which have lower state of charge and switch off from the dc bus has higher set resting voltage than bus voltage and voltage different is greater than φ, it will

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

reconnected to the dc bus and source current to the battery with maximum charging priority.

For this, there will be a need of good integrated coordination control and better as well as bigger interlinks between different power source connection (shown in fig. 2). We can consider combined PV solar system = (PV potential per load)/(Total PV load) × penetration level of power. The micro scale power production capacity of solar PV solar energy sources are making this favorable for sharing electricity and PV Solar and battery storage energy will play major role in share power. The energy source & demand load balances incorporate contributions from the individual power generation technologies.

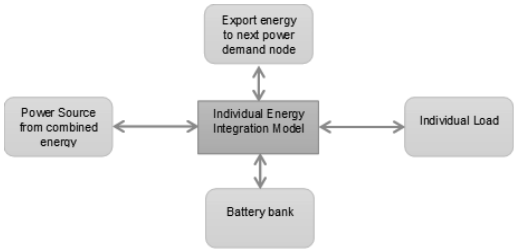


Fig. 2. Inter connection among power source node model

Each individual source can meet its electricity demand by the combination of PV solar, wind turbine and battery storage option. Let's assume a power sharing system contributing n = 1…… N electricity users. The system operation has been approximated into time periods indexed by t. Then we can consider that energy searing individual house base on power consumption and power harvesting. The difference between the harvested energy and consumption energy is $\partial E = E_{ht} - E_{ct}$. Every household owns an energy storage unit. Regarding the storage unit of user n, its state of charge at the beginning of slot t is denoted by S_{nt}, whereas B_{nt} is the charging amount over period t. The latter is positive when battery n is being charged over period t. The energy storage units are considered ideal and operated at unit power factor. According in vector (B_t, S_t), the battery dynamics are described as:

$$S_{t+1} = S_t + B_t \text{ (for individual household)} \qquad (1)$$

This methodology is combination of integration of PV solar and battery charge and discharge facilities within a certain power node arrangement, e.g. energy share. The individual energy source faces a deficit of power it will send a massage to request for supplementary power either to the next energy source or grid [1].

{
Alarm appear,
'input': power _ request,
'SorceName': name,
'PowerAmount': unit,
}

Next step will be receive massage from following power source and agrees to grant the energy appeal.

{
'input': power_request_decline (then go to next source),
}

Refer next to power source

{
'input':power_request_accepted,
'Power': executed,
}

This methodology is combination of integration of PV solar and battery charge and discharge facilities within a certain power node arrangement, e.g. energy share. The individual energy source faces a deficit of power it will send a massage to request for supplementary power either to the next energy source or grid.

{
Alarm appear,
'input': power _ request,
'SorceName': name,
'PowerAmount': unit,
}

Next step will be receive massage from following power source and agrees to grant the energy appeal.

{
'input': power_request_decline (then go to next source),
}

Refer next to power source

{
'input':power_request_accepted,
'Power': executed,
}

For individual power source from Solar PV is converted into to supply loads. In order to appropriately utilize the power sources and maximum peak wattage should be estimated. Below equation estimate the entire peak wattage in a daily energy consumption and effectiveness of the scheme:

$$W_p = E_{consum} / H_p \eta_{sys} \qquad (2)$$

where W_p - peak wattage of the system, η_{sys} - efficiency of the system, H_p - peck hour, E_{consum} - total energy consumption.

Using this method, negative impact for the power production from the scheme or configuration will be known ensuring the demand load running consistency. The logic control used to regulate if the supplemental current need to deliver from the storage compares the load current to energy sources. If the power source is not available due to cloud day then current is set to a lower value (or emergency operation) to help sustainable major operations. While the battery power source is connected to the load, so current is set to a maximum value to assists peak power regulator. The same methodology is applied for load current restoration threshold mix current off state, which is used to restore non-critical loads that should shed. If there is no power from power sources, then maximum current is set to delivery supplementary current from the battery storage to shedding any crises load. The emphasis in this project to regulate the energy and distribute using optimal energy exposition show in flowchart, fig. 3. The power demand from each load are meet by the mutual and collective use of a pool of energy deliver alternatives, energy sources availability depends to the hourly average probability of power source in each hour

to meet the demand in that time [2]. We consider the storage energy supply that needs to serve the power demand responsibilities generated by an individual of households. In the power demand requests are generated continually by power users and arrive at a central controller at the different PV source according to an energy flow rate process. These considerations are motivated for mathematical manipulability as it's enables the derivation of the optimal strategy.

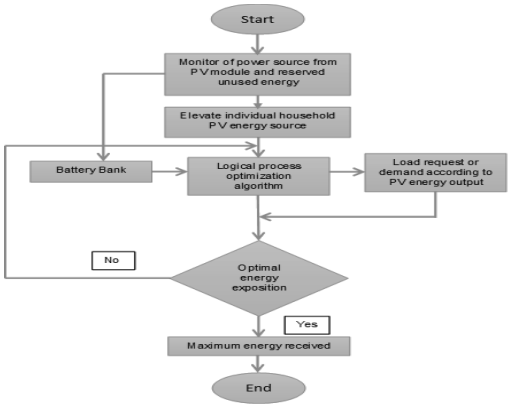


Fig. 3. Combined (PV & Battery) optimal energy configuration for individual power source node

Lets consider that the power demand from individual load (demand point) P_{hn} where *n* is a random variable for discrete probability distribution on set:

$$\{P_{h1}, P_{h2}, \ldots, P_{hm}\},$$

With associated probabilities: $A_{h1}, A_{h2} \ldots, A_{hm}$.

Random variables P_{hn}, are independent from power allocation for individual house. Where P contribute random power requisite from demand load. So the total expected power requirement of a demand load is:

$$E(P_n) = \sum_{k=1}^{m} P_{hm} A_{hm}. \qquad (3)$$

Therefore the battery resource availability is thus either the probability of a suitably sized available hybrid solution in individual load demand unit (shown in fig. 4). Since both solar PV and battery bank are intermittent sources of power, it is highly desirable to incorporate energy capacity into such combine power systems. In a certain sense, storage battery bank can be deemed as a buffer to balance the supply and demand relationship. When the power generated by PVs exceeds the load demand, the Power deficit from individual source with the condition of $P_{battery-min} = P_{PV-min}$. Compute power flow calculation from one source to another if the battery charge by PV solar panel with individual household power source [3].

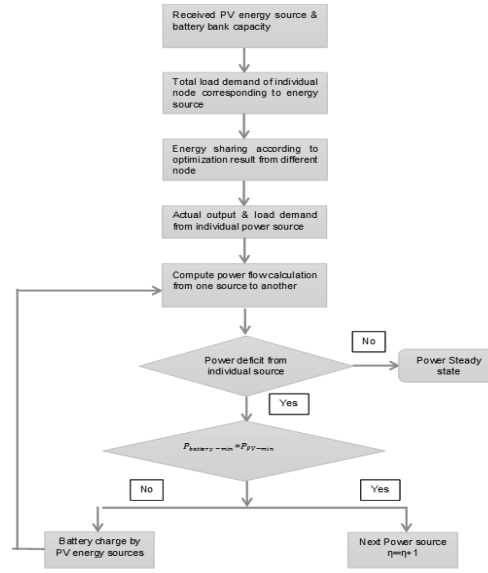


Fig. 4. Flow chart of real-time power control system (η=number of power source)

III. POWER SHARING

The energy supplied to the next households will help the consumer to earn credits by the net-metering feature of the smart meter. The Smart power Meter will measure energy flow in both directions in real time to allow hour basis monitoring system. Limitation 'x' indicate the battery charge level will always be should not be less than zero and not greater than the battery maximum capacity. Similarly constraint 'y' means a particular home can only get energy from next household sources and total amount of charge passing through on source to another source, consider as discharging rate is 'i'. Individual constraint 'e' energy is enough power for self-sustainable each house with n number of houses. $E_{i(n)}$ is determined by consumers total power consumption. We can adjust the by the central controller by choosing proper energy sharing household pairs is $ES_i(n)$ and allocate the amount of energy for individual house can get $EA_i(n)$. So we can write the equation:

$$ES_i(n) + EA_i(n) > E_{i(n)} \qquad (4)$$

Where λ is the load parameter vector (1ø), (V,λ) is the real-time measurement function vector and r is the random measurement error vector [04]. The measurements available in power sharing systems normally include voltage magnitudes, current magnitudes, branch real and reactive power flows and reactive power transfer measurements. With the help of clock synchronization using smart meter, voltage phase angles can also be measured at individual power sources. Based on the types of measurements, the individual power measurement function can be represented as follows (shown in fig. 5).

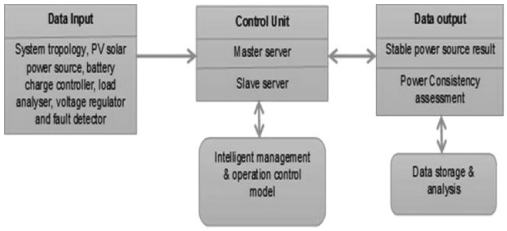


Fig. 5. Power consistency assessment of power sharing system

Current magnitude measurement from source h_1 (household number 1) to source h_2 (household number 2):

$$|I_{h1-2}| = R_I(\mathrm{V},\lambda) = \sum x_{h1.h2}(V_{h1} - V_{h2}) \quad (6)$$

Where $x_{h1.h2}$ is the difference source admittance matrix. Real power flow measurement from one source over particular stage:

$$P_{h1.h2} = V_{h1} I_{h1-h2} \quad (7)$$

So total power transfer from one source to another source:

$$P_{t(h1.h2)} = V_{h1} \sum x_{h1.h2}(V_{h1} - V_{h2}) \quad (8)$$

The load estimation for individual source can be considered as an inverse problem with respect to the power flow problem. Because of technical restriction, there are only limited real-time measurements available for the estimation of the large number of loads sharing systems, which could make the system unobservable. The combined power source & battery power flow control load logic is shown in Fig. 6. PI controller is appropriate for control of current controller. The current controller has a proportional part with a gain (PC) and integral gain (IC), in order to remove steady-state errors [5]. The reference for this controller is generated by the voltage loop of the master. This ensures that the current distribution between the two modules is even, thus improving with unequal load sharing among the converter modules. However any mismatch in the current reference of the two different modules, due to power sending error or delay from master to the slave module can carry to a load sharing error. Because the gain of the voltage loop determines the current reference for the master and slave modules, obviously it effects the dynamic and performance of the load sharing module.

Let's consider at every time t, the harvester (e.g. solar panel) pulls energy from ambient and converts it into electrical power with instantaneous charging rate $P_{pv}(t)$ that incorporates all losses. The energy harvested in the time intermission from t_0 to t_1 is $\int_{t_0}^{t_1} P_{pv}(t)$.

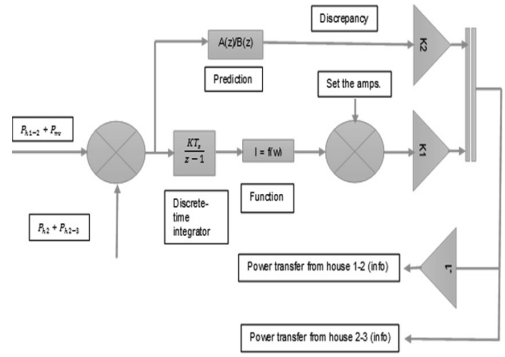


Fig. 6. Control algorithm for power transfer from one household to another resident

We consider that the individual node demands are not constant both in power and time. At a definite time period, individual household could be share and distribute certain amount of energy, on the other hand a demand which needs certain amount of energy from the storage unit. The average power use of individual household on a time interval t where $T = t_0 + \delta t, t_0 + \ldots\tau$. The energy is characterized through average power where a time interval of length δt, we can say $E = P\delta t$.

System estimation: As presented system local grid is based on sharing the power outputs between multi-sources, the system need to estimate terms that are involved in the distribution process. So the total required power by all individual power sources at any time:

$$E_i(t) = \sum_{i=1}^{n} p(i).$$

Where n is the number of power sources in the system, $p(i)$ is power required for individual power sources.

In order to sharing the power to the allocated of each node the sharing factor (SF) for individual household is estimated as below:

$$SF(i) = Q(i)/P_{max}.$$

Maximum output power (P_{max}) could be cover mutually power demand, so we need to estimate the normal available power to be distributed to individual sources. The available power need to be distributed to individual households $P_{in}(i)$, so the power status of the individual households is:

$$P_{in}(i) = [SF(i)\ \xi\ P_{max}] - [Q(i) - p(i)].$$

At the end system based on the generated power and the available power estimated how to sharing the energy mutually.

IV. CONCLUSION

The energy efficiency system considered in this article has the capability to integrate the PV energy source. A distributed power sharing framework for PV solar based on an integrated system was implemented, where individual household can receive uninterrupted power source. This control strategy will assist to share energy among different power sources. In future this methodology will open other research opportunity to some interesting extensions, including discovering and compare with other energy sharing frameworks.

REFERENCE

[1] JLR Pereira, S Carneiro and PAN Garcia "voltage control devices models for distribution power flow analysis" power system IEEEvol 16. Number:4, pp.586-594, November, 2001.

[2] Probabilistic power flow analysis with generation dispatch including PV resources," power systems, 2013, May vol.28, no 3, pp. 1-9.

[3] Open Sistemas, O.S.Brain, url: https://OBBrain.readthedocs.io/en/stable/about.html (visiting date: 07/01/2019).

[4] Spring Boot url: http://spring.io/projects/springboot (visiting date: 08/11/2018).

Optimal design of induction heating process for hot metal forming of steel blanks

Nacke B.
Institute of Electrotechnology
Leibniz University Hannover
Hannover, Germany
nacke@etp.uni-hannover.de

Dietrich A.
Institute of Electrotechnology
Leibniz University Hannover
Hannover, Germany
dietrich@etp.uni-hannover.de

***Abstract*—Due to growing challenges regarding crash-performance, CO_2 emission as well as increasing demand for lightweight construction, hot forming of car body parts has risen to one of the most important technologies for saving weight of a car body. During hot forming shaped blanks of steel are heated and austenitized at around 950 °C and subsequently quenched for martensitic formation. Currently the heating is realized in roller hearth furnaces which allow only a slow heating and, therefore, limited production. Additionally, due to the indirect heating principle of roller hearth furnaces the energy efficiency is low. Induction heating for hot metal forming offers a big potential to increase the production rate dramatically and also to improve the energy efficiency. Only due to the fact, that the heated parts typically are already pre-shaped and mostly have already holes and cut-outs induction heating becomes a very complex task. The paper describes the numerical and experimental investigation and the optimization of a single-stage induction heating process for hot forming of pre-shaped blanks and gives design rules for an optimized induction heating system.**

Keywords—hot metal forming, induction heating, inductor design optimization, numerical optimization

I. Introduction

Nowadays conventional heaters with oil or gas are mainly used in industry for the heating of high strength steel work-pieces. All of them are working by the principle of heat transfer through the surface. Theoretically, this principle has significant disadvantages and restrictions: limited power density, low speed of motion, large size of installations, originally intensive scale formation on the material surface because of long heating time, environmental pollution. Long time is needed to heat up and cool down these huge installations with enormous thermal losses and high energy consumption. Furthermore, such systems have a huge thermal inertness and require big efforts of service.

Beside all of these disadvantages the benefit of the conventional heaters is the homogeneous heating of the work-pieces. Nearly independent on geometry or pre-forming of the sheets a homogeneous temperature is realized quasi automatically. The heat transfer through the surface leads to an uniform heating over the complete work-piece. This principle of heating requests long heating times which help also to equalize the temperature inside the work-piece by heat conduction. At the same time, this big advantage limits the process variability. An inhomogeneous heating, which is necessary for applying different mechanical properties inside one work-piece, cannot usually be realized. It is mainly connected with big efforts and unsatisfying results.

In comparison with conventional heating methods induction heating offers a lot of advantages, which are mainly based on the principle of direct heating. The heat is generated contactless directly within the heated material. The advantages are theoretically unlimited power density, short heating times, high efficiency, easy and fast process control, low floor space needs, high flexibility in processing, etc.

II. Induction Heating Concepts

Recently different induction heating concepts for hot metal forming were investigated. The potential of continuous heating with longitudinal and transversal flux concepts is analysed in [1,2]. With those heating concepts it is possible to heat blanks up to the Curie temperature. The potential to heat blanks above the Curie temperature is described in [3] using a single side induction coil and in [4] using the concept of a single side induction heater too and examine the influence of a longitudinal flux heating coil on the temperature distribution.

Induction heaters can be used for a single-stage heating of work-pieces. The main advantage of induction heating is the fast and energy efficient heating. But in the case of a necessary holding phase, e.g. after of a fast heating up cycle, induction heating for holding is less efficient. Therefore, induction heating for heating up the work-piece can be combined with conventional heating methods for holding or for equalization of the temperature inside the work-piece.

There are two induction heating concepts for flat material. They differ by the direction of resulting electromagnetic flux provided by the induction coil - longitudinal and transversal flux. Beside the two variants for homogeneous heating also adapted induction heaters for local or inhomogeneous heating of the work-piece are available.

In the frame of the investigated project the longitudinal flux heating concept is used. For longitudinal flux heating an induction coil encloses the material to be heated, like a strip in Fig. 1. An alternating current in the coil provides the electromagnetic field with a flux orthogonal to the cross section of the strip. Due to the electromagnetic field eddy currents are induced close to the surface of the strip which are closed in the cross section of the strip (shown as “S” in Fig. 1).

The depth of this current flow is influenced by different material properties and mainly by the frequency of the coil current. This depth is called penetration depth and is given by

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu}} \tag{1}$$

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

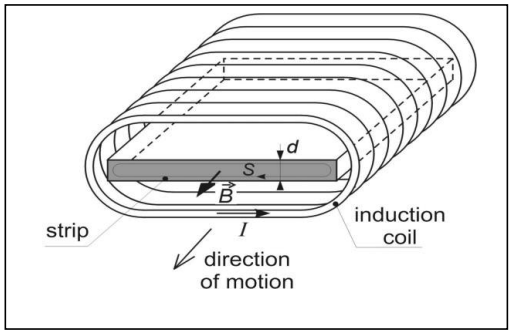


Fig. 1. Principle of longitudinal flux heating

with ρ - specific electrical resistance, μ - permeability and f - frequency. Consequently, the induced current heats up the material by Joule heat.

For nearly flat materials with equal cross-section the longitudinal induction heating concept can be applied, ensuring a homogenous temperature profile. Unfortunately, the application range is limited. If the needed temperature of steel material is above the Curie point (around 760 °C depending on the material), the minimal material thickness which can be heated sufficiently is limited to approximately 1 mm. This is caused by maximum achievable heating frequencies of the power supplies which are below 1 MHz. As the material properties change extremely above Curie point, higher frequencies are needed to get desired penetration depth, which should be at most half of material thickness. However, this effect on the Curie point can be advantageously used for self-controlled temperature limitation at Curie temperature.

III. Investigation of a Single-stage Induction Heating Concept Regarding Discontinuities in the Blanks

In the frame of a research project funded by the German Government an induction heating system was investigated which allows a single-stage induction heating up to temperatures of 950 °C. Detailed studies are described in [5-7]. In this paper the most important results are summarized.

The advantage of single-stage induction heating is that it can work without conventional heating systems and, therefore, is most energy effective. In the hot metal forming process, the blanks are typically heated up to a temperature between 930 °C and 950 °C for AlSi coated and uncoated material resp. between 890 °C and 920 °C for Zn coated material in order to reach the austenitization temperature and to compensate the thermal losses which occur during the transport from the heating system to the press.

The blanks typically have irregular forms. Irregularities are holes, cut-outs or changes in the cross-section. In this investigation particularly holes are taken into account and the electromagnetic and thermal behavior due to these irregularities is shown. Furthermore, different geometrical parameters of the system of the induction coil and the work-piece are investigated and from this investigation design rules for the induction coil are derived.

The investigations are mainly carried out by numerical simulations followed by experimental tests for verification of the numerical results.

A. The numerical model

The induction coil is loaded with an alternating current and the currents in the windings of the coil are surrounded by an electromagnetic field. The field is coupling with the work-piece and induces a voltage in the work-piece which causes a secondary current. This current generates the Joule Heat losses ($P = R \cdot I^2$) in the work-piece which results in a temperature rise. Therefore, induction heating is a direct heating method with the advantages of fast, high energy efficient and possible local heating [8].

For the numerical modeling and calculation, the commercial software package ANSYS 16.2 was used, which is based on the Finite-Element-Method (FEM). The calculation algorithm which is used in the study is divided in two sub-steps. In each iteration step a harmonic electromagnetic and a transient thermal calculation is performed. In order to solve the Maxwell Equation's for the harmonic electromagnetic field the magnetic vector potential is used. The result of this solution is the distribution of heat sources in the work-piece. In the second sub-step the heat transfer equation is solved for a time interval Δt regarding thermal losses due to radiation and convection. The solution of the electromagnetic calculation is the input value for the heat transfer equation. The output value is the temperature distribution. In the next iteration step the temperature distribution is the input value for the harmonic electromagnetic calculation. The material properties such as specific electrical conductivity, relative permeability, specific thermal conductivity and specific heat capacity are adjusted to the new temperature distribution.

For the calculation of the following results a 3-dimensional model is used. Because of symmetry only one half of the system is modeled in order to reduce the calculation time. The induction coil has a rectangle cross-section. For an exact calculation it is important to mesh the edges of the blank very fine. The calculations are based on the material properties of 22MnB5 steel [2]. The reference thickness of the blank is 1.5 mm, because in many industrial applications blanks with a thickness in this range are used. The width of the blank is 200 mm. The width of one winding is 30 mm and the distance between the windings is 10 mm. The coil has 8 parallel windings. The frequency of the current is 400 kHz.

B. Experimental setup

Fig. 2 shows the CAD plot of the experimental setup. The main components are the induction coil (1), the clamping-fixture for the blank (2), the transport unit (3) and the driving mechanism (4). The induction coil is water cooled and attached on an oscillation circuit. The clamping-fixture ensure that the blank does not deform during the heating process. The transport unit can be moved manually or by the driving mechanism. An infrared camera is installed on the transport unit. Fig. 3 shows the situation for the comparison of the experimental and numerical results. There are two paths in x- and z-direction in the sketch at which the temperatures were measured and compared with the numerical results.

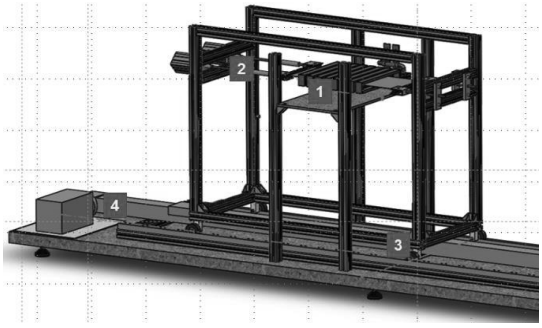


Fig. 2. CAD plot of the experimental setup

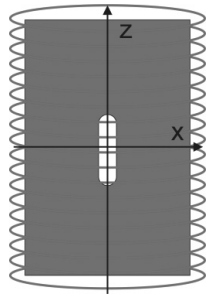


Fig. 3. Sketch of the induction heating system with indication of x- and z-direction for temperature comparison

Fig. 4 and Fig. 5 show the comparison of the temperature distribution in x-direction (Fig. 4) and in z-direction (Fig. 5). The numerical results fit well to the experimental data. The temperature distribution in Fig. 5 has a difference of 4 % at the right side. This is the result of the position of the hole. In the experiment the end of the hole was under a winding. In the numerical calculation both ends were between the windings. This effect is explained later. The comparison of the experiment verifies the numerical results, means that the numerical model is physical correct and can be used for further investigations.

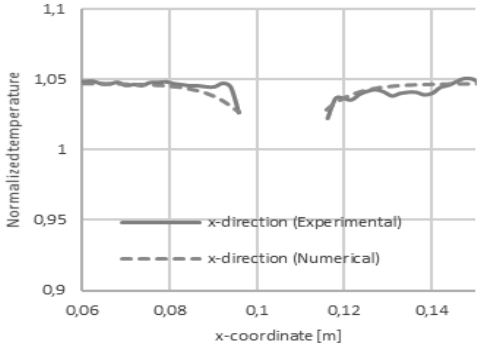


Fig. 4. Comparison of experimental and numerical results in x-direction

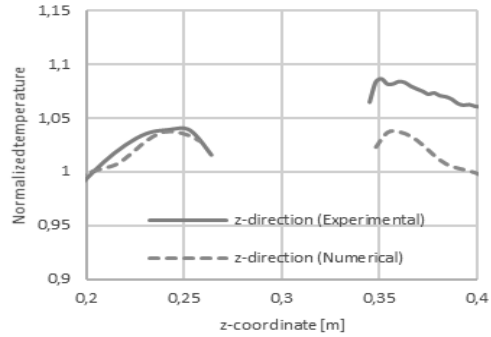


Fig. 5. Comparison of experimental and numerical results in z-direction

C. Classification of components

Blanks which are used in hot metal forming such as a B-pillar have irregular geometries. From the view of induction heating two groups of geometrical discontinuities have to be mentioned. This concerns the outer shape of the blank and local discontinuities. The component spectrum offers three subgroups of outer shapes (Fig. 6): straight blanks (a), curved blanks (b) and blanks with a change in the cross-section (c).

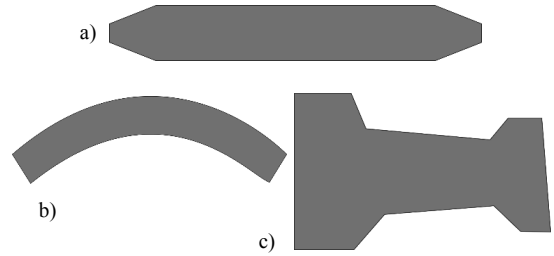


Fig. 6. Outer shapes: a) bumper; b) A-pillar; c) B-pillar

The shapes of the local discontinuities are divided in four sub-groups and are represented in Fig. 7: rectangle holes (a, b), round holes (c), trapezoid holes (d) and cut-outs (e).

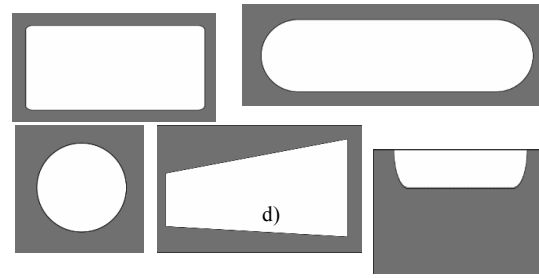


Fig. 7. Discontinuities: a), b) rectangular holes; c) round hole; d) trapezoid hole; e) cut-out

Furthermore, the position of the holes to each other and to the induction coil can influence the temperature distribution. The position of a hole is usually parallel or vertical to the induction coil. Only a few holes have an angle of 45 ° to the coil.

D. Numerical investigation of the influence of holes

The following study shows the effects of holes on the electromagnetic field and temperature distribution during longitudinal flux heating. The blank is located in the coil during the heating process (batch heating). The current in the induction coil is applied with a frequency of 400 kHz and an amplitude of 960 A. The heating process takes 20 s and ends with a temperature of around 950 °C.

The position of the hole is normal to the induction coil. The center of the hole is located at the x-coordinate 0 mm and the z-coordinate 0 mm. The hole has a width of 14 mm and a length of 96 mm. The radius of the corner is 3.5 mm. Fig. 8 shows the entire magnetic field distribution in the blank.

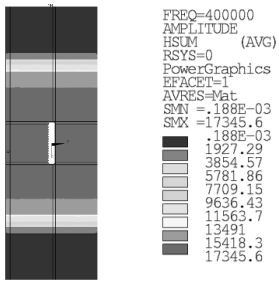


Fig. 8. Intensity of magnetic field close to the hole

In the red zone the magnetic field has a difference of 2000 A/m. Fig. 9 shows a zoomed view to the area around the hole. The strip pattern is caused by the coil. Under a winding the magnetic field is higher than beside, because a part of the magnetic field doesn't close over the whole induction coil but only over a winding. At the small ends of the hole the magnetic field is attracted to the edge.

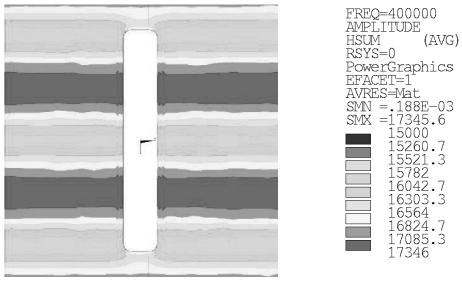


Fig. 9. Intensity of magnetic field close to the hole (zoomed view)

The magnetic field induces a current density in the blank and due to the electrical resistance of the blank Joule heat is generated (Fig. 10). Because of a higher magnetic field intensity under the windings a higher current is induced and hence higher Joule heat is generated.

The attracted magnetic field causes a higher Joule heat similar to the Joule heat generation under the windings. At the long sides of the hole less Joule heat is generated. This is understandable with a look at Fig. 11. The current doesn't flow parallel to the edge of the hole rather it turns around and flows back on the backside of the blank. Fig. 12 clarify this phenomenon because the current flows straight and doesn't change the direction in the xz-plane.

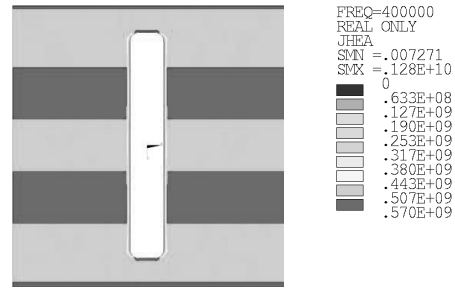


Fig. 10. Joule heat distribution close to the hole

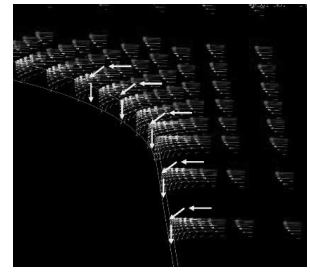


Fig. 11. Current flow at the edge of a hole

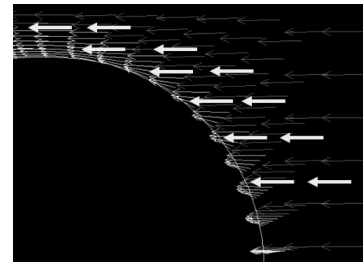


Fig. 12. Current flow in the plane close to the hole

The generated Joule heat results in a temperature distribution (Fig. 13). The strips produced by the windings are noticeable and the attracted magnetic field causes a little higher temperature at the small endings (Fig. 14).

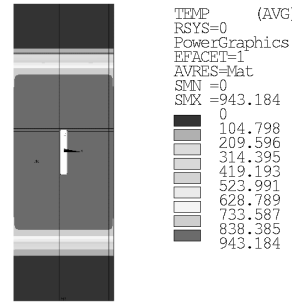


Fig. 13. Temperature distribution in the blank

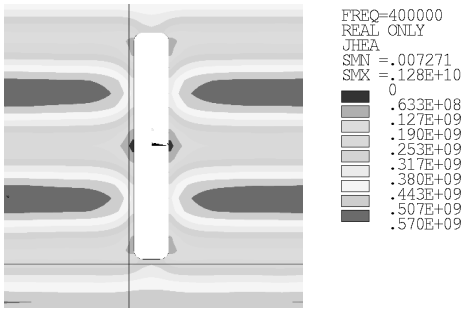


Fig. 14. Temperature distribution in the blank close to the hole

IV. Investigation of a Single-stage Induction Heating Concept Regarding the Inductor Design

The following numerical study shows the influence of the inductor design on the heating of a blank. For the calculation a verified 3-dimensional model from the previous one is used, see Fig. 15. The reference thickness of the blank is again 1.5 mm. The width and the nominal length of the blank are 500 mm. The coil has a number of 8 windings, the width of one winding is 60 mm and the distance between the windings 5 mm. The frequency of the inductor current is 400 kHz. The air-gap in vertical direction is 40 mm and in horizontal direction 50 mm on each side.

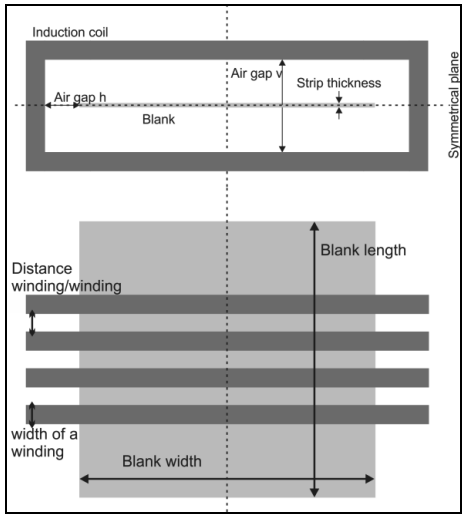


Fig. 15. Sketch of the numerical model for inductor design

A. *Influence of the horizontal air gap on the temperature distribution*

The air gap is an important geometrical value in the induction heating process. It acts on the temperature distribution and on the electrical efficiency.

First the modification of the air gap in horizontal direction is analyzed. This is the distance between the edge of the blank and the normal part of the induction coil. The temperature is evaluated again in two directions as shown in Fig. 3.

In Fig. 16 and Fig. 17 the temperature profiles parallel to the windings are shown. Between 0.05 m and 0.45 m the temperature is nearly homogeneous. Close to the edge the blank is overheated. The margin of the overheating depends of the size of the horizontal air gap. The overheating at the edge falls with increasing the horizontal air gap. At the end of the blank (Fig. 17) the temperature profile is qualitatively the same but around 2 % lower because the magnetic field spreads at the end of the induction coil.

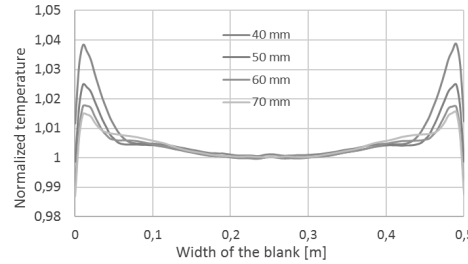


Fig. 16. Temperature in x-direction in the center of the blank

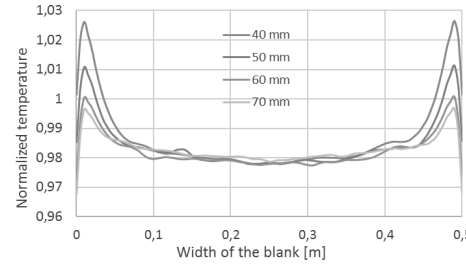


Fig. 17. Temperature in x-direction at the end of the blank

In Fig. 18 and Fig. 19 the temperature profile normal to the windings (see Fig. 3) is illustrated. The temperature profile in Fig. 17 is evaluated at the position x = 0 m. For the four air gaps the temperature has qualitatively the same trend. But in Fig. 19 the temperature along the edge is different for the air gaps. If the horizontal air gap is small the magnetic field which is generated from the normal part of the induction coil has more influence on the temperature of edge and causes a higher value (Fig. 19). The ripples in Fig. 18 and Fig. 19 are produced by the distance between the windings. A part of the magnetic field doesn't close over the whole coil rather over a single winding. That means that the magnetic field between the windings is lower than under a winding and, therefore, the temperature too.

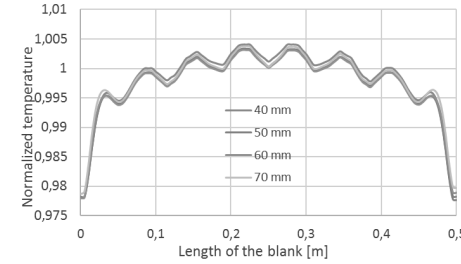


Fig. 18. Temperature in z-direction in the center of the blank

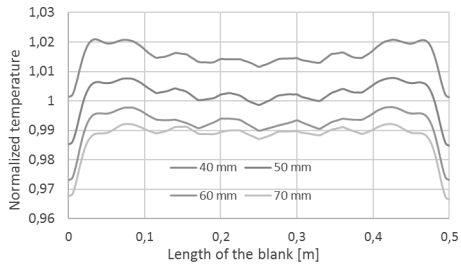


Fig. 19. Temperature in z-direction at the edge of the blank

B. *Influence of the vertical air gap on the temperature distribution*

The next analyzed parameter is the vertical air gap. The temperature profile at position z = 0 mm is influenced by the vertical air gap (Fig. 20). With increasing the air gap the homogeneous zone gets smaller and the shape of the curve is smoother. Due to the increased distance between the blank and the horizontal part of the induction coil the coupling becomes weaker. The influence of the normal part of the induction coil increases and therefore the magnetic field is greater in the edge area.

The temperature at the end of the blank is shown in Fig. 21. The increasing of the vertical air gap results in a lower temperature at the end of the blank because of a weaker magnetic field in this area but the difference from minimum to maximum is the same for each curve.

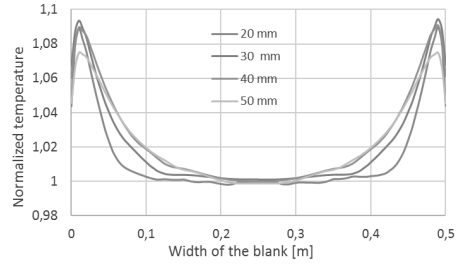


Fig. 20. Temperature in x-direction in the center of the blank

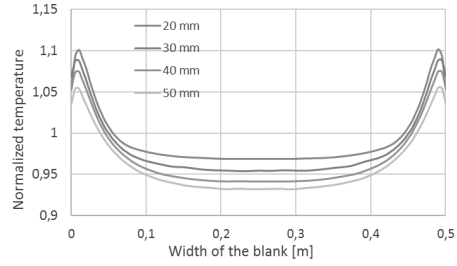


Fig. 21. Temperature in x-direction at the end of the blank

In Fig. 22 and Fig. 23 the temperature along the z-axis is Influence of the length of the blank on the temperature distribution illustrated. With a greater air gap the temperature at the end of the blank decreases. Furthermore, the ripples of the graphs are reduced because the influence of the magnetic field around a single winding decreases with a greater air gap and, therefore, the magnetic field is more homogeneous.

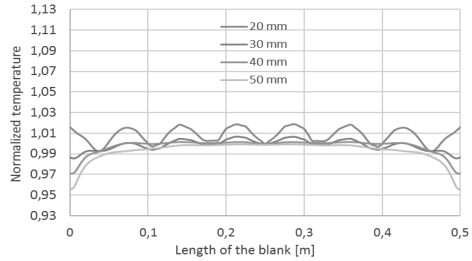


Fig. 22. Temperature in z-direction in the center of the blank

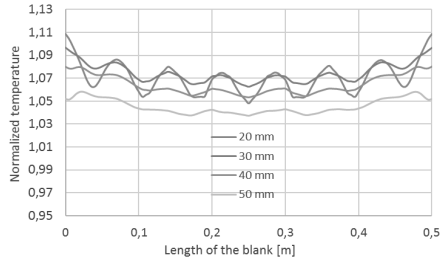


Fig. 23. Temperature in z-direction at the edge of the blank

The next parameter in this investigation is the length of the blank. Blanks for hot metal forming are different in length. Therefore, it is important to know in with range the length of a blank can be varying for a nearly homogeneous heating. The modification of the length has no influence on the temperature in x-direction at position z = 0 m. But at the end of the blank there is a dependence of the length on the temperature profile (Fig. 24). If the blank is longer than 480 mm the temperature difference between the position z = 0 m and the end of the blank is more than 1 %. If the blank is shorter than 480 mm the temperature profile is no longer influenced that means the temperature is nearly the same as at position z = 0 m.

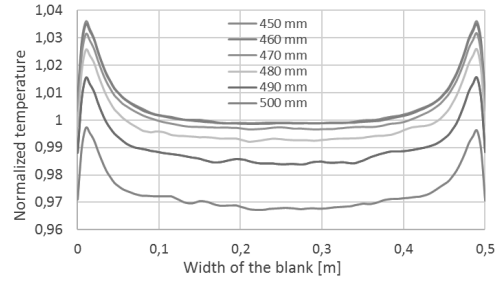


Fig. 24. Temperature in z-direction at the end of the blank

The temperature profile in z-direction in the center of the blank is shown in Fig. 25. In the center of the blank (x = 0 m) the temperature is very homogeneous for a length of 480 mm or shorter. For a longer blank the temperature drops because of a spread magnetic field at the end of the coil. The temperature directly at the edge which is not shown here is

very similar and only around 1 % higher than in the center of the blank. The temperature profiles of the curves in the center and at the edge are qualitatively the same and the difference between minimum and maximum temperature in the center and at the edge are 2.9 %.

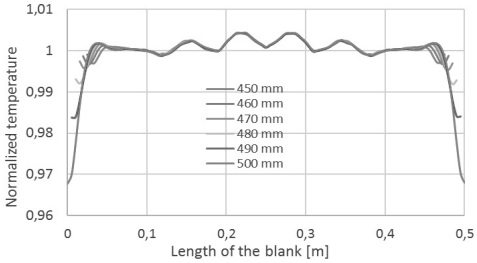


Fig. 25. Temperature in z-direction in the center of the blank

V. CONCLUSIONS

Induction heating is an effective heating method which allows a high energy efficient heating in many applications. The biggest advantage is the high heating speed and the high thermal efficiency if a fast heating is required. Induction heating is less suitable for holding processes.

For hot metal forming of car body parts, a comprehensive study for a single-stage induction heating process has been investigated. The influence of discontinuities such as holes, cut-outs and changes in cross-section has been investigated in detail by numerical simulations and verification by experiments.

The experimental setup offers the possibility to investigate longitudinal flux heating in batch and continuous induction heating mode. For the numerical investigations, a numerical 3- dimensional model was designed and verified by experiments.

The influence of holes and the position of the hole related to the windings of the coil on the electromagnetic field and the temperature distribution in the blank was investigated in detail.

One important result of the investigation is that in the case of longitudinal flux heating typically at the edge of holes a lower temperature exists in contrast to the general estimation, that holes generates temperature overheating at their edges. The lower temperature at the edges of holes is caused by the fact that the current close to a larger hole cannot cross the hole and tends to flow back on the down side of the blank. This is due to the general principle of longitudinal flux heating that currents are closing in the cross-section of a blank or strip.

The temperature distribution around the hole additionally depends on the design of the induction coil concerning the design of the ratio of windings and space between the windings. A coil with reduced gaps between windings increases the homogeneity of the temperature distribution around a hole.

With a modified 3-dimensional numerical model, the influence of the inductor design on the heating of the blank was investigated. With increasing the horizontal air gap the overheating at the edge and at the end of the blank could be reduced. The vertical air gap has only a small influence on the temperature in the center of the blank but at the end the temperature drops around 5 % for a large air gap. The length of a blank influences only the temperature at the ends. For the investigated length the temperature drop is around 3 %.

ACKNOWLEDGMENT

The research project “Series-production of inductively heated blanks for hot sheet metal forming” (IFG-No. 18738 N) from the Research Association for steel Application (FOSTA) and the Research Association of Automotive Technology (FAT) is supported by the Federal Ministry of Economic Affairs and Energy through the German Federation of Industrial Research Associations (AiF).

REFERENCES

[1] T. Opitz and T. Vibrans, “Induction fast heating of formed blanks for hot metal forming in car body production”, HTM Journal of Heat Treatment and Materials, Vol. 70, No. 6, pp. 261-266, 2015.

[2] T. Vibrans, Induction heating of formed blanks for hot metal forming, PhD thesis, Technical University Chemnitz, 2016.

[3] T. Tröster and J. Niewel, “Inductive heating of blanks and de-termination of corresponding process windows for press hardening”, FOSTA Research Association for Steel Application, Vol. 805, 2014.

[4] T. Todzy, Process window for press hardening at fast heating of steel plates with AlSi coating, PhD thesis, University of Siegen, 2015.

[5] A. Dietrich, B. Nacke, F. Pfeifer, T. Marten and T. Tröster, “Effects of holes in blanks for press hardening process due to induction heating”, XVIII International UIE-Congress on Electrotechnologies for Material Processing, Hannover, June 6-9, 2017, Vulkan-Verlag Essen, ISDN 978-3-8027-3095-5, pp. 327-332.

[6] A. Dietrich, B. Nacke, F. Pfeifer, T. Marten, and T. Tröster, “Investigation of geometrical discontinuities in blanks for hot sheet metal forming process under the influence of induction heating”, Proceedings of 5th International Conference on Steels in Cars and Trucks, Noordwijkerhout/Amsterdam, 2017.

[7] A. Dietrich and B. Nacke, “Numerical investigation of effects on blanks for press hardening process during longitudinal flux heating“, Proceedings of the VIII International Scientific Colloquium Modelling for Material Processing, Riga, September 21-22, 2017, pp. 179-184.

[2] [8] B. Nacke and E. Baake, Induction heating, Vulkan Verlag Essen, 2016.

Синтез замкнутой оптимальной системы в режиме «особого» управления индукционным нагревателем непрерывного действия

Данилушкин А.И.
Самарский государственный технический университет
г. Самара, Российская Федерация
aidanilushkin@mail.ru

***Abstract* — The article deals with the problem synthesizing the optimal control system of transient modes of a through-type induction heater. An algorithm for changing the inductor power when changing the performance of the technological complex is obtained. It is shown that the optimal algorithm for this transition mode has the form of a periodic decaying piecewise continuous function of time with discontinuities of the first kind. The number of intervals of continuity is infinite. It is noted that under conditions of random noise and a wide variety of process parameters, the synthesis of a closed optimal system with temperature feedback seems to be the most appropriate. A specific feature of optimal control algorithms for non-stationary modes is the most using "special" control intervals. The condition of absolute equality between the current value of the metal temperature at the exit from the heater and the given value is satisfied on "special" sections of the trajectory. In this case, the temperature of the metal at the exit from the heater remains constant during the all transition mode. Therefore, the synthesis of closed-loop systems with feedback on the metal temperature at the exit of the heater is, in principle, impossible. At the same time, the metal temperature inside the heater varies according to a certain regularity in accordance with the optimal algorithm. This established behavior allows us to synthesize a closed system on the "special" interval of optimal control as a system with feedback on temperature at some "internal" point of the heater. Analyzing the nature of the metal temperature distribution along the length of the heater in a transient mode allows determining the coordinate of the internal point at which the temperature changes with a maximum deviation from the steady-state value. This coordinate is used to set the feedback sensor. A relationship has been established between the temperature change at the control point and the heater power at the "special" interval of the trajectory. In the system of the parameters axes "inductor power – temperature at the control point", the phase trajectory of the closed optimal system on the "special" control interval is plotted. It is shown that the phase trajectory has the form of a piecewise continuous function converging to a new steady-state value. The analysis of the dependence "inductor power – temperature at the control point" shows that the feedback changes sign and depth twice within each interval of continuity. The angular coefficients and initial conditions of the optimal control switching line, the angular coefficients of the phase trajectory linear intervals, and the sign of feedback within each control continuity interval are determined.**

Ключевые слова — оптимизация, управление, синтез, фазовая траектория, распределенная система

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00212 А

I. Введение

Эффективность применения индукционного нагрева можно повысить только на основе комплексного подхода, включающего несколько направлений: снижение суммарных тепловых и электрических потерь в процессе нагрева за счет выбора оптимальных конструктивных параметров индуктора; уменьшение энергозатрат на нагрев заготовок в нестационарных режимах работы нагревательного комплекса при отработке глубоких возмущений в переходных режимах работы установки; снижение электрических потерь за счет внедрения комплексной системы регулирования, включающей систему оптимального управления в нестационарных режимах работы, систему автоматической компенсации реактивной мощности индуктора и систему оптимальной стабилизации температуры в установившемся режиме работы [1–5]. В ряде широко распространенных технологических процессов горячей обработки металла, перепад температур между центром и поверхностью нагреваемой заготовки в процессе нагрева не достигает предельно допустимых значений при любых реальных значениях скорости перемещения заготовок и мощности нагрева. В этом случае динамика процесса индукционного нагрева как объекта управления с достаточно высокой степенью достоверности характеризуется одной лишь средней по сечению температурой изделия, что позволяет весь последующий анализ и синтез алгоритмов управления для рассматриваемого класса объектов выполнить на базе математической модели непрерывного нагрева теплотехнически тонкого тела.

II. Основная часть

Для управления индукционными нагревательными установками непрерывного действия важной является задача оптимизации переходных режимов на минимум потерь [5]

$$I_{пр} = k_1 \sum_{i=1}^{n} |\delta\tau_i| + k_2 \sum_{i=1}^{n} \left\| \theta(x,\tau) - \theta^*(x) \right\|, \qquad (1)$$

где k_1 и k_2 – весовые коэффициенты, $\sum_{i=1}^{n} |\delta\tau_i|$ – суммарная потеря производительности, $\sum_{i=1}^{n} \left\| \theta(x,\tau) - \theta^*(x) \right\|$ – суммарное отклонение результирующего температурного поля от заданного

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

$\theta^*(x)$. Одним из характерных переходных режимов работы индукционных нагревателей непрерывного действия является изменение производительности (скорости перемещения металла через индуктор). При этом основной задачей оптимального управления при переходе нагревателя с одного режима работы на другой ставится задача обеспечения максимума точности поддержания температуры нагреваемого металла на выходе из нагревателя [6–12].

С учетом принятых допущений процесс индукционного нагрева движущегося через индуктор металла можно описать линейным дифференциальным уравнением первого порядка в частных производных [13, 14]

$$\frac{\partial\theta(x,\tau)}{\partial\tau} = -V\frac{\partial\theta(x,\tau)}{\partial x} + kP(\tau) - \beta\left(\theta(x,\tau) - \theta_0(x)\right), \quad (2)$$

с краевыми условиями

$$\theta(x,0) = \theta_0(x), \quad \theta(0,\tau) = \theta_0(0,\tau), \quad (3)$$

где $\theta(x,\tau)$ – текущее значение средней по сечению температуры нагреваемого металла.

Задача оптимального управления по критерию максимума точности нагрева формулируется следующим образом.

Для объекта, описываемого уравнением (2) с краевыми условиями (3) найти закон изменения управляющего воздействия $P(\tau)$, обеспечивающего выполнение соотношения [15]

$$\begin{aligned}&\max\left|\theta_{зад}(r,L) - \theta\left(U_{опт}(\tau),r,L,\tau\right)\right| = \\ &= \min\left[\max\left|\theta_{зад}(r,L) - \theta\left(U(\tau),r,L,\tau\right)\right|\right]\end{aligned} \quad (4)$$

в условиях глубоких возмущений по скорости перемещения нагреваемого металла через индуктор при наличии энергетических и технологических ограничений вида:

$$P_{\min} \le P(\tau) \le P_{\max}, \quad (5)$$

$$\left|\theta(L,\tau) - \theta_{зад}(L)\right| \le \Delta\theta_{доп} \quad (6)$$

Как показано в [16], выполнение условия (4) эквивалентно минимизации функционала вида

$$J = \int_0^T \left|\theta_{зад}(L) - \theta_{тек}\left(P(\tau),L,\tau\right)\right|^{\gamma} d\tau \quad (7)$$

при $\gamma \to \infty$.

Согласно принципу максимума для систем с распределенными параметрами в форме, предложенной Сиразетдиновым Т.К., оптимальное управление переходными режимами при смене производительности состоит из участков трех типов, на одном из которых $P(\tau) = P_{\max}$, на другом $P(\tau) = P_{\min}$, а на третьем $P(\tau) = P_{ос}(\tau)$, и задача определения оптимального алгоритма сводится к поиску длительности интервалов движения по ограничению и формы и длительности «особого» управления. В случае, когда управляющее воздействие на всем протяжении оптимального процесса не достигает своих предельных значений, оптимальный алгоритм принимает вид «особого» участка [17], который ищется из условия

$$\left|\theta_{тек.}(L,\tau) = \theta_{зад}(L)\right| \quad (8)$$

Пусть скорость перемещения нагреваемого продукта через нагреватель, характеризующая производительность нагревательной установки, изменилась с V_0 на $V_1 \ne V_0$. Исходя из условия (8), оптимальный алгоритм изменения мощности нагревателя в переходном режиме при смене производительности принимает вид [18]

$$\begin{aligned}P_n(\tau) &= \frac{P_0V_1}{V_0}e^{-(n+1)\beta T_0}e^{-\beta\frac{V_0-V_1}{V_0}\tau} + \frac{\beta\theta_{зад}}{k}\sum_{i=0}^{n}e^{-i\beta T_1}, \\ &\forall t \in \left[nT_1,(n+1)T_1\right], \quad n = 0,1,2\ldots.,\end{aligned} \quad (9)$$

где $T_1 = L/V_1$.

Анализ полученного выражения показывает, что:

1) оптимальное управление для рассматриваемого режима имеет вид затухающей кусочно-непрерывной функции времени с разрывами первого рода;
2) на интервалах непрерывности управление $P(t)$ имеет вид экспоненты;
3) длительность интервала непрерывности определяется новым установившимся значением скорости V_1 и равна $T_1 = L/V_1$;
4) управляющее воздействие изменяется скачком одновременно с изменением скорости. Начальное значение $P(t)$ находится из при $t = +0$ в виде:

$$P(t)_{t=+0} = \frac{P_0V_1}{V_0} + P_0\left(1 - e^{-\beta T_0}\right) \quad (10)$$

где $T_0 = L/V_0$;

5) управляющее воздействие достигает своего амплитудного значения на оптимальной траектории в конце первого интервала управления при $t = T_1$; его величина определяется по выражению:

$$P(t)=\frac{P_0V_1}{V_0}e^{-\beta T_0}e^{-\beta\frac{V_0-V_1}{V_0}t}+P_0\left(1-e^{-\beta T_0}\right) \quad (11)$$

Поскольку в реальной технологической ситуации никогда не требуется поддерживать заданную температуру продукта с абсолютной точностью, а ставится цель попадания в заданную область с допустимой погрешностью, бесконечное по длительности оптимальное управление можно разумно ограничить, определив требуемое число интервалов управления исходя из допустимой ошибки.

Для обеспечения требуемой точности нагрева достаточно осуществить оптимальное управление в течение времени $t\in\left[0,\,nT_1\right]$, где

$$n=1+\frac{1}{\beta T_0}\ln\frac{kP_0V_1e^{-\beta T_0}\left(1-e^{-\beta T_1}\right)\left(e^{-\beta\frac{V_0-V_1}{V_0}T_1}-1\right)}{\beta V_0\Delta\theta_{\text{доп}}} \quad (12)$$

Полученное выражение позволяет определить число интервалов управления в функции допустимой ошибки $\Delta\theta_{доп}$ отклонения температуры на выходе от заданной и скорости нагрева.

Реализация полученных оптимальных алгоритмов управления переходными режимами работы нагревательной установки может быть обеспечена системой программного управления. Однако, при наличии внешних возмущений случайного характера представляется целесообразным применение замкнутой системы оптимального управления, которая обеспечивает автоматическую отработку оптимальных переходных процессов с учетом вариации исходных параметров процесса.

Как следует из (8), в режиме «особого» управления температура металла на выходе из нагревателя не изменяется. Следовательно, синтез замкнутой системы с обратной связью по температуре металла на выходе из нагревателя вообще не представляется возможным. Однако, как показано в работах [18, 19], температурное распределение в металле внутри нагревателя на «особом» участке управления не остается постоянным, а изменяется по определенному закону. Это позволяет синтезировать замкнутую систему оптимального управления с обратной связью по температуре металла в некоторой точке внутри нагревателя. Выбор координаты точки отбора импульса на управление осуществляется из условия максимального отклонения температуры $T(x,t)$ по длине нагревателя в переходном режиме от ее значения в установившемся режиме.

Закон обратной связи может быть представлен в параметрической форме расчетными оптимальными программами $P_{опт}(\tau)$ в функции $\theta_{опт}(x,\tau)$.

Температурное распределение $\theta_{опт}(x,\tau)$ по длине загрузки в процессе выхода на новый установившийся режим по оптимальной траектории для любой фиксированной координаты x (за исключением граничных точек x=0 и x=L) представляет собой затухающую кусочно-экспоненциальную периодическую функцию времени. На рис. 1 и рис. 2 приведены алгоритмы оптимального управления на «особом» участке и соответствующие им изменения температуры в контролируемой координате $x_0=0,7L$ для случая увеличения скорости с V_0 до $V_1=1,5V_0$, и уменьшения скорости с V_1 до V_0 соответственно.

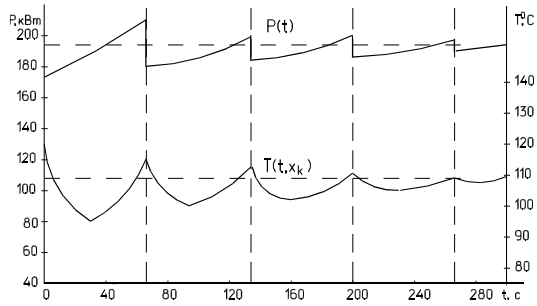


Рис. 1. Алгоритмы изменения мощности нагревателя и температуры в точке контроля при увеличении производительности

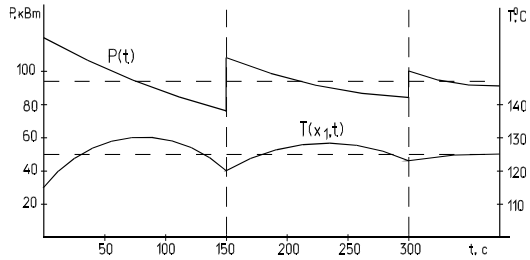


Рис. 2. Алгоритмы изменения мощности нагревателя и температуры в точке контроля при уменьшении производительности

Как видно из приведенных графиков, затухающие колебания температуры $\theta(x,\tau)$ в точке контроля происходят около нового установившегося значения $\theta_1(x,\tau)$. Формирование требуемого закона изменения мощности $P(\theta(x_к))$ нагрева осуществляется на основании информации о температуре металла в контролируемой координате внутри нагревателя. Исключая параметр τ, получим:

$$P_n\left(\theta(x_к)\right)=\begin{cases}z_{1n}\theta(x,\tau)+d_{1n},\forall\,\tau\in\left[nT_1,\;nT_1+\tau_1\right]\\ z_{2n}\theta(x,\tau)+d_{2n},\forall\,\tau\in\left[nT_1+\tau_1,(n+1)T_1\right]\end{cases}$$
$$n=0,1,2,\ldots, \quad (13)$$

где z_{1n}, z_{2n} – угловые коэффициенты линейных участков фазовой траектории движения системы, d_{1n}, d_{2n} – начальные значения n-ого линейного участка траектории.

Как следует из (13), для синтеза замкнутой системы, реализующей оптимальную программу изменения мощности вида (9), необходим кусочно-линейный

характер обратной связи по температуре $\theta_k(x_k,\tau)$ в точке контроля на каждом интервале непрерывности управления. При этом в пределах каждого интервала непрерывности управления $P(\tau)$ происходит смена величины и знака угловых коэффициентов линейных участков траектории движения системы z_{1n} и z_{2n} в моменты nT_1 и $nT_1+\tau_1$.

Переход с одной траектории движения на другую происходит в моменты времени nT_1+x/V_1 и $(n+1)T_1$. В моменты времени $(n+1)T_1$ имеет место скачок мощности до уровня, соответствующего начальному значению мощности на (n+1)-ом интервале. Одновременно происходит смена величины и знака обратной связи. В моменты времени nT_1+x/V_1 обратная связь вновь изменяет величину и знак уже при плавном изменении мощности $P(\tau)$ внутри ее интервала непрерывности. Таким образом, в пределах каждого интервала непрерывности управляющего воздействия $P_n(\tau)$ на плоскости параметров $P(\tau)-\theta(x,\tau)$ имеются две точки, определяющие моменты переключения. Координаты этих точек находятся из (10) для любого интервала непрерывности (n = 0, 1, 2, ...).

Характер функциональных зависимостей линии переключения и траектории движения от параметров системы – начальной скорости V_0, конечной V_1 и номера интервала управления – легко устанавливается на основе анализа зависимостей угловых коэффициентов фазовой траектории от параметров процесса. Анализ этих зависимостей показывает, что угловые коэффициенты z_{1n} и z_{2n} и начальные условия d_{1n} и d_{2n} линейных участков фазовой траектории в диапазоне рабочих скоростей зависят только от скорости V_1 и являются линейными функциями.

III. Заключение

Полученные оптимальные по среднеквадратичному критерию алгоритмы управления переходными режимами работы индукционного нагревателя непрерывного действия при изменении производительности установки представляют собой кусочно-экспоненциальную функцию времени, асимптотически стремящуюся к новому установившемуся значению. Предложен принцип построения замкнутых систем управления процессом непрерывного индукционного нагрева в нестационарных режимах работы при смене производительности. Показано, что реализация «особого» управления с помощью замкнутой оптимальной системы возможна только с обратной связью по температуре в некоторой точке внутри нагревателя. Синтезирован закон обратной связи по температуре металла в определенной координате внутри нагревателя, реализующий оптимальную программу изменения мощности в переходных режимах смены производительности установки.

Список литературы

[1] Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

[2] Rudnev V. Handbook of Induction Heating. Second Edition. CRC Press. Taylor Francis Group. Boca Raton. London New York, 2017. – 657p.

[3] Рапопорт Э.Я., Осипова Ю.А. Оптимизация режимов смены производительности и номенклатуры индукционной нагревательной установки методического действия по критерию суммарной потери темпа выдачи // Вестник СамГТУ, серия «Технические науки», № 42 – 2007, с. 166 – 170.

[4] Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Ситько П.А. Моделирование и оптимизация индукционных нагревателей мерных заготовок в кузнечном производстве. Индукционный нагрев, 2013. Вып. №2(24), С. 15-17.

[5] Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Металлургия, 1993. – 279 с.

[6] Ю. Плешивцева, Э. Рапопорт, А. Афиногентов, Ю. Шемякин, Б. Наке, А. Никаноров. Применение методов оптимального управления для оптимизации производственных комплексов пластической деформации металлов // Индукционный нагрев, 2010, № 13, с. 43–48.

[7] А.А. Афиногентов, М.Ю. Деревянов. Эффективные стратегии функционирования производственного комплекса «нагрев – обработка металла давлением, Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки, 2015, № 3, С. 162–167.

[8] В.Б. Демидович, Б.М. Никитин, В.Н. Иванов, В.И. Червинский, И.И. Баранкова. Актуальные энергосберегающие технологии индукционного нагрева в металлургии // Индукционный нагрев, 2008, №4, С. 20–26.

[9] Плешивцева Ю.Э., Афиногентов А.А., Наке Б. Оптимальное управление технологическим комплексом «нагрев–обработка металла давлением» // Proceedings of Seminar of DAAD scholars, Moscow, Russia, April 18-19, 2008, pp.164-166.

[10] Кручинин А. М., Махмудов К. М. и др. Автоматическое управление электротермическими установками. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.

[11] А.И. Данилушкин, А.В. Кожемякин, А.П. Мостовой. Исследование режима нагрева ферромагнитных заготовок в двухчастотном индукционном нагревателе дискретно–непрерывного действия Вестник Саратовского государственного технического университета, 2013г., Вып. № 3. (72). С.111–117.

[12] Данилушкин А.И., Мостовой А.П. Оптимальное пространственное управление распределением мощности по длине двухчастотного индукционного нагревателя.// Известия Высших Учебных заведений. Электромеханика. Москва, 2014. – № 5. С. 76–78.

[13] Базаров А.А., Данилушкин А.И., Данилушкин В.А. Комплексное моделирование и управление процессом непрерывного индукционного нагрева ферромагнитных заготовок. Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки», 2016г., Вып. № 2. (50). С.128–139

[14] Rapoport E.Y. Analytical Construction of Aggregated Controllers in Systems with Distributed Parameters // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2012,Vol.51, No3, pp.375-390. Импакт фактор журнала в Web of Science 0,191.

[15] Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева металла. М.: Наука, 2012. – 219 с.

[16] Сиразетдинов Т.К. Оптимизация систем с распределенными параметрами. Наука, М., 1977, 480 с.

[17] Габасов Р., Кириллова Ф.М. Особые оптимальные управления. М.: Наука, 1973. – 178 с.

[18] А.И. Данилушкин, Ю.Э. Плешивцева. Оптимизация переходных режимов работы объектов технологической теплофизики с дискретно–распределенными управляющими воздействиями. – Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды пятой международной конференции / Под ред.: академика В.П. Мясникова, академика Н.А.Кузнецова, профессора В.А. Виттиха.– Самара, Самарский научный центр РАН, 2003. – С. 155–162 .

[19] Данилушкин А.И., Князев С.В., Никитина Е.А. Оптимизация нестационарных режимов непрерывного индукционного нагрева ферромагнитных заготовок [Текст] / // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2010. Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. Том 6. Технические науки - Одесса: Черноморье, 2010. - С. 21-25

Алгоритмы оптимального функционирования двухсекционного индукционного нагревателя в переходных режимах

Данилушкин А.И.
ФГБОУ ВО «Самарский Государственный Технический Университет»
г. Самара, Россия
aidanilushkin@mail.ru

Мостовой А.П.
ФГБОУ ВО «Самарский Государственный Технический Университет»
г. Самара, Россия
alekse-mostovoj@yandex.ru

Максимова М.А.
ФГБОУ ВО «Самарский Государственный Технический Университет»
г. Самара, Россия
maximova_21@yahoo.com

***Abstract* — Transient modes play an important role at operations of the "heating - straining" process line. These include starting the process line after planned or emergency stops and changing the work pace of the hot straining equipment. An important task of the induction heating control during transient modes is the search for the optimal operation mode of the heating line, which ensures minimal total losses when the heater reaches a steady state. The present work solves the problem of minimizing energy consumption during the transition of a continuous two-section induction heater to a steady state mode. The design of optimal control algorithms in transient modes is based on the electrothermal model, taking into account the nonlinear relationship of the distribution of the specific heating power in each section with the temperature distribution along the radial and axial coordinates. It is shown that temperature deviations, which occur during the transient modes of continuous heaters can significantly beyond the limits of technological tolerances. Under these conditions, the optimal control search problem is to determine the algorithms for changing the power of each section and the moment when the billet starts to move through the heater. The obtained algorithms provide the minimum balance delay of straining equipment and the minimum unproductive waste energy for heating substandard billets. The paper estimates the effectiveness of control algorithms for starting mode from the "cold" state and from the "thermostatic temperature control" mode. Some variants of energy efficient start-up control algorithms are proposed, which depend on the specific conditions of the technological process and requirements for process quality indicators. It proposes some variants of energy efficient start-up control algorithms, which depend on the specific conditions of the technological process and requirements for process quality indicators.**

Ключевые слова — индукционный нагрев, источники тепла, математическая модель, переходный режим, температурное распределение, управление.

I. Введение

В процессе эксплуатации технологической линии «методический нагреватель – деформирующее оборудование» возникает необходимость первоначального запуска нагревателя в работу или вывода нагревателя на установившийся режим нагрева из режима термостатирования. Опыт работы машиностроительных производств показывает, что в течение рабочей смены происходит от трех до пяти плановых остановок оборудования различной длительности [1–3]. Основной задачей управления пусковыми режимами индукционных нагревателей методического действия является минимизация суммарных потерь энергии в процессе выхода нагревателя на установившийся режим. Решение поставленной задачи значительно усложняется необходимостью учета ограничений на мощность источника питания, на технологические параметры процесса и нелинейной зависимостью параметров нагревателя от температурного распределения по длине нагреваемых заготовок. [2–5].

Задача управления переходными режимами многосекционного индукционного нагревателя состоит в следующем. Необходимо найти такие алгоритмы управления объектом, которые в условиях технологических и энергетических ограничений обеспечат минимум суммарных энергозатрат при переходе индукционного нагревателя на установившийся режим работы с требуемым конечным температурным распределением [6–8]. Поиск энергоэффективного алгоритма управления переходными режимами выполнен на базе нелинейной математической модели процесса. В качестве технологических ограничений рассматриваются температура нагрева, перепад температур по объему изделия, скорость нагрева. К энергетическим ограничениям относятся удельная мощность нагрева, мощность источника питания, коэффициент мощности и др. [9–15].

II. Основная часть

Для расчета и исследования переходных режимов двухсекционной индукционной установки методического действия в условиях существенных нелинейностей используется представление процесса индукционного нагрева каждой отдельно взятой заготовки в виде нелинейной взаимосвязанной системы уравнений Максвелла и Фурье соответственно для электромагнитного и теплового полей с соответствующими краевыми условиями:

$$rot\left\{\overline{H}\right\}=\sigma\overline{E}\,;\quad rot\left\{\overline{E}\right\}=-\left\{\frac{\partial\overline{E}}{\partial t}\right\};$$
$$div\left\{\overline{B}\right\}=0\,;\quad div\left\{\overline{E}\right\}=0\,. \qquad (1)$$

$$c\left(T\right)\gamma\frac{\partial T}{\partial t}=div\left(\lambda\left(T\right)gradT-div\left[EH\right]\right), \qquad (2)$$

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00212 А

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

где $\{\overline{H}\}$, $\{\overline{E}\}$, $\{\overline{B}\}$ – векторы напряженности магнитного и электрического полей и магнитной индукции; σ – удельная электропроводимость; T – температура; t – время; $\lambda(T)$ – удельная теплопроводность; $c(T)$ – удельная теплоемкость; γ – удельная плотность нагреваемого металла. Объемная плотность внутренних источников тепла, индуцируемых в металле, определяется дивергенцией вектора Пойнтинга, $\Pi = -div\left[\overline{EH}\right]$.

Система уравнений (1), (2) дополняется граничными условиями. Для электромагнитной задачи используются условия равенства функции нулю на бесконечно удаленной границе S_1 и условие симметрии на осевой линии S_2 , которое заключается в равенстве нулю производной от функции. Тепловые потери с поверхности заготовки определяются разностью температур поверхности металла и окружающей среды.

Специфической особенностью расчета температурного поля заготовок является существенно различающиеся по характеру функции распределения внутренних источников тепла в секциях нагревателя и различные условия теплообмена в секциях. Для первой секции нагревателя характерным является состояние, при котором заготовка, находящаяся на первой по ходу движения позиции, является полностью магнитной, а вторая и третья заготовки имеют двухслойную структуру. Характер распределения внутренних источников тепла в значительной степени определяется нелинейной зависимостью мощности внутреннего тепловыделения от напряженности магнитного поля. Решение тепловой задачи для заготовок, находящихся в нагревателе, проводится итерационно – с пересчетом распределения объемных источников тепловыделения в электромагнитной задаче и задании полученной картины в качестве источников для тепловой задачи. Таким образом осуществляется последовательный расчет электромагнитных и тепловых полей с обменом информацией в виде аппроксимирующих выражений для распределений температуры и внутренних источников тепловыделения.

Максимальный перепад температур по сечению заготовки в период нагрева в области упругих деформаций (на первой стадии нагрева) и предельное значение температуры поверхности заготовки на выходе из первой секции индуктора определяются технологическими требованиями. Варьируемые параметры: удельная мощность нагрева по длине первой секции нагревателя, удельная мощность нагрева по длине второй секции нагревателя; частота питающего напряжения. Точность приближения результирующего температурного распределения к требуемому конечному оценивается по величине максимального отклонения температуры заготовки на выходе из нагревателя. Для реализации методики расчета оптимального управления двухсекционным индукционным нагревателем разработан алгоритм последовательного решения задачи оптимизации с улучшением требуемых показателей на каждой итерации. В процессе поиска оптимума на каждой итерации происходит пересчет электромагнитной задачи из–за уточнения распределения температуры по радиусу и длине загрузки.

В качестве примера в работе рассмотрен индукционный нагреватель для нагрева стальных заготовок под деформацию. Параметры заготовки: диаметр заготовки – 180мм, длина заготовки – 240мм, масса заготовки – 42кг. В первой секции находятся три заготовки, во второй секции находятся восемь заготовок.

В нестационарных режимах работы нагревателей методического действия для нагрева ферромагнитных заготовок происходит изменение температурного распределения в металле как по радиусу, так и по длине. Это приводит к изменению сопротивления системы «индуктор-металл». Изменение сопротивления происходит в широком диапазоне и при ограниченной мощности источников питания приводит к их перегрузке по току [16, 17].

Численный расчет электромагнитных и тепловых полей в системе «индуктор–металл» производится совместно в программном комплексе Comsol 3.5, который позволяет задавать в магнитной задаче зависимость всех параметров от температуры.

Результаты расчета электромагнитной задачи в виде внутренних источников тепла используются далее при решении тепловой задачи расчета температурного распределения по радиальной и аксиальной координатам заготовки на каждой позиции.

Расчет заканчивается, когда полученное температурное распределение по длине *загрузки* оказывается близким к значению на предыдущем этапе расчета. При повышении точности нагрева алгоритм расчета распределения мощности по длине нагревателя остается неизменным, увеличивается лишь число интервалов постоянства.

В процессе выхода нагревателя на установившийся режим управление осуществляется по трем каналам: «источник питания – первая секция нагревателя», «источник питания – вторая секция нагревателя» и по каналу управления электроприводом перемещения заготовок. Управление механизмом перемещения заключается в определении момента его включения в зависимости от реализуемого алгоритма.

Для определения оптимального по критерию минимума энергозатрат алгоритма пуска нагревателя рассмотрены два наиболее часто встречающиеся пусковых режима: пуск из «холодного» состояния загрузки и пуск из режима «термостатирования».

Алгоритмы управления напряжением каждой секции в процессе выхода нагревателя на установившийся режим нагрева принимают вид.

Для первой секции:

$$U_1(t) = \begin{cases} U_{11}(t)\ \forall t \in (0, t_{11}) \\ U_{12}(t), \forall t \in (t_{11}, t_{12}) \\ U_{13},\ \forall t \in (t_{12}, t_{1кон}) \end{cases}. \qquad (3)$$

Здесь U_{11} – напряжение, подводимое к индуктору первой секции на первом интервале управления $(0, t_1)$: U_{12} – напряжение, подводимое к индуктору на втором интервале управления (t_1, t_2) ; U_{13} – напряжение, подводимое к индуктору на третьем интервале $(t_2, t_{кон})$.

Для второй секции:

$$U_2(t) = \begin{cases} U_{21}, \forall t \in (0, t_{21}) \\ U_{22}(t), \forall t \in (t_{21}, t_{22}) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ U_{2n}, \forall t \in (t_{2n}, t_{2кон}) \end{cases}. \qquad (4)$$

При «холодном» пуске второй секции нагревателя в начальный момент пуска все заготовки ферромагнитные, поэтому сопротивление системы «индуктор-металл» значительно меньше, чем в установившемся режиме. Следовательно, алгоритм управления должен быть рассчитан с учетом энергетического ограничения на мощность источника питания. Как следует из анализа полученных в работе результатов, семь заготовок из восьми, находящихся в индукторе в момент «холодного» пуска, выходят с низким теплосодержанием, недостаточным для обработки на деформирующем оборудовании. Это приводит к простою деформирующего оборудования и значительным потерям энергии на нагрев некондиционных заготовок. Затраты энергии на нагрев некондиционных заготовок составляют 25,7 кВт*час за один пуск. Время выхода на режим – 1120 сек.

На рис.1 приведены алгоритмы изменения напряжения, подводимого к секциям индуктора в процессе выхода на установившийся режим при пуске с «холодной» загрузкой с учетом ограничения на мощность источника питания, а на рис.2 –алгоритмы изменения мощности и энергетические характеристики второй секции нагревателя.

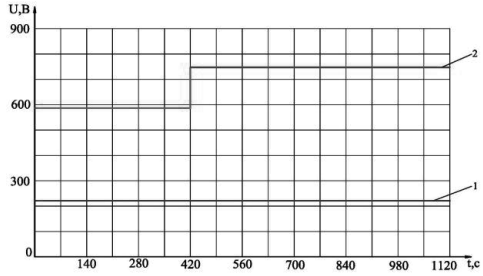


Рис. 1. Алгоритм изменения напряжения нагревателя 1-2-ая секция, 2-1-ая секция

Мощность, подводимая к индуктору второй секции при постоянстве напряжения на индукторе на первых трех интервалах управления значительно больше, чем мощность в установившемся режиме. В связи с этим в данном режиме пуска в течении первых трех интервалов напряжение питания второй секции нагревателя рассчитывается исходя из условия ограничения тока нагревателя на уровне предельно допустимого тока источника питания.

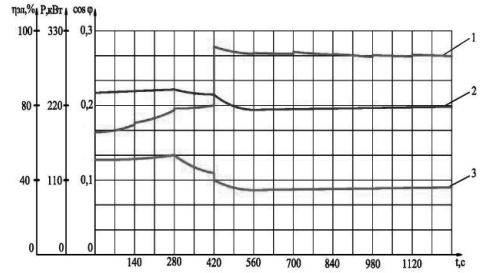


Рис. 2. Энергетические характеристики второй секции в процессе пуска: 1– активная мощность, кВт, 2– электрический КПД, 3-cosφ

Анализ различных вариантов пуска показал, что оптимальным вариантом с точки зрения минимума энергозатрат является пуск из режима термостатирования.

На рис.3 приведены алгоритмы изменения мощности и энергетические характеристики второй секции нагревателя.

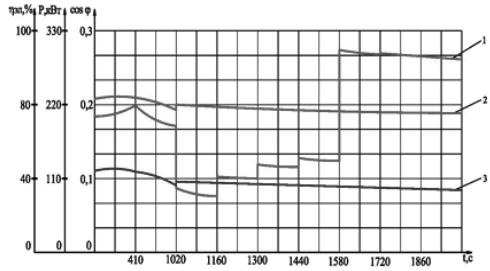


Рис. 3. Энергетические характеристики второй секции нагревателя при пуске: 1- активная мощность, подведенная к индуктору, 2- электрический КПД индуктора, 3- cos φ индуктора

На рис.4 – график температуры загрузки на выходе из нагревателя при пуске из режима термостатирования. Рассмотренный алгоритм управления пуском нагревателя позволяет сократить число некондиционных заготовок до 3. При этом простой деформирующего оборудования минимальный и составляет 640 с.

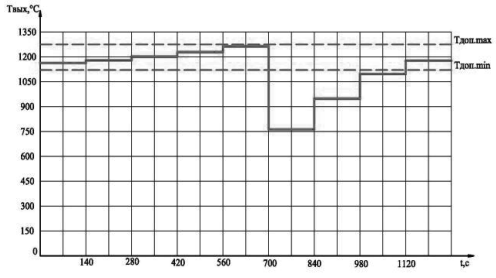


Рис. 4. Температура загрузки на выходе из нагревателя при пуске из режима термостатирования

III. Заключение

Сформулирована задача оптимального управления переходными режимами многосекционного индукционного нагревателя по критерию минимума энергозатрат. Установлены зависимости параметров алгоритма управления двухсекционным нагревателем в пусковом режиме от начального состояния загрузки и энергетических характеристик комплекса «источники питания – многосекционный нагреватель». Выполнен анализ эффективности алгоритмов управления пусковыми режимами двухсекционного индукционного нагревателя методического действия. Отмечена существенная зависимость алгоритма управления от электрических параметров нагревателя в процессе выхода на установившийся режим. Показано, что существенный диапазон изменения электрических характеристик нагревателя в процессе выхода на установившийся режим обусловил необходимость учета предельных возможностей источника питания в процессе пуска. Установлено, что работа нагревателя на ограничении по мощности нагрева приводит к появлению некондиционных заготовок на выходе из нагревателя. Показано, что оптимальным вариантом пуска нагревателя является пуск из режима термостатирования второй секции. Предложенный алгоритм управления обеспечивает минимальные затраты электроэнергии в пусковом режиме, минимум некондиционных заготовок и минимальное время выхода на установившийся режим нагрева.

Список литературы

[1] Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Металлургия, 1993. – 279 с

[2] Rudnev V. Handbook of Induction Heating. Second Edition. CRC Press. Taylor Francis Group. Boca Raton. London New York, 2017. – 657p.

[3] А.И. Данилушкин, А.В. Кожемякин, А.П. Мостовой Исследование режима нагрева ферромагнитных заготовок в двухчастотном индукционном нагревателе дискретно–непрерывного действия// Вестник Саратовского государственного технического униыерситета, 2013г., Вып. № 3. (72). С.111–117.

[4] Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева металла. М.: Наука, 2012. [Текст]: моногр. / Э.Я. Рапопорт, Ю.Э. Плешивцева - М.: Наука,, 2012. - 219 с.

[5] Данилушкин А.И., Плешивцева Ю.Э. Оптимизация переходных режимов работы объектов технологической теплофизики с дискретно–распределенными управляющими воздействиями. – Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды пятой международной конференции / Под ред.: академика В.П. Мясникова, академика Н.А. Кузнецова, профессора В.А. Виттиха.– Самара, Самарский научный центр РАН, 2003. – с. 155–162.

[6] Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева металла. М.: Наука, 2012. [Текст]: моногр. / Э.Я. Рапопорт, Ю.Э. Плешивцева - М.: Наука,, 2012. - 219 с.

[7] Данилушкин А.И., Князев С.В., Макаров А.П. Оптимизация пусковых режимов индукционных нагревателей дискретно–непрерывного действия. Материалы III-й Международной научно–практической конференции «Современные инновации в науке и технике», Курск, 2013г., с.47–50.

[8] Плешивцева Ю.Э., Афиногентов А.А., Наке Б. Оптимальное управление технологическим комплексом «нагрев–обработка металла давлением»// Proceedings of Seminar of DAAD scholars, Moscow, Russia, April 18-19, 2008, pp.164-166.

[9] Кувалдин А.Б. Математические модели для исследования электромагнитного поля в ферромагнитных средах [Текст] /А.Б. Кувалдин // Электричество. – 2005.– №11. – с. 56 – 61.

[10] Veselovskiy V.B., Kochubey A.A., Syasev A.V. Approximate methods of the solution of non-linear problems thermomechanics with driving border // Acta metallurgica Slovaca. - Kosice, 2002. - T. 3. - C. 321-335.

[11] Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

[12] Базаров А.А., Базир Н.А. Разработка программы численного расчета температурных полей движущихся заготовок// Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. -2005. -№37. - С. 23-26.

[13] Базаров А.А., Базир Н.А., Зимин Л.С. Построение численной модели нестационарного теплообмена цилиндрических заготовок при индукционном нагреве// Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. -2007. -№2 (20). -С.181-183.

[14] Jiin-Yuh Jang, Yu-Wei Chiu. Numerical and experimental thermal analysis for a metallic hollow cylinder subjected to step-wise electro-magnetic induction heating. Applied Thermal Engineering, Volume 27, Issues 11–12, August 2007, Pages 1883-1894.

[15] Yi Han, Enlin Yu, Hongliang Zhang, Daochen Huang. Numerical analysis on the medium-frequency induction heat treatment of welded pipe. Applied Thermal Engineering, Volume 51, Issues 1–2, March 2013, Pages 212-217.

[16] Мостовой А.П. Исследование режима нагрева ферромагнитных заготовок в двухчастотном индукционном нагревателе дискретно-непрерывного действия [Текст] / Данилушкин А.И., Кожемякин А.В., Мостовой А.П. // Вестник СГТУ. Сер. Технические науки. Самара, 2011. – № 3 (72). С. 111–116.

[17] Данилушкин А.И., Кожемякин А.В., Мостовой А.П. Двухчастотный индукционный нагреватель как объект оптимизации [Текст] / // Электроэнергетика глазами молодежи. Научные труды международной научно-технической конференции: сборник статей. В 3 т. Т.1. – Самара: СамГТУ, 2011. –С. 353-357.

Построение и моделирование системы агрегированного регулирования температурных режимов индукционного нагрева

Дьяконов А.И.
Институт автоматики и информационных технологий Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
dyakonovartem@yandex.ru

Капустина А.В.
Институт автоматики и информационных технологий Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
alenakapustina@outlook.com

***Abstract* — This paper is devoted to the application of aggregate control method to the distributed parameter object. The process of induction heating is considered as a control object. In MATLAB software built up a linear one-dimensional mathematical model of induction heating process. Control algorithms close respect to time optimal is obtained. Numerical simulation results of feedback control system with aggregate controller are shown.**

Ключевые слова — индукционный нагрев, субоптимальное управление, агрегированное управление, регулятор

I. Введение

В настоящее время существует целый ряд работ, посвященных управлению агрегированными макропеременными в сложных системах управления [1,5].

Идея построения систем агрегированного управления динамическими объектами заключается в переходе от управления переменными в пространстве состояний к управлению макропеременными, являющимися некоторыми функциями этих переменных. На первом этапе осуществляется управление движением объекта из произвольного начального состояния к притягивающему многообразию, на втором этапе – управление движением объекта вдоль притягивающего многообразия к началу координат фазового пространства. Соответствие требуемым показателям качества при этом обеспечивается выбором параметров обратных связей в системе управления.

Притягивающие многообразия представляют собой множества, на которых должна достигаться цель управления и обеспечиваться необходимые показатели качества.

Динамика изменения макропеременных описывается дифференциальными уравнениями первого порядка, решения которых минимизируют квадратичный интегральный функционал качества стандартного вида. При соответствующем выборе функциональной зависимости макропеременных от фазовых координат такой выбор критерия эффективности приводит к управлению, близкому к оптимальному по быстродействию на первой стадии движения объекта к притягивающему многообразию и обеспечивает требуемые динамические характеристики системы при малых отклонениях от положения равновесия [5].

Вычисление полных производных макропеременных на уравнениях модели объекта приводит к функциональному уравнению, по которому непосредственно синтезируются искомые алгоритмы управления с обратными связями.

В настоящей работе исследуются возможности применения данной методики к построению системы агрегированного управления процессом индукционного нагрева.

II. Алгоритм субоптимального управления процессом индукционного нагрева

Рассматриваемый объект с распределенными параметрами (ОРП) - процесс индукционного нагрева, - описывается в отклонениях $z_n = \overline{\theta_n} - \overline{\theta_n^*}, z = (z_n)$ временных мод $\overline{\theta_n}$ температурного поля от их равновесного состояния $\overline{\theta_n^*}$ бесконечной системой уравнений с граничными условиями третьего рода [5]

$$\frac{dz_n}{dt} = -\mu_n^2 z_n + W_n v(t), n = \overline{1, N_1}, N_1 \le \infty, \qquad (1)$$

где W_n - модальные составляющие функции пространственного распределения внутреннего тепловыделения, μ_n^2 - собственные числа линейного приближения исходной модели объекта управления, $v(t)$ - внутреннее сосредоточенное управляющее воздействие по суммарной удельной мощности электромагнитных источников тепла, стесняемое ограничением $v_{min} \le v(t) \le v_{max}$.

Для учета такого ограничения в контур управления вводится вспомогательный интегратор с малой постоянной времени T_0 и условным управлением ϑ_0 на его входе

$$T_0 \frac{dz_0}{dt} = \vartheta_0. \qquad (2)$$

Управляющее воздействие $v(t)$ при этом представляется в виде нелинейной функции:

$$v(t) = L_1 + L_2 th(\eta z_0), \qquad (3)$$

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

где $\eta = const > 0,\ -1 \le th(\eta z_0) \le 1$ и коэффициенты L_1, L_2 задаются соотношениями

$$L_1 = \frac{v_{max} + v_{min}}{2}, L_2 = \frac{v_{max} - v_{min}}{2}. \quad (4)$$

Таким образом, рассматриваемый объект управления с распределенными параметрами в расширенном фазовом пространстве (z, z_0) описывается системой уравнений (2)-(5):

$$\frac{dz_n}{dt} = -\mu_n^2 z_n + W_n(L_1 + L_2 th(\eta z_0)), n = \overline{1, N_1}. \quad (5)$$

Рассматривается задача поиска алгоритма управления с обратной связью объектом управления (2)-(5), обеспечивающего его перевод из произвольного начального состояния сначала в окрестность заданного притягивающего многообразия, описываемого уравнением

$$\psi(z, z_0) = 0, \quad (6)$$

а затем последующее асимптотически устойчивое движение в пределах этого многообразия к точке равновесия $z = 0$ с требуемыми показателями качества.

Траектория движения макропеременной ψ к многообразию (6) описывается решением дифференциального уравнения

$$T\frac{d\psi}{dt} + \psi = 0, T = const > 0, \quad (7)$$

которое принадлежит подсемейству устойчивых экстремалей, минимизирующих квадратичный функционал качества вида [1]:

$$I = \int_0^\infty [T^2 (\frac{d\psi}{dt})^2 + \psi^2] dt \to min. \quad (8)$$

Вычислив производные $\frac{d\psi}{dt}$ с учетом уравнений рассматриваемого объекта и подставляя полученное выражение в уравнение (7) траектории движения, получим выражение для поиска функции $\vartheta_0(z, z_0)$, которая определяет искомый алгоритм управления

$$T\{\frac{1}{T_0}\frac{d\psi}{dz_0}\vartheta_0 + \sum_{n=1}^{N_1}\frac{d\psi}{dz_n}[-\mu_n^2 z_n + W_n(L_1 + L_2 th(\eta z_0))]\} + \psi = 0. \quad (9)$$

Выберем макропеременные в виде

$$\psi(z, z_0) = th[L_1 + L_2 th(\eta z_0) + \sum_{n=1}^{N_1}\beta_n z_n]. \quad (10)$$

Таким образом, уравнение (9) с макропеременной (10) принимает вид:

$$\frac{T}{ch^2 P}\{\frac{L_2\eta}{T_0 ch^2(\eta z_0)}\vartheta_0 + \sum_{n=1}^{N_1}\beta_n[-\mu_n^2 z_n + W_n(L_1 + L_2 th(\eta z_0))]\} + thP = 0, \quad (11)$$

где $P = L_1 + L_2 th(\eta z_0) + \sum_{n=1}^{N_1}\beta_n z_n$. Решая это уравнение относительно $v_0(z, z_0)$, получим выражение для искомого алгоритма управления, определяющего структуру регулятора:

$$\vartheta_0(z, z_0) = -2T_0\frac{ch^2(\eta z_0)}{\eta v_{max}}\{\frac{1}{2T}sh(2P) + \sum_{n=1}^{N_1}\beta_n[-\mu_n^2 z_n + \frac{W_n v_{max}}{2}(1 + th(\eta z_0))]\}. \quad (12)$$

В пределах притягивающего многообразия (6) по его определению макропеременная равна нулю. В любой точке фазового пространства, не принадлежащей этому многообразию $\psi(z, z_0) = C \neq 0$, причём, чем больше расстояние от гиперповерхности (6), тем больше величина $|C|$. Это означает, что на достаточно большом удалении изображающей точки от притягивающего многообразия величина макропеременной, выбранной в виде (10), становится близкой к ее максимальной по модулю величине, равной единице, в силу свойств функции $th(z, z_0)$, то есть

$$|\psi| \approx 1. \quad (13)$$

Поскольку на любом участке траектории движения объекта к притягивающему многообразию поведение макропеременной описывается базовым уравнением (7), то на временных промежутках, где выполняется соотношение (13), соблюдается равенство

$$\left|T\frac{d\psi}{dt}\right| = |\psi| \approx 1. \quad (14)$$

Следовательно, подынтегральная функция критерия (8) на этих промежутках принимает следующий вид:

$$T^2(\frac{d\psi}{dt})^2 + \psi^2 \approx 2. \quad (15)$$

При этом сам критерий оптимальности в силу (15) становится подобным критерию быстродействия:

$$I = \int_0^{t_n} T^2(\frac{d\psi}{dt})^2 + \psi^2 dt = 2\int_0^{t_n} dt = 2t_n, \quad (16)$$

где $[0, t_n]$ - временной интервал движения системы в расширенном фазовом пространстве на достаточном удалении от гиперповерхности (6). Таким образом, в

пределах указанного интервала процесс управления объектом оказывается близким к оптимальному по быстродействию. При этом сохраняется асимптотически устойчивое движение к многообразию (6) вплоть до достижения равенства $\psi = 0$ и далее вдоль этого многообразия к началу координат фазового пространства на последнем участке, в пределах которого требуемое качество процесса управления обеспечивается надлежащим выбором коэффициентов обратных связей β_n.

На достаточно малых расстояниях от гиперповерхности (6), где снова в силу свойств функции $th(z, z_0)$ величина макропеременной принимает вид

$$\psi(z, z_0) = th[v(t) + \sum_{n=1}^{N_1} \beta_n z_n] \approx v(t) + \sum_{n=1}^{N_1} \beta_n z_n. \quad (17)$$

Подынтегральная функция критерия (8) в условиях (17) принимает существенно отличающийся от (15) вид:

$$T^2 (\frac{d\psi}{dt})^2 + \psi^2 \approx (v(t) + \sum_{n=1}^{N_1} \beta_n z_n)^2 + \\ + T^2 \left(\frac{d(v(t) + \sum_{n=1}^{N_1} \beta_n z_n)}{dt} \right)^2. \quad (18)$$

Таким образом, критерий (8) на данном участке представляет собой стандартный квадратичный критерий качества.

При движении вдоль многообразия (6) к началу координат фазового пространства согласно (3) и (10) получим

$$\psi(z, z_0) = th[v(t) + \sum_{n=1}^{N_1} \beta_n z_n] = 0. \quad (19)$$

Отсюда следует равенство нулю аргумента функции $th[v(t) + \sum_{n=1}^{N_1} \beta_n z_n]$, что определяет линейный закон управления на данном заключительном этапе:

$$v(z) = -\sum_{n=1}^{N_1} \beta_n z_n. \quad (20)$$

При этом соблюдаются следующие равенства:

$$\psi = 0, \frac{d\psi}{dt} = 0, T^2 (\frac{d\psi}{dt})^2 + \psi^2 = 0. \quad (21)$$

Как следует из (8), на данном участке соответствующая составляющая критерия оптимальности достигает своего глобального минимума, равного нулю.

Таким образом, за счет различного поведения подынтегральной функции сопровождающего функционала (8) в разных областях фазового пространства процесс управления характеризуется переменным во времени критерием оптимальности, отвечая типичным требованиям быстродействия на первом этапе перевода объекта на притягивающее многообразие и минимизации стандартных квадратичных оценок на последующих интервалах движения к положению равновесия.

Алгоритм (20) управления движением вдоль притягивающего многообразия может быть реализован только при значениях управляющих воздействий, не нарушающих ограничений $v_{min} \le v(z) \le v_{max}$, следовательно, попадание изображающей точки на это многообразие происходит как раз на предельно допустимых величинах

$$v(z) = v_{max} \text{ или } v(z) = v_{min}. \quad (22)$$

Выражения (22) определяют управляющие воздействия на всем протяжении интервала $[0, t_n]$ в соответствии с известными свойствами оптимальных по быстродействию процессов.

Таким образом, можно утверждать, что с малой погрешностью достаточно сложный точный алгоритм управления (12) макропеременной (10) сводится к легко реализуемому инженерными средствами линейному закону управления с ограничениями

$$v(z) = \begin{cases} -\sum_{n=1}^{N_1} \beta_n z_n, \ v_{min} \le -\sum_{n=1}^{N_1} \beta_n z_n \le v_{max}; \\ v_{max}, \ -\sum_{n=1}^{N_1} \beta_n z_n > v_{max}; \\ v_{min}, \ -\sum_{n=1}^{N_1} \beta_n z_n < v_{min}. \end{cases} \quad (23)$$

В частности можно принять

$$\beta_n = K \varphi_n(\mu_n, x_c), \quad (24)$$

где $\varphi_n(\mu_n, x_c)$ - фиксируемые в точке $x_c \in [x_0; x_1]$ собственные функции разложения в сходящийся ряд температурного поля $\theta(x,t)$, описываемого с точностью до вектора N_1 выражением:

$$\theta(x,t) = \sum_{n=1}^{N_1} \overline{\theta_n}(\mu_n, t) \varphi_n(\mu_n, x), x \in [x_0; x_1], \quad (25)$$

на отрезке изменения пространственной переменной x.

Учитывая (25), получим на участке (20) с линейной обратной связью:

$$v(z) = -K \sum_{n=1}^{N_1} \varphi_n(\mu_n, x_c) z_n = \\ = -K[\theta_n(x_c, t) - \theta^*(x_c)]. \quad (26)$$

Таким образом, алгоритм управления (23) в условиях (24) сводится к построению системы управления температурным полем $\theta(x_c,t)$ в точке x_c , если надлежащим выбором коэффициента передачи K пропорционального с ограничением регулятора можно обеспечить требуемые показатели качества управляемого процесса.

Структурная схема замкнутой системы для реализации алгоритма управления (23), (24) показана на рисунке 1.

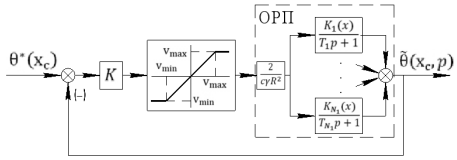


Рис. 1. Замкнутая система управления

где передаточная функция объекта управления $S(x_c,p)$ представляется в виде параллельного соединения N_1 апериодических звеньев с постоянными времени $T_n = 1/\mu_n^2$ и известными коэффициентами $K_n(x_c)$ [6]:

$$S(x_c,p) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_n(x_c)}{T_n p + 1}. \qquad (27)$$

III. Расчетные результаты численного моделирования системы управления

В программном пакете Matlab построена замкнутая система управления температурой в точке $x_c = R$ на поверхности алюминиевой цилиндрической заготовки в ее центральном сечении. Габаритные размеры индуктора и заготовки и теплофизические характеристики подробно описаны в [7].

Модель объекта управления вида (27) при $N_1 = 7$ с рассчитанными коэффициентами усиления $K_1 = 8{,}3\cdot10^5$, $K_2 = 6{,}1\cdot10^3$, $K_3 = 539$, $K_4 = 123$, $K_5 = 40$, $K_6 = 17$, $K_7 = 8$ и постоянными времени $T_1 = 1{,}9\cdot10^7$, $T_2 = 2{,}5\cdot10^5$, $T_3 = 7{,}7\cdot10^4$, $T_4 = 3{,}7\cdot10^4$, $T_5 = 2{,}1\cdot10^4$, $T_6 = 1{,}4\cdot10^4$, $T_7 = 9{,}8\cdot10^3$.

Переходная характеристика для температуры $\theta(R,t)$ при управлении процессом нагрева заготовки до $500^\circ C$ в замкнутой системе агрегированного регулирования при $K = 1$ показана на рисунке 2.

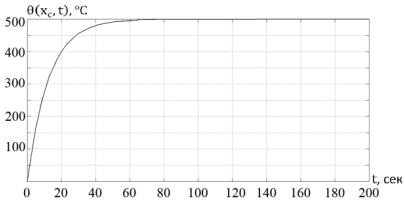


Рис. 2. Переходная характеристика

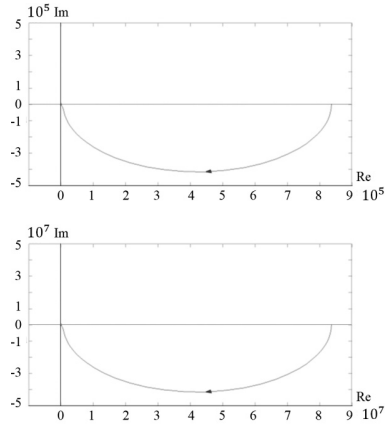


Рис. 3. АФХ замкнутой системы для $K = 1$ и $K = 100$

Устойчивость замкнутой системы управления обеспечивается при любом выбранном коэффициенте пропорционального регулятора K , как это следует из амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы, показанной на рисунке 3. Конкретная величина K может быть выбрана из условий обеспечения требуемой точности системы при заданном уровне возмущающих воздействий.

IV. Заключение

В работе исследована возможность построения системы агрегированного управления процессом периодического индукционного нагрева.

Получен алгоритм субоптимального по критерию быстродействия управления с обратной связью по температуре процессом индукционного нагрева.

Рассмотренный метод АКАР синтеза регулятора может быть применен к системам с нелинейными и многомерными моделями процесса индукционного нагрева.

Список литературы

[1] Колесников А.А. Последовательная оптимизация нелинейных агрегированных систем управления// Энергоатомиздат, 1987.

[2] Колесников А.А. Синергетическая теория управления// Энергоатомиздат, 1994.

[3] Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами// Наука, 1975

[4] Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами// Высшая школа, 2005.

[5] Рапопорт Э.Я. Аналитическое конструирование агрегированных регуляторов в системах с распределенными параметрами// Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. - С.38-54.

[6] Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами// Высшая школа, 2003.

[7] Плешивцева Ю.Э., Попов А.В., Дьяконов А.И. Двумерная задача оптимального по типовым критериям качества управления процессом сквозного индукционного нагрева // Вестн. самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки.– Самара, 2014. - С.148-163.

Энергоэффективность электротехнологических комплексов при переработке полимеров

Зимин Л.С.
СамГТУ
Самара, Россия
epp@samgtu.ru

Леоненко А.С.
СамГТУ
Самара, Россия
epp@samgtu.ru

Сорокин А.Г.
СамГТУ
Самара, Россия
Prepodepp@yandex.ru

***Abstract* — Work is devoted to increase in energy efficiency of processing of polymeric materials in electrotechnological complexes by means of application of induction heating. Electromagnetic and thermal models in the interfaced physically heterogeneous environments are developed. The analysis of methods of modeling of electromagnetic and thermal fields is carried out. By means of the finite-element method implemented programmatically the electrothermal model of an induction heating system for production of plastic is simulated by method of casting and electromagnetic and thermal fields are investigated. Results of calculation are given in a numerical model. The presented mathematical model of an induction heating system can be used at design of technological complexes of production of plastic. The original induction heating system for production of plastic is offered by a casting method. The originality of the offered construction is that with a frequency of 50 Hz there will be energy liberation in the screw and a possibility of heating of plastic from two parties. This technological complex of induction heating will allow to make temperature monitoring in a polymeric product and also to consider the impact of this or that perturbing influence. The key power indicators and operation algorithms which provide required temperature distribution in the heated polymeric material are defined.**

Ключевые слова — программные продукты, переработка полимерных изделий, литьевая машина, экструдер, электротепловая модель, методы моделирования.

I. Введение

Постоянно возрастающий уровень мировой экономики сильно зависит от уровня развития переработки и применения полимеров, которые широко применяются в различных отраслях промышленности.

В настоящее время увеличилась роль качества полимерной продукции бытового и технического назначения. Это объясняется наличием аналогичных товаров различных производителей. Наивысший покупательский интерес представляют изделия более высокого качества и более дешевые. Цена, которую покупатель готов заплатить за изделие, так же зависит от качества продукции. Поэтому в настоящее время решающее значение приобретает конкурентоспособность продукции.

Конкурентоспособностью продукции назовем отношение качества продукции к ее цене. Качество - это соответствие продукции ее назначению. В показатели качества входят внешний вид изделия, эстетические показатели, эксплуатационные свойства и другие.

Конкурентоспособность литьевой продукции во многом зависит от проработки изделия на стадии технологической подготовки производства. Например, цена изделия зависит от стоимости выбранного материала, производительности литья, от расхода сырья в каждом цикле, от процента брака. Качество изделий (внешний вид, блеск, равномерность окраски, утяжины и др. показатели) зависят от правильной организации подготовки материала к переработке и технологии литья, которые изготовитель определяет на стадии разработки технологического процесса. Технологичность разных изделий различна. Известно, что одни литьевые изделия технологичны (легки в изготовлении). Изготовление других изделий вызывает постоянные трудности по различным причинам. Последнее связано с тем, что при разработке изделия и технологии его получения не учитывали всё многообразие взаимосвязанных факторов, которые объективно существуют при литье пластмассовых изделий. Опытные разработчики и технологи “интуитивно” осознают эти факторы и учитывают их при разработке изделий и технологии литья. Перерабатываемость полимерного материала определяет его формуемость. Конкретное изделие, его конфигурация и размеры определяют выбор полимерного материала по вязкости и особенности оснастки. В свою очередь материал и конфигурация изделия определяют технологию литья и влияют на выбор технологического оборудования. Важное значение имеет также правильная организация входного контроля и подготовка материала к переработке.

II. Основная часть

Электрический нагрев применим в любых технологических процессах; практически не ограничены возможности по интенсивности. Но в зависимости от назначения нагрева, физических свойств нагреваемых материалов и технологических условий это достигается различными способами нагрева. Применение электрического нагрева поднимает культуру производства, а также серьезно улучшает условия труда обслуживающего персонала. Эта тенденция будет все более усиливаться по мере снижения стоимости электроэнергии, совершенствования технологии процессов, повышения уровня производства, укрепления экономики. Вместе с тем излишняя осторожность с применением электрического на тормозит технический прогресс снижает эффективность электрификации.

Эффективной является система индукционного нагрева Для создания температурного поля, которое равномерно распределено по объему нагреваемого полимера, необходимо моделирование тепловых и электромагнитных полей посредством программных средств.

Предлагаемая для исследования в работе конструкция гидравлической литьевой машины для переработки полимерных изделий схематично представлена на рис.1. Из приемного бункера (3) сырье

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

(7) попадает в цилиндр пластикации (2) и посредством вращения шнека (6) равномерно распределяется по его длине. Шнек приводится в движение с помощью двигателя (1). Индуктор (4) нагревает цилиндр и шнек, далее с помощью шнека расплавленный материал через сопло выливается в пресс – форму штамповочного устройства (5). Рабочая станция (8) осуществляет управление всей системой.

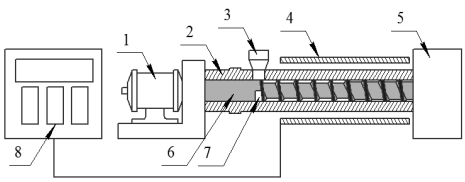


Рис. 1. Схема системы индукционного нагрева

При всем многообразии схем индукционного нагрева для нашего случая выбираем схему, при которой индуктор (4) охватывает цилиндр пластикации (2) и находящихся в нем полимерного материала (7) и шнека (6). Она проста в исполнении и имеет относительно небольшие габариты рис. 2.

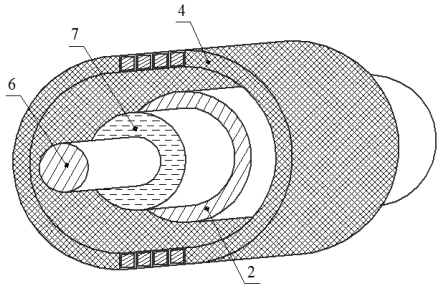


Рис. 2. Схема системы индукционного нагрева

Все процессы в сфере материального производства связаны с потреблением того или иного вида энергии. Чем больше энергии приходится на одного работающего, то есть чем выше энерговооруженность труда, тем больше выработка, выше производительность труда. Энергия является важнейшим фактором, способствующим непрерывному повышению производства и улучшению качества продукции, удлинению сроков ее сохранности.

В связи с этим все большее значение приобретает электрификация тепловых процессов, которая в последние годы получила значительное развитие как в нашей стране, так и в ряде зарубежных стран. Большим преимуществом электроснабжения и теплоснабжения является то, что от одного энергетического ввода (электрического) можно получить все виды энергии, в которых нуждается потребитель: механическую, лучистую, тепловую и электрическую. Такая высшая степень электрификации становится возможной благодаря большим успехам в развитии отечественной электроэнергетики, прогрессу атомной энергетики, снижению себестоимости электроэнергии. Она является закономерным следствием непрерывного возрастания роли электрической энергии во всех отраслях народного хозяйства.

Для расчета электромагнитных и тепловых полей в указанной постановке требуется разработка численных методов и их качественная реализация в виде программных средств.

Профессиональные пакеты прикладных программы (Femlab, Elcut, LS-DYNA, Maxwell, Nastran, Ansys, Cedrat Flux,) созданные на базе теоретических разработок позволяют решать задачи моделирования в различных областях знания и служат мощным инструментом при оптимальном проектировании систем нагрева с помощью встроенных или внешних алгоритмов оптимизации. Сочетание численных методов расчета и поисковых процедур оптимизации дает возможность решать различные задачи проектирования.

Модели, которые учитывают взаимное влияние электромагнитного и температурного полей в процессе нагрева называются электротепловыми рис. 3. Они дают полную характеристику индукционного устройства с точки зрения потребления энергии от внешнего источника питания и выделения ее в цилиндре и шнеке.

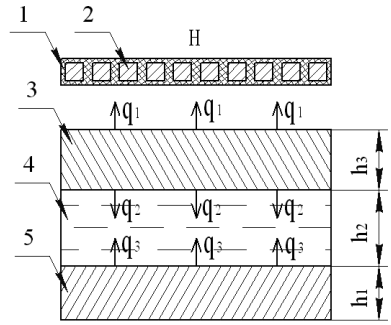


Рис. 3. Электротепловая задача

В общем случае процесс индукционного нагрева описывается нелинейными уравнения ми Максвелла для электромагнитного поля с соответствующими краевыми условиями [1, 2]:

$$rot\,\dot{H} = \frac{1}{\rho}E + \frac{\partial D}{\partial t};\ rot\,\dot{E} = -\frac{\partial \dot{B}}{\partial t};\ div\,\dot{H} = 0;\ div\,\dot{E} = 0 \quad (1)$$

Здесь $\dot{H}$, $\dot{B}$, $\dot{E}$, $\dot{D}$ - векторы напряженности и индукции магнитного и электрического полей.

Исходная постановка нелинейной электромагнитной задачи выражается через векторный потенциал общим уравнением Пуассона в двумерной области [1, 2]:

$$rot\left(\frac{1}{\mu_a}rot\,\dot{A}\right) + \gamma\frac{\partial \dot{H}}{\partial t} = \dot{J}_0;\ rot\,\dot{A} = \dot{B};\ div\,\dot{A} = 0 \quad (2)$$

Следующим этапом исследования является разработка математической модели тепловых процессов

в сложной физически неоднородной среде. Характер распределения и удельная плотность мощности внутренних источников тепла определены в результате решения электромагнитной задачи. По причине того, что по длине индуктора не происходит значимых изменений электрических параметров системы, необходимо рассматривать задачу в двумерной постановке. Поэтому математическая формулировка задачи приводится к системе линейных дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности [3]:

$$\frac{\partial T_1(r,x,t)}{\partial t} = a_1\left[\frac{\partial^2 T_1(r,x,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T_1(r,x,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1(r,x,t)}{\partial x^2}\right] + \frac{W(r,x,t)}{c\gamma} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_2(r,x,t)}{\partial t} = a_2\left[\frac{\partial^2 T_2(r,x,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T_2(r,x,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2(r,x,t)}{\partial x^2}\right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_3(r,x,t)}{\partial t} = a_3\left[\frac{\partial^2 T_3(r,x,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T_3(r,x,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3(r,x,t)}{\partial x^2}\right] + \frac{W(r,x,t)}{c\gamma} \quad (5)$$

Здесь $T_1(r,x,t)$ - температура стенки цилиндра пластикации, $T_2(r,x,t)$ - температура полимера,

$T_3(r,x,t)$ - температура шнека, r и x - радиальная и аксиальная координаты, t - время процесса,

γ - плотность материала цилиндра и шнека, c - удельная теплоемкость цилиндра и шнека, $W(r,x,t)$ - функция распределения внутренних источников тепла, полученных в результате решения электромагнитной задачи, a_1 - коэффициент температуропроводности цилиндра пластикации,

a_2 - коэффициент температуропроводности полимера, a_3 - коэффициент температуропроводности шнека.

Граничные и начальные условия имеют вид:

$$\lambda_1 \left.\frac{\partial T_1(r,x,t)}{\partial x}\right|_{x=0} = \alpha_1\left[T_1(r,0,t) - T_C(r,0,t)\right]$$

$$\lambda_1 \left.\frac{\partial T_1(r,x,t)}{\partial r}\right|_{r=r_1} = \alpha_1\left[T_1(r_1,x,t) - T_C(r_1,x,t)\right] \qquad \left.\frac{\partial T_3(r,x,t)}{\partial r}\right|_{r=0} = 0$$

$$\lambda_1 \left.\frac{\partial T_1(r,x,t)}{\partial x}\right|_{x=X} = \alpha_2\left[T_1(r,X,t) - T_C(r,X,t)\right] \qquad T_1(r,X,0) = T_{10}$$

$$\lambda_3 \left.\frac{\partial T_3(r,x,t)}{\partial x}\right|_{x=0} = \alpha_3\left[T_3(r,0,t) - T_C(r,0,t)\right] \quad T_2[r,x,t]_{x=0} = T_{20}(r,t)$$

$$\lambda_3 \left.\frac{\partial T_3(r,x,t)}{\partial x}\right|_{x=X} = \alpha_4\left[T_3(r,X,t) - T_C(r,X,t)\right] \quad T_2(r,X,0) = T_{20}(r,X)$$

$$\lambda_1 \left.\frac{\partial T_1(r,x,t)}{\partial r}\right|_{r=R_2} = \lambda_2 \left.\frac{\partial T_2(r,x,t)}{\partial r}\right|_{r=R_2} \quad T_1(R_2,x,t) = T_2(R_2,x,t)$$

$$\lambda_2 \left.\frac{\partial T_2(r,x,t)}{\partial r}\right|_{r=R_3} = \lambda_2 \left.\frac{\partial T_3(r,x,t)}{\partial r}\right|_{r=R_3} \quad T_2(R_3,x,t) = T_3(R_3,x,t)$$

Здесь λ_1 - коэффициент теплопроводности цилиндра пластикации, λ_2 - коэффициент теплопроводности полимера, λ_3 - коэффициент теплопроводности шнека, α - коэффициент теплообмена.

Решение тепловой задачи выполним, используя первый закон термодинамики записанный в виде дифференциальных уравнений для объемных тел:

$$\gamma c\left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\nu)^T (L)T\right] + (L)^T (q) = \ddot{q} \quad (7)$$

Здесь $\ddot{q}$ - скорость образования тепла в конечном объеме, (q) - вектор теплового потока;

$(L)^T$ - векторный оператор, (ν) - вектор, характеризующий скорость переноса тепла.

Связь между вектором теплового потока и температурным градиентом устанавливается по закону Фурье[3]:

$$(q) = -[D](L)T \quad (8)$$

Объединение двух последних уравнений дает уравнение вида:

$$\gamma c\left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\nu)^T (L)T\right] + = (L)^T ([D](L)T) + \ddot{q} \quad (9)$$

В ходе моделирования получены решения электромагнитной задачи. Результаты расчета представлены на рис. 4 график распределения удельной объемной мощности по длине цилиндра (кривая 1) и шнека (кривая 2), на рис. 5 график распределения плотности тока по длине цилиндра (кривая 1) и шнека (кривая 2).

На рис. 6 представлена зависимость перепада температуры от времени нагрева.

Зависимость электрического коэффициента полезного действия и коэффициента мощности от частоты представлена на рис. 7.

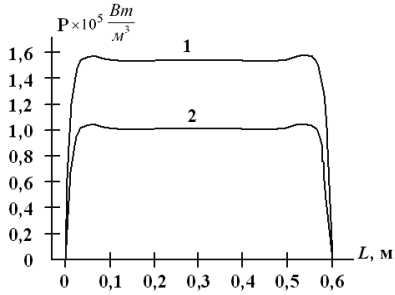


Рис. 4. Распределения удельной объемной мощности

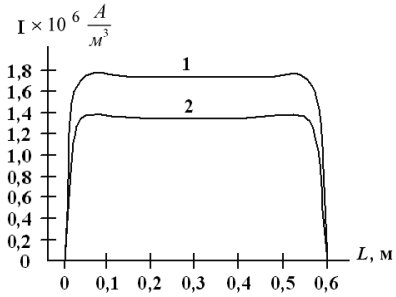


Рис. 5. Распределения плотности тока

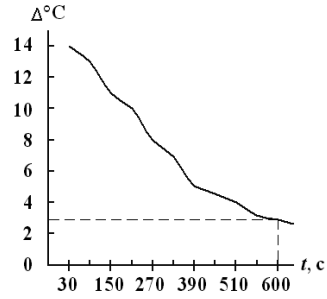


Рис. 6. Зависимость перепада температуры от времени нагрева

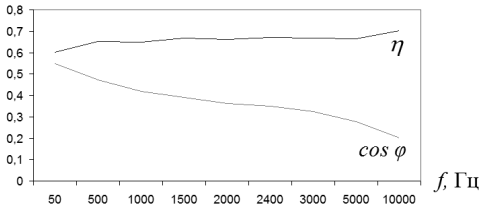


Рис. 7. Зависимость η и $\cos\varphi$ от частоты

III. Заключение

Работа данной установки рис. 8,. осуществляется посредством программного управления рабочей станции 1, при котором обеспечивается заданная точность и минимум времени нагрева. Здесь 2 – индуктор, 3 – цилиндр,4 - полимер, 5 – шнек.

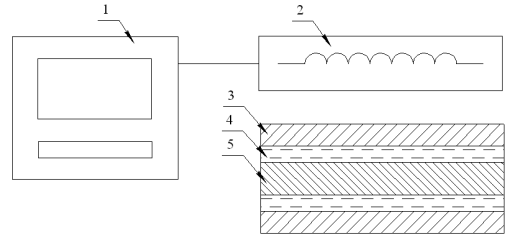


Рис. 8. Схема индукционного нагрева

Из графика видно, что нагрев полимерного материала осуществляется от цилиндра пластикации и шнека. Как следует из представленных графиков, удельная объемная мощность по сечению максимальна на поверхности цилиндра и шнека, уменьшаясь по мере проникновения вглубь

Данная модель была реализована в программном пакете Elcut и получены следующие результаты - η = 0,602, $\cos\varphi$ = 0,549. Поэтому, учитывая ряд конструктивных требований к индукционной системе, в частности, минимизацию размеров индуктора и условия согласования параметров индуктора с источником питания, в качестве энергетических параметров следует выбрать - частоту f = 50 Гц. При найденных параметрах индукционного нагревателя температурное распределение в полимерном материале достигает заданного значения. Погрешность в стационарном режиме составляет 3 °С что полностью удовлетворяет технологии переработке полимерных материалов.

Список литературы

[1] Басов Н.И. Техника переработки пластмасс. М., Химия, 1985. – 527 с.

[2] Бернхардт Э. Переработка термопластичных материалов. М., Госхимиздат, 1962. – 747с.

[3] Слухоцкий, А.Е. Установки индукционного нагрева [Текст] / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков // - Л.:Энергоиздат,1981. – с. 328.

[4] Сорокин А.Г. Идентификация математической модели системы индукционного нагрева при производстве пластмассы методом литья [Текст]//Л.С. Зимин// Вестн. Самар. Гос. Техн. Ун-та. Сер. Техн. Науки. – 2012. Вып. № 4(36) – с. 163-168.

[5] Сорокин А.Г. Индукционный нагрев при производстве пластических масс[Текст]//Л.С. Зимин// Вестн. Самар. Гос. Техн. Ун-та. Сер. Техн. Науки. – 2016. Вып. № 4(52) – с. 71-76.

Моделирование движения в задачах индукционного нагрева

Клочкова Н.Н.
Кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий»
СамГТУ
Самара, Россия
klochkowa.nata@yandex.ru

Обухова А.В.
Кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий»
СамГТУ
Самара, Россия
av.obukhova@yandex.ru

Проценко А.Н.
Кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий»
СамГТУ
Самара, Россия
alex290853@yandex.ru

***Abstract* — this article describes the methods of modeling the complex motion of heated billets in induction plants to improve the efficiency of the mathematical models. To ensure the uniformity of heating is necessary to use different types of movement of the workpiece. This can be a rotating or reciprocating motion of the workpiece, the translational motion of the workpiece column. Often requires a combination of several types of movement. Modeling such processes leads to excessive demands on computing resources. In the present article several methods of motion replacement by change of physical parameters or replacement of one complex motion by several simple ones are given. This can significantly increase the efficiency of computational experiments.**

Ключевые слова — индукционный нагрев, замена движения, изменение параметров, математическая модель.

I. Введение

Индукционный нагрев - это сложное физическое явление, включающее сложное взаимодействие электромагнитных и теплообменных процессов, которые тесно взаимосвязаны и сильно не линейны, поскольку физические свойства материалов зависят от напряженности магнитного поля и температуры. Математическое моделирование является одним из основных факторов успешного проектирования систем индукционного нагрева.

Для подавляющего большинства технологических операций индукционного нагрева ток индуктора имеет гармонический характер. На этом основании, математическую модель индукционного нагрева можно упростить, то есть, может быть введено гармоническое по времени электромагнитное поле.

Процесс нестационарной теплопередачи в металлической заготовке может быть описан уравнением Фурье:

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k\nabla T) = Q \qquad (1)$$

где T - температура, γ - плотность металла, c - удельная теплоемкость, k - теплопроводность, Q - плотность источников тепла.

Аналитические методы, популярные ранее, больше не удовлетворяют современных инженеров из-за присущих им ограничений. Вместо использования упрощенных вычислительных методов со многими ограничениями и низкой точностью, современные специалисты по индукционному нагреву применяют высокоэффективные численные методы, такие как метод конечных элементов. Этот метод широко и успешно используется при расчете электромагнитных полей и теплообменных процессов.

Численное компьютерное моделирование позволяет инженеру сравнительно быстро определить особенности процесса индукционного нагрева. Моделирование позволяет прогнозировать влияние различных взаимосвязанных нелинейных факторов нагреваемого изделия, технологических параметров процесса нагрева и конструкции индуктора на протекание процесса нагрева и конечные температурные кондиции [1, 2].

Существует множество разнообразных конструкций индукторов, но ни один из них не обеспечивает равномерного распределения тока внутри заготовки. Эта неоднородность источников тепла обусловлена электромагнитными явлениями, протекающими при индукционном нагреве, например скин-эффект, щелевой эффект, кольцевой эффект, эффект близости и т.д. Эти явления, наряду с другими, в зависимости от условий, могут быть полезными или вредными относительно технологии, и, как следствие, они могут вызывать ненужные температурные градиенты в нагреваемых заготовках.

В технологии индукционного нагрева широко используется движение заготовок. Например, цилиндрические заготовки в процессе нагрева вращаются, чтобы скомпенсировать несимметричное расположение деталей в индукторе улучшить равномерность нагрева. Перемещение заготовок также является основой работы проходных и методических индукционных нагревателей. Кроме того, в некоторых случаях для получения деталей, нагретых до требуемых условий, могут использоваться разные типы движения, как по отдельности, так и в разных комбинациях [3].

II. Обсуждение

Сложность математической модели может изменяться от простой вычисляемой вручную формулы до очень сложного численного анализа, для которого может потребоваться несколько часов вычислений с использованием современных суперкомпьютеров. Выбор конкретной теоретической модели зависит от нескольких факторов, включая сложность инженерной задачи, требуемую точность, временные ограничения и экономичность модели.

Проектировщику также необходимо помнить об ограничениях применяемых математических моделей, допущениях и возможных ошибках и учитывать условия

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

применения выбранной математической модели. Одна модель может хорошо работать в определенных приложениях и давать ошибочные результаты в других.

Во время вычислительных экспериментов в ходе проектирования индукционных нагревателей различной конструкции и режимов работы нередко возникают проблемы моделирования движения из-за отсутствия таких возможностей в используемом программном обеспечении или из-за чрезмерной сложности и неэффективности получаемых моделей.

III. Методы

В статье показаны возможные пути преодоления выше перечисленных проблем. Предлагается метод, основанный на едином подходе - замене движения.

Этот метод может быть реализован несколькими способами. Некоторые из них будут показаны ниже. Окончательный выбор зависит от конструкции индукционной установки, формы нагреваемой детали, технологии нагрева и программы, используемой для моделирования процесса индукционного нагрева.

IV. Результаты

A. Методический нагрев цилиндров

Известно, что при индукционном нагреве стали выше 800°C (точка Кюри) магнитные свойства теряются. В результате эффективность нагрева значительно снижается. Для решения этой проблемы, то есть для поддержания максимально возможной эффективности нагрева, на выходе индуктора устанавливается секция с повышенной частотой тока. Нагрев до точки Кюри происходит с низкой частотой, чаще всего 50 Гц. В последний период, который значительно короче, нагрев происходит с повышенной частотой, например, 1000 Гц. Эффективность нагрева будет максимальной, если частота изменяется в оптимальное время.

Индуктор такой конструкции был рассчитан с использованием программы ELCUT.

Геометрическая модель задачи, представленная на рисунке 1, содержит четыре блока нагреваемых цилиндров и несколько пар блоков, изображающих витки индуктора.

В программе ELCUT отсутствует возможность моделировать движение. Поэтому в ходе расчета были последовательно решены несколько связанных задач. Сначала заготовка нагревается до точки Кюри током с промышленной частотой 50 Гц. Затем заготовка должна нагреться выше точки Кюри при значительно повышенной частоте тока. Такой порядок нагрева, при слабом проявлении краевых эффектов [4], позволяет заменить движение заготовки между участками с разной частотой тока последовательным изменением свойств блоков геометрической модели от задачи к задаче [5, 6, 7] (рис. 1).

При решении первой задачи (рис. 1a) свойства нагреваемого металла задаются только для первого правого блока заготовки. Остальным блокам заготовок присваиваются свойства воздуха. В восьми витках индуктора (восемь пар блоков от правого конца катушки индуктивности) протекает ток 50 Гц, и для них задаются свойства меди. В результате была получена модель нагрева одиночной заготовки в соответствующем индукторе.

На рисунках 1b и 1c показано дальнейшее изменение геометрической модели для моделирования второй и третьей стадий нагрева, когда нагреваются сначала две и затем три заготовки, а индуктор с каждым разом становится все длиннее.

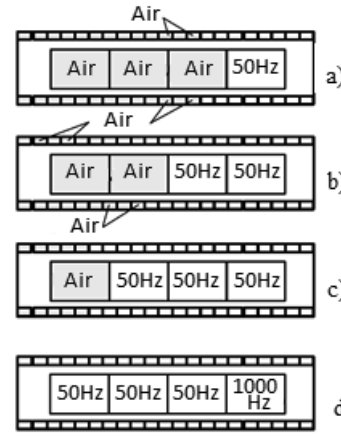


Рис. 1. Моделирование движения путем изменения свойств заготовок.

Конечная стадия нагрева (рис. 1d) отличается тем, что в правой части индуктора протекает ток 1000 Гц (шесть витков).

B. Сканирующий нагрев

Для закалки поверхности валов часто используется технология сканирующего нагрева. Обычно при сканирующих операциях нагрева перемещается закаливаемая деталь. Перемещение индуктора практически невозможно из-за большого сечения токопроводов и многочисленных шлангов системы охлаждения. В вычислительных экспериментах, решающее значение имеет только взаимное относительное перемещение, поэтому не имеет значения, что перемещается индуктор или деталь. Однако для уменьшения размеров расчетной области удобнее рассчитать движение индуктора, поскольку при сканирующем нагреве часто используется короткий одновитковый индуктор.

Для проектирования сканирующего нагрева с помощью программы ELCUT, движение индуктора можно заменить, применяя описанный выше подход изменения свойств геометрической модели. Модель рассматриваемой задачи (рис. 2) содержит несколько одинаковых блоков, каждый из которых представляет определенную фазу движения индуктора. На каждом этапе решения связанных задач только один из блоков является индуктором с током, остальные представлены в виде воздуха. Изменение количества и плотности индукторов позволяет регулировать точность аппроксимации движения индуктора.

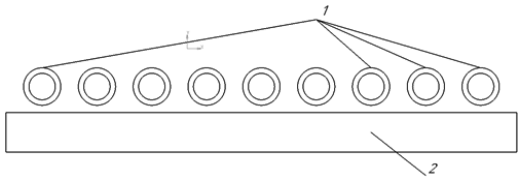


Рис. 2. Геометрическая модель сканирующей нагревательной индукционной установки. 1 - блоки рассматриваемые как одновитковый индуктор; 2 – закаливаемая деталь.

C. Закалка поверхности шаров

Индукционный нагрев шаров представляет определенную трудность именно из-за сферической формы закаливаемой детали. Проблема еще более усугубляется при индукционной закалки поверхности шаров [8].

При нагреве сферических деталей в соленоидальных индукторах зона максимального радиуса располагается ближе всего к индуктору и поэтому нагревается интенсивней остального объема шара (рис. 3а). Прокатывание шаров внутри индуктора не улучшает равномерность нагрева, поскольку точка поверхности, расположенная на оси вращения шарика, всегда остается самой ближней к индуктору точкой (рис. 3б).

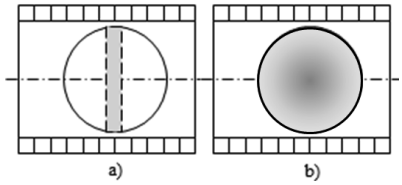


Рис. 3. На этом рисунке показана наиболее нагреваемая зона сферы в соленоидальном индукторе. а) – поступательное движение шара; б) - при прокатывании шара, интенсивность цвета соответствует интенсивности нагрева.

Исследование нагрева поверхности вращающегося шара в одновитковом индукторе [9, 10] показало неудовлетворительную однородность нагрева. Расчетная разница температур составляла 150°C при температуре нагрева около 1200°C.

Дополнительное вращение индуктора вокруг оси, перпендикулярной оси вращения шарика, значительно увеличивало равномерность нагрева. Разница температур снизилась до 50°C. Однако очевидно, что техническая реализация установки индукционного нагрева такой конструкции невозможна.

Эскиз конструкции, которая может быть технически реализована и может обеспечить взаимно перпендикулярное движение нагреваемой сферы и индуктора, показана на рисунке.

В индукционной установке предлагаемой конструкции индуктор имеет форму геликоиды. Это позволяет технически реализовать перемещение индуктора по внешней окружности шара (рис. 4) аналогично вращению вокруг шара одновиткового индуктора, используя только одно движение - прокатывание шара вдоль индуктора.

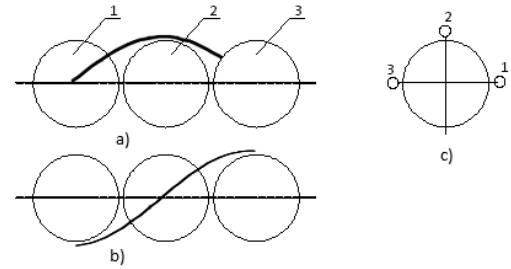


Рис. 4. Прокатывание шара вдоль индуктора винтовой формы: a - вид сбоку; b - вид сверху; в - изменение взаимного расположения индуктора и шара в процессе прокатывания. 1a, 2a, 3a - положение шара в процессе прокатки. 1c, 2c, 3c - относительное положение индуктора, соответствующее фазам движения шара.

При прокатывании шара вдоль индуктора в форме цилиндрической винтовой линии взаимодействие шара с индуктором приводит к образованию теплового следа на его поверхности в виде сферической винтовой линии - локсодромы. В процессе поступательно-вращательного движения шарика вдоль винтового индуктора относительное положение индуктора изменяется. В результате неподвижный винтовой индуктор действует на шар как одновитковый индуктор в процессе вращения.

При таком способе термообработки одним из основных управляющих воздействий, наряду с величиной индуктивного тока и его частотой, можно считать шаг винтового индуктора. Изменение шага винтового индуктора изменяет шаг сферической винтовой линии на поверхности шара и, следовательно, поверхностную плотность мощности.

Расстояние, пройденное сферой под индуктором или число оборотов сферы, определяет поверхностную плотность энергии вдоль линии локсодромы, а шаг винтового индуктора определяет шаг сферической винтовой линии, и это также меняет распределение поверхностной плотности энергии.

Задавая минимальный шаг винтового индуктора, мы получаем соленоидальный индуктор и максимальный нагрев зоны вдоль максимальной окружности шара. В этом случае нагрев, очевидно, будет самым неравномерным (рис. 3а).

Если шаг спирали индуктора бесконечен, мы получаем индуктор в виде прямой линии [11], который нагревает зону окружности шара, перпендикулярной окружности предыдущего случая. Отсюда следует, что некоторое промежуточное значение шага винтовой линии индуктора может обеспечить максимально возможную однородность нагрева, то есть оно будет оптимальным.

Модель исследуемого объекта, очевидно, может быть только трехмерной, поэтому решение проблемы предполагает использование программных систем, обеспечивающих возможность трехмерного моделирования, например, FLUX [12].

При расчете этого метода нагрева возникает необходимость моделирования сложного поступательно-вращательного движения сферы. Ввиду того, что FLUX

позволяет имитировать только простые движения, или поступательное, или вращательное, следует, заменить поступательное движение шара поступательным движением индуктора. После такой замены каждый из моделируемых объектов в отдельности будут совершать простые движения.

Однако в этом случае необходимо будет увеличить размер расчетной области. Размер расчетной области должен быть достаточным для обеспечения поступательного движения индуктора, имеющего значительную длину. Для больших вычислительных областей число конечных элементов достигает нескольких миллионов, и для решения могут потребоваться чрезмерно большие вычислительные ресурсы.

Преодолеть эти трудности позволяет использование предложенного подхода с заменой движения. В этом случае мы получаем экономичную модель с минимальными требованиями к памяти. Моделируется простое вращение сферы без ее поступательного движения. А поступательное движение сферы, или индуктора, во время которого изменяется положение индуктора относительно шара (рис. 4с), заменяется вращательным движением индуктора вокруг оси, перпендикулярной оси вращения сферы (рис. 5).

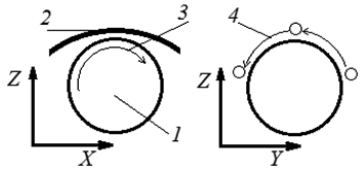


Рис. 5. Поступательное движение сферы заменено вращательным движением индуктора. 1-сфера; 2-индуктор; 3 - направление вращения сферы; 4 - направление перемещения индуктора.

Эффективность предлагаемого метода оценивалась на примере нагрева стального шара диаметром 20 мм в программе FLUX. Скорость вращения шара 100 об/мин, наружный диаметр индуктора 5 мм.

Модель с вращающимся индуктором длиной 32 мм и расчетной областью в виде куба с ребром 160 мм продемонстрировала следующие показатели: количество объемных элементов сферы 62265; количество объемных элементов индуктора 129391; количество объемных элементов расчетной области 135538; общее количество объемных элементов модели 327194; для расчета процесса нагрева при двух полных оборотах нагреваемого шара, потребовалось около 8 часов.

В модели с поступательным движением индуктора его длина должна быть не меньше длины окружности сферы на каждый оборот нагреваемой сферы. То есть, чтобы нагревать шар диаметром 20 мм в течение двух оборотов, длина винтового индуктора должна быть не менее 63 мм, размер пространства для его перемещения в два раза больше (рис. 6), а размер расчетной области еще больше. Таким образом, индуктор должен иметь длину 150 мм, а размер расчетной области в этом случае составляет не менее 500 мм.

После увеличения длины индуктора втрое и сохранения размера расчетной области была получена модель со следующими параметрами: количество объемных конечных элементов сферы 62265, индуктора 895589, вычисляемой области 113070; общее количество объемных конечных элементов модели 1070924; время, расчета процесса нагрева для двух полных оборотов нагретого шара, составляет более двух дней.

V. Заключение

Таким образом, была показана эффективность использования замещающего движения при моделировании индукционных нагревателей и расчетах процессов нагрева, в ходе которых нагреваемые заготовки совершают разнообразные движения. Было продемонстрировано несколько вариантов реализации предложенного способа. Метод изменения свойств объектов позволяет вообще избежать моделирования движения и тем самым значительно упростить вычислительную модель. Метод смены типа движения, замена поступательного на вращательный, позволяет существенно уменьшить размер вычислительной области, что очень полезно при использовании численных моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Алиферов А., Индукционный и электроконтактный нагрев металлов [Электронный ресурс] / А. Алиферов, С. Лупи - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. - 411 с.

[2] А.Е. Слухоцкий, В.Н. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунер, Установки индукционного нагрева, Издательство Энергоиздат, Санкт-Петербург, Россия, 1981.

[3] Сидоренко В.Д. Применение индукционного нагрева в машиностроении. Л.: Машиностроение. 1980, 231 с.

[4] В. Руднев, Д. Лавлесс, Р. Кук, М. Блэк, Справочник по индукционному нагреву, Марсель Деккер, Нью-Йорк, 2003.

[5] Фризен В.Э. Моделирование индукционного нагрева с помощью программы Elcut 4.21. Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине Методы расчета электромагнитных и тепловых полей. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ - УПИ, 2003. 27 с.

[6] Н.Н. Клочкова, А.В. Обухова, А.Н. Проценко «Использование программы ELCUT для моделирования двухчастотного индукционного нагрева». IV Международная научно-практическая конференция "Современные научные исследования: инновации и опыт" 2014 г., Екатеринбург

[7] А.Н. Проценко, С.С.Вечканов. «Методика решения класса задач двухчастотного индукционного нагрева мерных заготовок» Электронный научный журнал «APRIORI. Серия: Естественные и Технические науки» №4 2015

[8] Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т.: Т. 2. - 9-е изд., Перераб. и доп/под ред. И.Н. Жестковой. - М .: Машиностроение, 2006. - 912 с

[9] А.В. Обухова, Н.Н. Клочкова, А.Н. Проценко «Моделирование индукционной установки специального назначения средствами программного пакета Flux» в журнале "Materials Science Forum" (издательствао Trans Tech Publications, 2016

[10] А.В. Обухова, Н.Н. Клочкова, А.Н. Проценко. Проектировании одновиткового индуктора для закалки сферических деталей средствами программного пакета FLUX. Вестник Самарского государственного технического университета, №2(50), июнь 2016, С. 93-98

[11] Мищенко А. С, Фоменко А. Т. Краткий курс дифференциальной геометрии и топологии. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 304 с. — ISBN 5-9221-0442-X.

[12] Шарапова О.Ю. Численное моделирование процесса периодического индукционного нагрева на базе конечно элементного программного пакета FLUX. Вестник Самар. тех. ун-та. Технические науки. 2011. Вып. №7 (28). С. 180-185.

Выбор способа управления процессом плавки металла в индукционных тигельных печах различных типов

Кувалдин А.Б.
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»
г. Москва, Россия
FedinMA@mail.ru

Федин М.А.
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»
г. Москва, Россия
KuvaldinAB@mpei.ru

***Abstract* — The principle of identification of induction crucible furnaces of various types as control objects based on the combination of an electrical and thermal model is proposed in the article. The structure of the modern control system of an induction crucible furnace has been reviewed. Identification of the induction crucible furnace with lump loading was carried out. The principle of control of tunable thyristor frequency converter is proposed. A structural identification of the induction crucible mixer was carried out, a system for controlling the temperature of the melt by indirect parameters was proposed. The identification of the induction crucible furnace with a conductive crucible. A relay melt temperature control system is proposed.**

Ключевые слова — индукционная тигельная печь, автоматическое управление, регулятор, структурная идентификация.

I. Введение

Классификация, принцип действия, конструктивные схемы и методы расчета электротехнологических комплексов (ЭТК) с индукционными тигельными печами (ИТП) полно представлены в [1 – 3]. В работе ИТП рассматриваются с учетом особенностей задач управления.

По проводимому технологическому процессу ИТП могут быть разделены на печи, работающие на кусковой загрузке (в т.ч. ферромагнитной), печи, работающие на расплаве (миксеры и ИТП с «болотом») и ИТП с проводящими тиглями (рис. 1 – рис. 3). Для каждого типа ИТП характерны свои подходы и методы автоматического управления.

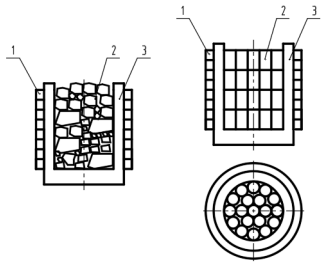


Рис. 1. Эскиз (а) и расчетная модель (б) ИТП, работающей на кусковой загрузке:
1 – индуктор; 2 – кусковая загрузка; 3 – тигель

Работа выполнена при поддержке Министерства высшего образования и науки (инициативный научный проект 8.9608.2017/ БЧ).

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

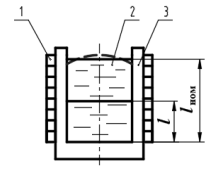


Рис. 2. Эскиз ИТП, работающей с расплавом:
1 – индуктор; 2 – расплав;
3 –тигель

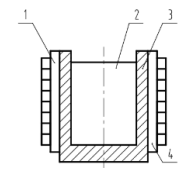


Рис. 3. Эскиз ИТП с проводящим тиглем:
1 – индуктор; 2 – загрузка;
3 – проводящий тигель;
4 - теплоизоляция

Индукционные тигельные миксеры (ИТМ) широко используются в литейном производстве для термостатирования и выравнивания химического состава расплава различных металлов (чугуны, стали, цветные металлы и сплавы на их основе). При этом характерной особенностью ИТМ является работа с переменным уровнем расплава, изменяющимся в широких пределах (100 – 10% от номинального), что оказывает влияние на параметры электрических (электрический КПД, коэффициент мощности), тепловых (тепловые потери) и магнитогидродинамических (высота мениска) режимов его работы и предъявляет специфические требования к системе управления.

Параметры системы «индуктор – загрузка» ИТП (индуктивность, активное сопротивление) изменяются в ходе технологического процесса, что приводит к необходимости согласования параметров источника питания и ИТП для выделения в загрузке максимальной мощности, что достигается изменением частоты, числа витков индуктора или изменением напряжения на индукторе.

II. Структура современной системы управления ИТП

Современные системы управления всеми указанными типами ИТП выполняются в виде отдельных регуляторов по типовой функциональной схеме (рис. 4), включающей в себя программируемый микропроцессорный контроллер МПК, исполнительный элемент (регулируемый преобразователь частоты или напряжения) ИЭ, объект управления (ИТП) и датчик обратной связи ДОС, контролирующий регулируемую величину. Регулируемая величина и, соответственно, датчик обратной связи изменяются в зависимости от вида установки и выполняемых ею технологических задач.

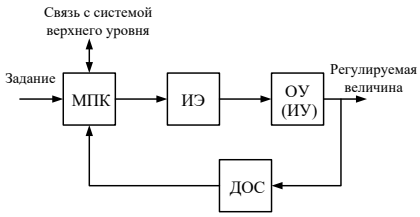


Рис. 4. Функциональная схема типовой системы автоматического управления ИТП (локального регулятора)

Системы управления конкретными типами ИТП имеют общую структуру (рис. 4), но отличаются алгоритмом управления, типом исполнительного элемента и датчика обратной связи. Особенностью современных систем управления является организация в структуре МПК устройств связи локального регулятора, выполненного на МПК, с системой верхнего уровня, реализуемого на промышленном компьютере. Такое построение системы комплексного управления позволяет программным путем вводить задание регулируемой величины не только непосредственно оператором, но и промышленным компьютером, управляющим всем технологическим процессом.

III. Основные подходы к структурной идентификации ЭТК с ИТП

Известно, что ЭТК с ИТП в электрическом отношении представляется динамическим звеном второго порядка, инерционность которого определяется частотой питающей сети.

В большинстве случаев инерционность тепловых процессов в ИТП значительно (1-2 порядка) выше инерционности колебательного контура, что позволяет рассматривать ЭТК с ИТП в тепловом отношении как безынерционное звено.

Сочетание электрической и тепловой моделей в зависимости от типа печи и заданного технологического процесса необходимо для синтеза автоматических регуляторов разных типов для ЭТК с ИТП.

Действительно, система электропитания и управления индукционной установкой включает в себя несколько взаимосвязанных контуров регулирования. Основной системой регулирования режима работы индукционной установки, как отмечалось выше, можно считать регулятор мощности, обеспечивающий поддержание заданной мощности путем изменения выходного напряжения. Вторым по значимости в системе управления индукционной установкой является регулятор коэффициента мощности, обеспечивающий выполнение условия $\cos\varphi = R/Z \approx 1$. В некоторой степени можно считать, что регулятор согласования выполняет второстепенные функции, но, как и остальные регуляторы, оказывает влияние на режим работы установки в целом. Наличие взаимосвязанных контуров регулирования в индукционной установке является ее характерной особенностью. Обеспечение устойчивой работы системы, включающей в себя взаимосвязанные контуры регулирования, является сложной и часто неразрешимой задачей. Традиционно в серийных регуляторах режима индукционных плавильных установок устойчивость системы обеспечивалась наложением ограничивающих условий на работу отдельных регуляторов. При введении таких ограничений на совместную работу регуляторов мощности, коэффициента мощности, симметрирования и согласования, схемным путем разрешалась работа только одного регулятора и «блокировалась» работа остальных регуляторов. При таких ограничениях система, состоящая из взаимосвязанных регуляторов, преобразуется в систему, состоящую из независимых, автономно работающих регуляторов.

На рис. 5 представлена обобщенная структурная модель ЭТК с ИТП, которая составляется на основе моделирования электрических и тепловых потерь.

Основными входными воздействиями являются: напряжение на индукторе, частота тока и число витков индуктора. После вычитания из суммарной мощности источника питания ИП $P_{ИП}$ мощности потерь в индукторе P_1, тепловых потерь $P_{ТП}$, потерь в ИП, конденсаторной батарее и токоподводе получается полезная мощность, идущая на нагрев металла. На выходе интегрирующего звена k/p получается температура загрузки t.

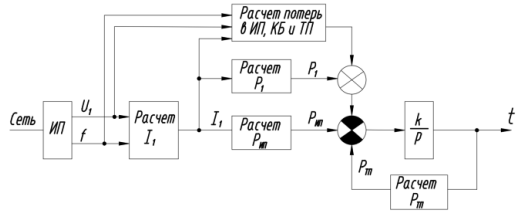


Рис. 5. Структурная схема ЭТК с ИТП

Представленную структурную модель можно использовать как для синтеза и настройки регуляторов электрических параметров ЭТК с ИТП (мощность, идущая на нагрев, ток и напряжение индуктора), так и технологических параметров, например, температуры металла в печи.

IV. Идентификация ИТП с кусковой загрузкой и построение системы управления

Для выбора параметров системы регулирования печи необходима идентификация ИТП как объектов системы управления с последующим встраиванием модели печи в структурную модель системы регулирования в *MATLAB*.

Идентификация ИТП может проводиться с использованием методов электрического и теплового расчетов или с использованием физического моделирования [1 – 3].

Физическое моделирование позволяет получить наиболее достоверную информацию о натурном объекте. Оно основано на изменении масштаба физических свойств материалов, геометрических размеров системы или параметров, характеризующих режим нагрева, при сохранении физической сущности процессов, происходящих в модели и оригинале. Используя теорию подобия, результаты моделирования можно перенести на

печи большей емкости, применяя масштабные коэффициенты.

Для экспериментальных исследований в НИУ «МЭИ» создан лабораторно-промышленный стенд на базе ИТП для плавки меди, алюминия и магния, а также ферромагнитной стали. Экспериментальные исследования проводились для трех металлов: ферромагнитная сталь, медь и магний.

При нагреве ферромагнитной кусковой шихты было проведено физическое моделирование на масштабной модели ИТП. Для моделирования самой кусковой шихты применялись куски стальной проволоки длиной 25 мм двух разных диаметров (2.9 мм и 1.1 мм).

Работа проводилась на модельной установке ИТП с керамическим тиглем. Печь питается от транзисторного последовательного инвертора максимальной установленной мощностью 2,5 кВт и частотой 16-21 кГц [3].

На рис. 6 представлен эскиз моделируемой ИТП. Параметры модельной установки следующие: $d_{1м}$ = 94 мм, $d_{2м}$ = 67 мм, $l_{1м}$ = 76 мм, $l_{2м}$ = 113 мм, масса загрузки 985 г, частота в начальный момент нагрева шихты 16,8 кГц, число витков индуктора – 6. Параметры модельной установки ИТП можно привести к параметрам большой ИТП согласно теории подобия.

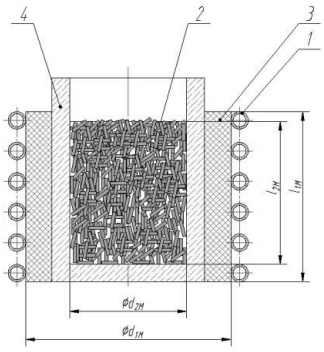


Рис. 6. Чертеж физической модели ИТП:
1 – индуктор; 2 – кусковая загрузка; 3 – теплоизоляция;
4 – огнеупорный тигель

Представленную модель можно сопоставить с ИТП для выплавки стали со следующими характеристиками: $d_{1п}$ = 940 мм, $d_{2п}$ = 670 мм, $l_{1п}$ = 760 мм, $l_{2п}$ = 1130 мм, частота f = 170 Гц, емкость печи составляет 1 тонна.

В ходе эксперимента измерялись значения тока индуктора I, напряжения индуктора U, частоты питающего напряжения f, активной мощности, потребляемой преобразователем частоты P и средней температуры в самой загрузке T (рис. 7). Помимо основных параметров также измерялись дополнительные: температуры воды на входе и выходе из индуктора, расход охлаждающей воды индуктора с помощью ротаметра с импульсным выходом, температуры на стенке тигля, крышке и подине печи. Дополнительные параметры использовались для косвенного определения тепловых потерь ИТП и средней температуры печи.

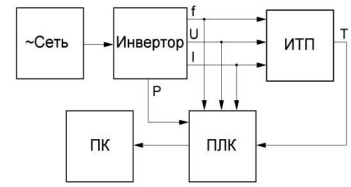
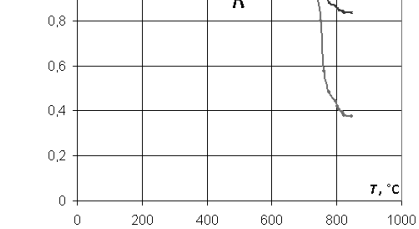


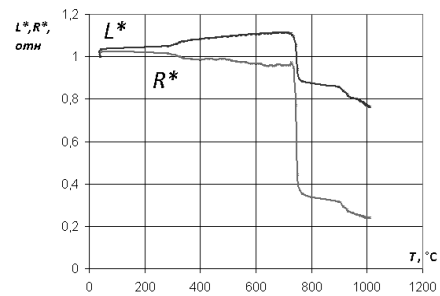
Рис. 7. Функциональная схема лабораторной установки

Из полученных данных вычисляются параметры схемы замещения ИТП $R_и$ и $L_и$ (активное сопротивление и индуктивность системы «индуктор – загрузка»). Определение $L_и$ вместо соответствующего индуктивного сопротивления $X_и$ производится по причине того, что в процессе нагрева частота источника питания автоматически подстраивается под изменяющуюся нагрузку.

Вычисленные зависимости параметров последовательной схемы замещения ИТП представлены в графическом виде на рис. 8*а* и 8*б*, при двух разных диаметрах кусковой шихты из ферромагнитной стали в завалке в виде зависимостей от температуры.



а)



б)

Рис. 8. Зависимости относительных значений общих сопротивления R* и индуктивности L* индуктора от температуры для диаметров шихты: а - 2.9 мм; б - 1.1 мм

На рис. 8 даны в относительных единицах значения параметров $R^*_и$ и $L^*_и$, отнесенные к значениям в начале опыта, последовательной электрической схемы замещения системы «индуктор-загрузка», причем в случае рис. 8*а* начальные значения $R_и$ = 0.057 Ом, $L_и$ = 4 мкГн, в случае рис. 8*б* - $R_и$ = 0.063 Ом, $L_и$ = 4 мкГн.

Отношение глубины проникновения поля к диаметру шихты в начальный момент нагрева для случая а) 0.17, б) 0.06 для диаметров шихты 1.1 мм и 2.9 мм соответственно [3].

Из рис. 8 видно, что в процессе нагрева загрузки сильно изменяются параметры ферромагнитной кусковой шихты. В таких условиях для поддержания постоянства мощности в загрузке в процессе нагрева необходимо регулировать напряжение индуктора, что обычно реализуется при использовании преобразователя частоты с автоподстройкой под параметры ИТП. Используя зависимости изменения параметров загрузки, можно выбрать источник питания необходимой мощности. Полученное в результате экспериментальных исследований математическое описание ИТП используется при синтезе регуляторов мощности и температуры, построенных по релейному принципу [4].

Для нагрева и расплавления металла в ИТП следует поддерживать неизменной мощность, подводимую к шихте в течение всего технологического процесса, так как эта мера позволяет расплавить загрузку за минимальное время, экономя электрическую энергию. Для этого источнику питания ИТП следует изменять напряжение на индукторе, сохраняя значение мощности, подводимой к загрузке, максимальным и неизменным. Рассмотрим случай, когда источником питания ИТП является тиристорный преобразователь частоты (ТПЧ).

Схема ТПЧ, изображенная на рис. 9, обладает широкими возможностями по регулированию выходных параметров по причине возможности перестройки своей топологии.

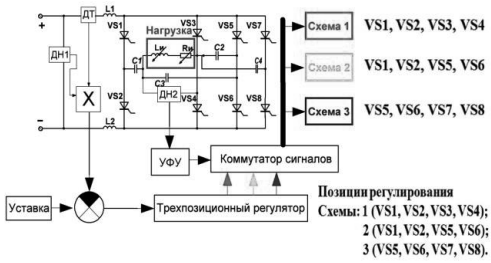


Рис. 9. Структурная схема управления ТПЧ

Рассматриваемый ТПЧ имеет три различных топологии (рис. 9). Он позволяет реализовать релейное трехпозиционное регулирование активной мощности, поступающей в ИТП. Регулирование параметрами рассматриваемого преобразователя частоты осуществляется по активной мощности, потребляемой преобразователем частоты. Таким образом, перестраиваемый ТПЧ при трёхпозиционном регулировании будет переключаться либо между схемой 1 и схемой 2, либо – между схемой 2 и схемой 3. Среднее значение активной мощности в загрузке будет соответствовать мощности уставки трёхпозиционного регулятора.

При проведении моделирования были измерены значения средней мощности при отработке системой управления изменений активного сопротивления R в диапазоне 7,5 ÷ 30 мОм при L = 25 мкГн, причём как при уменьшении сопротивления R, так и при его увеличении. Диаграммы регулирования мощности при изменении сопротивления нагрузки показаны на рис. 10. Из результатов эксперимента на модели следует, что статическая точность регулирования составляет не хуже ± 5% при изменении параметров нагрузки (R = 7,5 ÷ 30 мОм и L = 20 ÷ 40 мкГн).

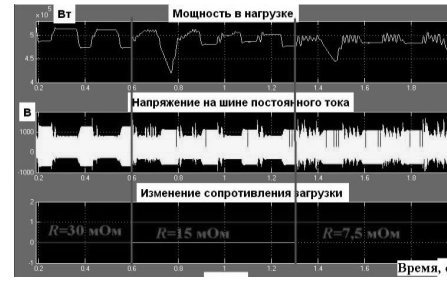


Рис. 10. Диаграммы регулирования мощности при изменении сопротивления нагрузки

V. Идентификация ИТП, работающих с расплавом, и выбор способа управления процессом плавки

Для построения структурной модели ЭТК с ИТМ использовано уравнение энергетического баланса установки

$$\left(P(\tau)-P_1(\tau)-P_h(\tau)\right)\cdot d\tau = c\cdot m(\tau)\cdot dt\,, \qquad (1)$$

где $P(\tau)$ - активная мощность, потребляемая установкой; $P_1(\tau)$ - активная мощность в индукторе (потери в индукторе); $P_h(\tau)$ - суммарные тепловые потери; c и $m(\tau)$ - удельная теплоемкость и масса расплава в тигле; $d\tau$ - элементарный промежуток времени; dt - элементарное изменение температуры за время $d\tau$.

Энергетический баланс (1) пренебрегает потерями в токоподводящих элементах, конденсаторной батареи, а также в магнитопроводе, что незначительно сказывается на точности структурной модели ЭТК с ИТМ, однако, позволяет существенно её упростить.

Из энергетического баланса (1) с использованием преобразования Лапласа получаем выражение для температуры

$$t(p) = t_0 + \frac{1}{c}\cdot\frac{1}{p}\cdot\frac{P(p)-P_1(p)-P_h(p)}{m(p)}\,, \qquad (2)$$

где t_0 – начальная температура расплава (измеряется термопарой).

Расчет мощности тепловых и электрических потерь с использованием полной математической модели ИТМ сопряжен с большими временными затратами и не может быть рекомендован для построения системы управления в реальном времени. Поэтому в работе была

перестроена и упрощена с использованием методов планирования эксперимента исходная модель применительно к возможностям системы управления [2].

Для ИТМ для чугуна емкостью 4 т по результатам вычислительного эксперимента с использованием пакета программ *Overheat* получены зависимости суммарных тепловых потерь P_h, тока индуктора I_1, а также мощности электрических потерь в индукторе P_1:

$$P_h = -26 + 0,08 \cdot l + 0,05 \cdot t - 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot l \cdot t \; ; \qquad (3)$$

$$I_1 = -0,7 + 3,3 \cdot U_1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot l + 0,02 \cdot U_1 \cdot l \; ; \qquad (4)$$

$$\begin{aligned} P_1 &= 5,4 - 0,06 \cdot U_1 - 0,08 \cdot l + \\ &+ 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot U_1^{\,2} - 7,6 \cdot 10^{-5} \cdot l^2 + . \\ &+ 8,8 \cdot 10^{-4} \cdot U_1 \cdot l \end{aligned} \qquad (5)$$

Влияющими параметрами для выбранных функций цели являются уровень металла (по отношению к уровню полностью заполненного ИТМ) l, температура расплава t, напряжение и ток индуктора U_1 и I_1. При этом значение l изменяется от 30 до 100%, t - от 1200 до 1400 °С, U_1 - от 90 до 500 В и I_1 – от 0 до 3000 А.

Уравнение (2) и уравнения регрессии (3 – 5) образуют перестроенную модель ИТМ (рис. 11), являющуюся основой разрабатываемой системы управления. Данная структурная модель не учитывает влияние формы свободной поверхности расплава в тигле на электрические и энергетические характеристики установки с ИТП, поскольку последние работают с гораздо меньшими, по сравнению с плавильными печами, удельными поверхностными мощностями.

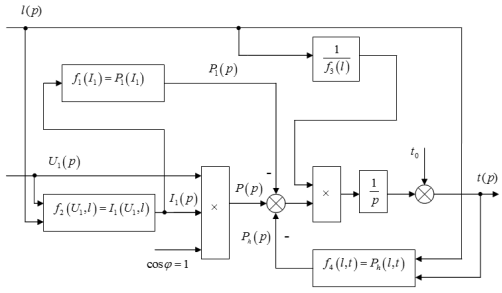


Рис. 11. Структурная модель ИТМ

При построении структурной модели ИТМ принято, что cosφ системы «индуктор – загрузка» поддерживается на уровне, близком к оптимальному (cosφ≈1), т.е. принимали допущение о независимости работы регуляторов температуры расплава и cosφ, что вполне оправдано вследствие значительной инерционности тепловых процессов.

Авторами предложен регулятор температуры ИТМ по косвенным параметрам. В результате исследования регулятора установлено, что для регулирования температуры расплава целесообразно использовать пропорционально-интегральный закон регулирования при значительном превышении коэффициента П-составляющей k1 над коэффициентом И-составляющей k2 (в случае ИТМ для чугуна емкостью 4 т отношение k1/k2=3,5·103).

VI. Идентификация ИТП с проводящим тиглем и построение релейного регулятора температуры расплава

Для плавки меди и магния в ИТП используются проводящие тигли из графита и ферромагнитной стали соответственно. На рис. 12 показан чертеж системы «индуктор – загрузка» лабораторной печи с проводящим тиглем с геометрическими размерами.

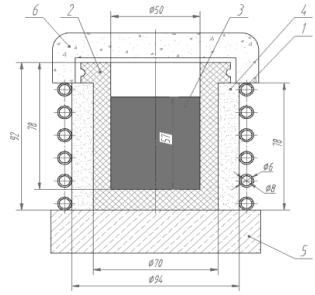


Рис. 12.Чертеж системы «индуктор – загрузка» печи с футеровкой: 1 – индуктор; 2 – проводящий тигель; 3 – металл; 4 – керамическая вставка; 5 – подина; 6 – крышка

При проведении экспериментальных исследований для регулирования величины входного напряжения используется однофазный лабораторный автотрансформатор *Fnex* мощностью 3 кВА. Для регулирования температуры используется ПЛК «Овен ПЛК 150». Функциональная схема лабораторного стенда показана на рис. 13.

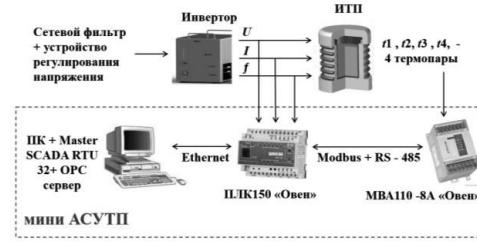


Рис. 13. Функциональная схема лабораторной установки

С использованием полученного экспериментально математического описания ИТП для плавки меди авторами в пакете MATLAB разработана структурная модель двухпозиционной системы регулирования температуры садки в печи для режима нагрева, расплавления и выдержки меди в печи. ИТП с проводящим тиглем представлена инерционным звеном первого порядка с коэффициентом усиления 0,8 и

постоянной времени 620 с. Размах колебаний температуры составляет 10 °С. Уставка по температуре составляет 1200 °С. В обратную связь системы управления включен датчик температуры (термопара), представленный инерционным звеном первого порядка с постоянной времени 15 с.

Первоначальная загрузка медной шихты производилась в холодный тигель, затем через некоторое время по мере расплавления и осаживания шихты были произведены две дозагрузки. Суммарная масса расплавленной меди составила около 1 кг, общее время расплавления – около 19 мин, температура перегрева – 1120 °С. После полного расплавления наблюдался выпуклый мениск высотой 3 – 4 мм.

На рис. 14 приведена экспериментальная кривая изменения температуры с учетом добавления медной шихты в расплавленный металл и величины размаха колебаний. Размах колебаний температуры в квазиустановившемся режиме в процессе регулирования – от 1190 до 1200 °С. Система полностью отрабатывает все возмущения, основным из которых является добавление шихты в расплавленный металл. Полученные данные с точностью не менее 5% совпадают с теоретической кривой, полученной в *MATLAB* с использованием структурной модели.

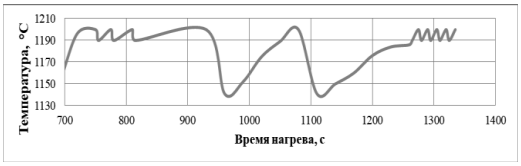


Рис. 14. График зависимости температуры от времени при расплавлении медной шихты

Аналогичная структурная модель была разработана для ИТП для плавки магния, и получены переходные процессы изменения температуры и мощности. Экспериментальное исследование регулятора заключалось в снятии кривой изменения температуры металла в печи.

С использованием разработанной модели системы управления можно проводить настройку релейной системы регулирования температуры садки ИТП, работающей в двухпозиционном режиме, в зависимости от емкости печи, мощности источника питания, уровня задающего воздействия, изменения возмущающих воздействий и др.

VII. Заключение

По результатам исследований модели системы управления перестраиваемым ТПЧ в *Simulink* точность регулирования составляет не хуже ± 5% в широком диапазоне изменения нагрузки при заданных выше параметрах системы управления.

Применение перестраиваемого ТПЧ, управляемого методом трёхпозиционного регулирования, позволяет снизить потери в преобразовательной установке, сокращая расход электроэнергии при проведении всего процесса плавки стали в ИТП.

Проведена идентификация ИТМ как объекта управления. Получена упрощенная перестроенная модель ИТМ.

Получена структурная модель двухпозиционного регулятора температуры садки ИТП с проводящим тиглем для плавки меди и магния. Приводятся результаты настройки регулятора. Разработанные модели регулятора температуры садки ИТП с проводящим тиглем проверены с использованием экспериментальной установки. Отличия по температуре садки не превышают 5%, что вполне приемлемо.

Поскольку рассматриваемые ИТП с проводящим тиглем являются достаточно инерционными в тепловом отношении объектами (постоянная времени тигля, как правило, составляет более 300 с), систему регулирования тепловым режимом садки можно строить по двухпозиционному принципу.

Список литературы

[1] A.B. Kuvaldin, M. Ya. Pogrebisskii, M.A. Fedin. Calculation of the Thermal and Electrical Characteristics of Induction Crucible Mixers. ISSN 0036 – 0295, Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2008, No. 7, pp. 1 – 8.

[2] Кувалдин А.Б., Федин М.А. Идентификация индукционных тигельных миксеров как объектов параметрической системы управления // Индукционный нагрев, №1 (23), 2013. С. 19 – 24.

[3] Кувалдин А.Б., Федин М.А., Генералов И.М. Физическая модель для определения характеристик индукционной тигельной печи при нагреве ферромагнитной кусковой шихты // Индукционный нагрев, №1 (28), 2015. С. 3 – 8.

[4] А.Б. Кувалдин, М.А. Федин, И.М. Генералов. Повышение энергетической эффективности электротехнологического комплекса с индукционной тигельной печью при плавке ферромагнитной кусковой загрузки // Промышленная энергетика. - 2016. - №5. - С. 19 – 25.

[5] Fedin M.A., Kuvaldin A.B., Kuleshov A.O., Akhmetyanov S.V., Korolev I.V. Operating modes and electrothermal model of an induction crucible furnace with a conductive crucible // Journal of Physics: Conference Series, 1059(1), 2018, 012006.

Оптимизация стадии нагрева в процессе индукционной закалки цилиндрических заготовок

Попов А.В.
Самарский Государственный Технический Университет
Самара, Россия
antonsam93@mail.ru

***Abstract* — This paper is devoted to formulation of optimal inductor design problem for surface hardening and its solution using the automatic optimization procedure based on alternance method. Due to the overheating of the billet's surface at the end of the heating stage, the optimal control problem with constraint on the admissible maximum temperature is considered.**

Ключевые слова — альтернансный метод, численная модель, FLUX, MATLAB, индукционный нагрев, поверхностная закалка, оптимальное проектирование.

I. Введение

В условиях ужесточающихся требований к повышению энергоэффективности производственных процессов в промышленности, особенно актуальной становится проблема оптимизации режимов работы или конструктивных параметров технологических установок и систем. Сказанное в полной мере относится к процессам термообработки металлов, включающим поверхностную индукционную закалку [1]. Индукционная закалка состоит из двух стадий: стадии интенсивного нагрева поверхностного слоя заготовки выше температуры Кюри и стадии быстрого охлаждения нагретого изделия ниже температуры мартенситного превращения. Подобная технология позволяет получить такие изменения в микроструктуре металла, которые приводят к улучшению прочности поверхностного слоя обрабатываемого изделия. Основной целью стадии нагрева является обеспечение наиболее быстрого и равномерного нагрева закаливаемого поверхностного слоя заготовки до заданной температуры перед последующим охлаждением.

В работе рассматривается задача оптимального проектирования индуктора для поверхностной закалки цилиндрических заготовок, которая решается с помощью автоматической процедуры оптимизации, построенной на базе альтернансного метода. Для исключения перегрева поверхности в конце стадии нагрева формулируется и решается задача оптимального управления с ограничением на максимально допустимую температуру в процессе нагрева.

II. Задача оптимального проектирования индуктора для поверхностной закалки

A. Постановка задачи оптимального проектирования

Рассматривается индукционная нагревательная система, состоящая из двухвиткового индуктора сечением $p_1 \times p_1$, находящегося на расстоянии p_2 от поверхности стальной цилиндрической заготовки радиусом R. Витки расположены симметрично относительно горизонтальной оси на расстоянии p_3 друг от друга. Геометрия осесимметричной системы показана на рис. 1.

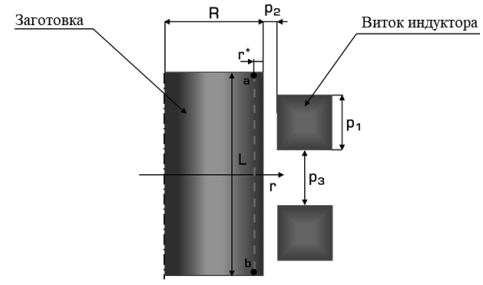


Рис. 1. Общий вид нагревательной системы

Задача оптимального проектирования индуктора [2-3] заключается в нахождении вектора оптимизируемых параметров $\overline{P} = (p_1, p_2, p_3, I)$, включающего перечисленные выше конструктивные параметры и ток источника питания I. На оптимизируемые параметры накладываются ограничения, которые могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} &p_{i\min} \le p_i \le p_{i\max},\ i = \overline{1,3}; \\ &I_{\min} \le I \le I_{\max}. \end{aligned} \qquad (1)$$

В общем случае главной целью стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки является обеспечение наиболее быстрого и равномерного нагрева закаливаемого поверхностного слоя заготовки до заданной температуры T^*. При этом в качестве минимизируемого критерия оптимизации целесообразно рассмотреть максимальное абсолютное отклонение температуры на границе закаливаемого поверхностного слоя в конце стадии нагрева $T\left(R - r^*, l, t^0, \overline{P}\right)$ от заданного значения T^*:

$$J = \max_{l \in [0;L]} \left| T\left(R - r^*, l, t^0, \overline{P}\right) - T^* \right| \to \min_{\overline{P}}. \qquad (2)$$

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант РФФИ №19-08-00232)

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

Здесь r^* - толщина закаливаемого поверхностного слоя заготовки (рис. 1), $l \in [0; L]$ - продольная координата, t^0 - время нагрева, которое считается заданным.

Тогда, задача оптимального проектирования может быть сформулирована следующим образом: требуется найти такие значения оптимизируемых параметров p_1^0, p_2^0, p_3^0, I^0, стесненных ограничениями (1), которые обеспечивают за заданное время $t = t^0$ нагрев поверхностного слоя заготовки, толщиной r^*, до требуемой температуры T^* с минимальным значением критерия оптимальности (2).

B. Альтернансный метод оптимизации

Сформулированная в предыдущем разделе задача была решена с помощью альтернансного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами [4-7]. Альтернансный метод позволяет произвести редукцию исходной задачи к решению системы трансцендентных уравнений, замкнутой относительно всех неизвестных параметров оптимизируемого процесса [4]. Данный метод базируется на специфических (альтернансных) свойствах пространственных температурных распределений по объему нагреваемого тела в конце оптимальных процессов индукционного нагрева металла.

Применительно к рассматриваемой задаче альтернансные свойства заключаются в следующем. Оптимальные значения компонент вектора $\overline{P^0} = \left(p_1^0, p_2^0, p_3^0, I^0\right)$, которые являются решением сформулированной задачи оптимального проектирования, определяют распределение температуры $T\left(R - r^*, l, t^0, \overline{P^0}\right)$, соответствующее минимальному значению критерия оптимальности (2). Основное свойство конечного температурного распределения $T\left(R - r^*, l, t^0, \overline{P^0}\right)$ состоит в том, что число K точек l_j^0 вдоль границы рассматриваемого закаливаемого слоя при $r = R - r^*$, в которых достигаются максимальные абсолютные отклонения конечной температуры $T\left(R - r^*, l, t^0, \overline{P^0}\right)$ от требуемого значения T^*, равные ε_0, всегда оказывается не меньше числа N искомых оптимизируемых параметров процесса. Кроме того, максимальные отклонения температуры $T\left(R - r^*, l, t^0, \overline{P^0}\right)$ от заданного значения T^* оказываются знакочередующимися в указанных точках $l_j^0, j = \overline{1, K}$, где $0 \le l_1^0 \le l_2^0 \le ... \le l_K^0 \le L$, т.е. обладают альтернансным свойством. При этом для температурного отклонения в точках с неизвестными заранее координатами $l_m^0, m = \overline{1, K_1 < K}$ выполняются необходимые условия экстремума $\dfrac{\partial T\left(R - r^*, l_m^0, t^0, \overline{P^0}\right)}{\partial l} = 0$.

Вышеуказанные утверждения позволяют составить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} T\left(R - r^*, l_j^0, t^0, \overline{P^0}\right) - T^* = (-1)^j \psi \varepsilon_0, \; j = \overline{1, K}, \psi = \pm 1; \\ 0 \le l_1^0 < l_2^0 < ... < l_K^0 \le L; \\ K = \begin{cases} N, \text{ если } \varepsilon_{\min}^{(N)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(N-1)} \\ N+1, \text{ если } \varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(N)} \end{cases}; \\ \dfrac{\partial T\left(R - r^*, l_m^0, t^0, \overline{P^0}\right)}{\partial l} = 0; \; m = \overline{1, K_1 < K}. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $\varepsilon_{\min}^{(N)}$ - предельно достижимая точность нагрева в классе задач с N оптимизируемыми параметрами.

Система уравнений (3) оказывается замкнутой относительно всех неизвестных, включая оптимизируемые параметры p_1^0, p_2^0, p_3^0, I^0, координаты точек с максимальным температурным отклонением $l_j^0, j = \overline{1, K}$ и значение $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(N)}$, поэтому её решение и будет являться решением рассматриваемой задачи оптимального проектирования.

Согласно альтернансному методу для сформулированной задачи с числом оптимизируемых параметров $N = 4$ в рассматриваемом сечении заготовки $r = R - r^*$ существует $K = N + 1 = 5$ точек с максимальным температурным отклонением от требуемого значения T^*.

Тогда на основе (3), можно составить систему уравнений, которая будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} T\left(R - r^*, l_j^0, t^0, \overline{P^0}\right) - T^* = (-1)^j \varepsilon_{\min}^{(4)}; j = \overline{1, 5}; \\ 0 = l_1 < l_2 < l_3 < l_4 < l_5 = L; \\ \dfrac{\partial T\left(R - r^*, l_i^0, t^0, \overline{P^0}\right)}{\partial l} = 0; \quad i = \overline{2, 4}. \end{cases} \quad (4)$$

Система (4), состоящая из восьми уравнений, замкнута относительно всех неизвестных параметров процесса, к которым относятся: четыре компонента вектора $\overline{P^0}$, три координаты точек экстремума l_2^0, l_3^0, l_4^0 и значение максимально достижимой точности нагрева в задаче с четырьмя оптимизируемыми параметрами $\varepsilon_{\min}^{(4)}$ при $N = 4$.

C. Численное решение задачи оптимального проектирования

Для решения сложной системы трансцендентных уравнений (4) была разработана численная процедура, схема которой показана на рис. 2.

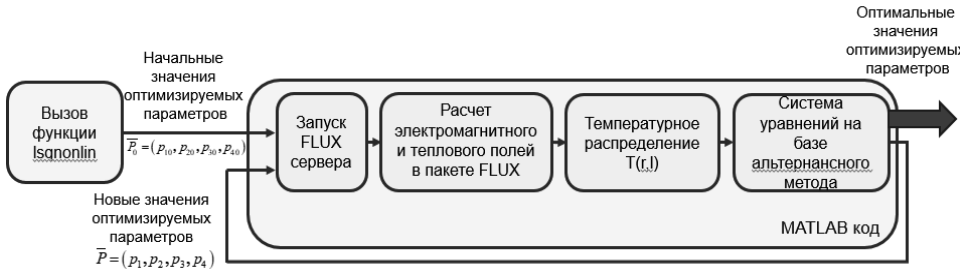


Рис. 2. Общая схема процедуры численного решения задачи оптимального проектирования

Для численного моделирования температурного поля вдоль границы закаливаемого слоя заготовки $T\left(R-r^*, l_j^0, t^0, \overline{P^0}\right)$ использовался конечно-элементный пакет для взаимосвязанного электромагнитного и теплового анализа Altair FLUX [8-9]. Поскольку данный пакет обладает встроенной возможностью связи с MATLAB [10], именно это ПО было выбрано для решения системы уравнений (4).

Исходные данные для построения FLUX-модели индукционной нагревательной системы (рис. 1) приведены в таблице I.

ТАБЛИЦА I. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Параметр	Значение
Материал заготовки	Типовая углеродистая сталь [11]
Частота питающего тока	100 кГц
Время нагрева, t^0	10 с.
Количество оптимизируемых параметров, N	4
Радиус заготовки, R	14 мм
Длина заготовки, L	32.9 мм
Толщина закаливаемого слоя, r^*	4 мм
Требуемая температура, T^*	900°C

После наложения конечно-элементной сетки индукционная нагревательная система принимает вид, показанный на рис. 3.

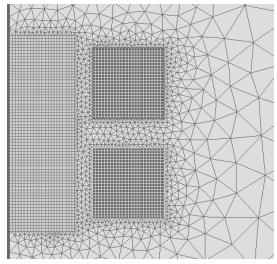


Рис. 3. Геометрия индукционной нагревательной системы с конечно-элементной сеткой

На первом шаге процедуры оптимизации (рис. 2), происходит вызов функции lsqnonlin, с помощью которой осуществляется решение системы уравнений альтернансного метода (4) с помощью метода наименьших квадратов. В качестве аргументов этой функции указываются начальные приближения оптимизируемых параметров, верхние и нижние пределы изменения каждого параметра, а также настройки самого процесса решения, к которым относятся: максимальное количество итераций, тип решателя, минимальная величина изменения каждого параметра, заданная точность решения и др.

На втором шаге с помощью стандартного файла происходит запуск FLUX в качестве сервера, открытие в нем построенной ранее модели рассматриваемого процесса и передача в нее заданных значений параметров.

На третьем шаге происходит расчет электромагнитного и теплового полей системы с установленными на предыдущем шаге начальными приближениями оптимизируемых параметров. В качестве результатов расчета в данном случае рассматривается двумерное температурное поле по объему нагреваемого изделия (рис.4).

На четвертом шаге производится анализ невязок каждого уравнения в системе, построенной на базе альтернансного метода оптимизации. На основе полученных невязок функция lsqnonlin изменяет значения оптимизируемых параметров и передает новые значения в FLUX сервер, после чего процедура повторяется со второго шага.

Окончанием представленной итерационной процедуры является либо достижение заданной точности решения, либо заданного количества итераций, которые определяются на этапе вызова функции lsqnonlin [12].

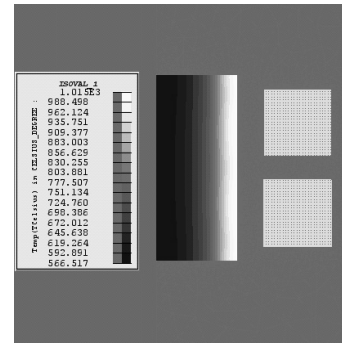


Рис. 4. Результаты моделирования: двумерное температурное поле в продольном сечении заготовки (FLUX)

D. Результаты решения задачи оптимального проектирования

Начальные значения оптимизируемых параметров, координат точек $l_j^0, j=\overline{1,K}$ и $\varepsilon_{\min}^{(4)}$ представлены в таблице II.

ТАБЛИЦА II. НАЧАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НЕИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Параметр	p_1	p_2	p_3	I	l_2	l_3	l_4	$\varepsilon_{\min}^{(4)}$
Значение	13 мм	4 мм	3 мм	1045 А	7 мм	15 мм	25 мм	20°C

На оптимизируемые параметры были наложены следующие ограничения вида (1):

$$5 \le p_1 \le 15; \quad 2 \le p_2 \le 10; \\ 3 \le p_3 \le 15; \quad 500 \le I \le 1300. \tag{5}$$

Указанные начальные значения и ограничения были переданы в автоматическую процедуру оптимизации, показанную на рис. 2. Итерационная процедура поиска оптимальных значений параметров включала 11 итераций (приблизительно 100 вызовов FLUX-модели).

Найденные оптимальные значения всех неизвестных параметров показаны в таблице III.

ТАБЛИЦА III. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Параметр	p_1	p_2	p_3	I	l_2^0	l_3^0	l_4^0	$\varepsilon_{\min}^{(4)}$
Значение	12 мм	3 мм	4.45 мм	1220 А	8.1 мм	16.5 мм	24.5 мм	10°C

Температурное распределение на границе закаливаемого слоя $r = R - r^*$ в конце стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки с оптимальными значениями конструктивных параметров индуктора показано на рис. 5.

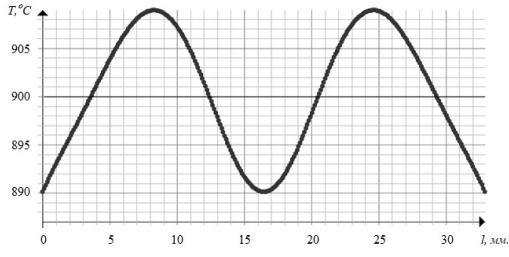


Рис. 5. Результирующее температурное распределение на границе закаливаемого слоя $r = R - r^*$ при оптимальных значениях конструктивных параметров

Температурное поле в продольном сечении заготовки в конце оптимального процесса нагрева показано на рис. 6.

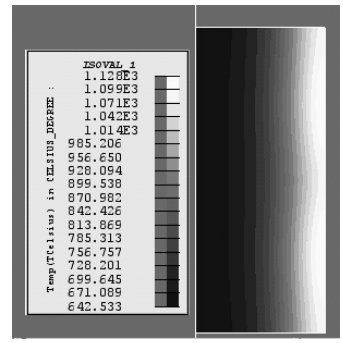


Рис. 6. Конечное температурное поле в продольном сечении заготовки

Анализ температурного поля (рис. 6) показывает, что максимальный перегрев поверхности заготовки относительно допустимой температуры $T_{доп} = 950^{\circ} C$ достигает 178 градусов, что недопустимо по технологии индукционной закалки. Поэтому необходимо перейти к решению задачи оптимального управления с дополнительным фазовым ограничением на максимальную температуру заготовки [13].

III. ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ОГРАНИЧЕНИЕМ НА МАКСИМАЛЬНУЮ ТЕМПЕРАТУРУ

Ограничение на максимально допустимую температуру заготовки может быть записано следующим образом:

$$T_{\max}(t) = \max_{\substack{l \in [0;L] \\ r \in [0;R]}} T(r,l,t) \le T_{доп} \tag{6}$$

В [4, 13] показано, что алгоритм управления для задачи оптимального управления с фазовым ограничением (6) имеет следующий вид:

$$I(t) = \begin{cases} I_{\max}, t \in [0;t_1]; \\ I_{oc}(t), t \in (t_1;t_2]. \end{cases} \tag{7}$$

В выражении (7) t_1 - момент выхода максимальной температуры заготовки на ограничение, значение которого находится из уравнения $\max\limits_{\substack{l \in [0;L] \\ r \in [0;R]}} T(r,l,t_1) = T_{доп}$, $I_{oc}(t)$ - управление на особом участке движения по ограничению, t_2 - момент окончания стадии нагрева.

В [13] показано, что алгоритм управления на особом участке $I_{oc}(t)$ может быть представлен с помощью кусочно-постоянной функции (рис.7).

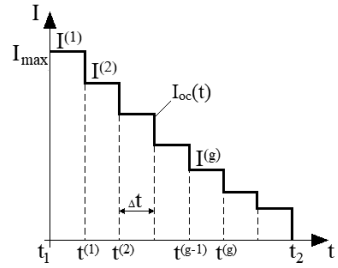


Рис. 7. Кусочно-постоянная аппроксимация управляющего воздействия $I_{oc}(t)$ на особом участке

Необходимая точность аппроксимации определяется выбором достаточного большого числа J шагов изменения управления и достаточно малой длительности каждого шага Δt . Значения $I^{(g)}, g=\overline{1,J}$ выбираются так, чтобы выполнялось условие вида (6) в моменты времени $t^{(1)},t^{(2)},...,t^{(J)}$, где $t^{(g)}=t_1+g\cdot\Delta t$ [4]. Момент окончания стадии нагрева t_2 находится в результате решения системы уравнений (4).

В данной задаче предельно допустимая максимальная температура заготовки в процессе нагрева составляла $T_{don}=950^{\circ}C$. На первом шаге решения задачи оптимального управления была произведена аппроксимация особого участка управления кусочно-постоянной функцией времени, которая затем была аппроксимирована экспоненциальной функцией следующего вида:

$$I^{T}(t)=ae^{bt}+ce^{dt} \qquad (8)$$

Параметры a,b,c,d были получены при аппроксимации с помощью инструмента Curve Fitting Tool пакета MATLAB (рис.8).

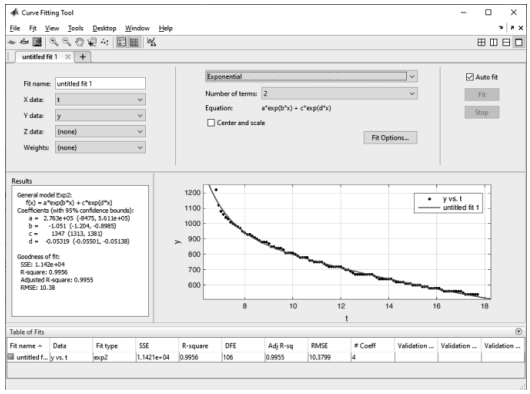


Рис. 8. Аппроксимация полученного кусочно-постоянного управления экспоненциальной функцией в MATLAB

Таким образом, полученный алгоритм управления для задачи с ограничением на максимально допустимую температуру имеет вид:

$$I(t)=\begin{cases}1220A, t\in[0;6.8];\\ 2.763\cdot10^{5}\cdot e^{(-1.051t)}+\\ +1347e^{(-0.05319t)}, \quad t\in(6.8;17.7].\end{cases} \qquad (9)$$

Время выхода максимальной температуры по объему закаливаемой заготовки на ограничение составило $t_2=6.8c.$, а общее время стадии нагрева $t_2=17.7c.$(рис. 9).

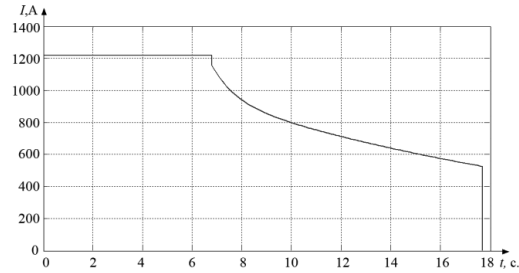


Рис. 9. Оптимальный алгоритм управления в процессе нагрева с ограничением на максимально допустимую температуру

Температурное распределение на границе закаливаемого слоя $r=R-r^{*}$ в конце стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки с оптимальными значениями параметров в условиях ограничения на максимальную температуру показано на рис. 10. Максимальное абсолютное отклонение конечной температуры $T\left(R-r^{*},l,t^{0},\overline{P^{0}}\right)$ от требуемого значения T^{*} не превышает $6^{\circ}C$. Незначительная разница отклонений максимальной и минимальной температуры от требуемого значения T^{*} обусловлено погрешностями численного решения системы уравнений (4).

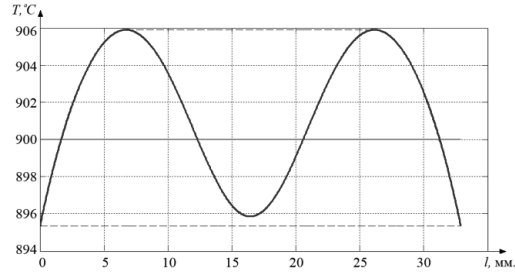


Рис. 10.Температурное распределение в продольном сечении $r=R-r^{*}$ в задаче с ограничением на максимальную температуру

Изменение максимальной по объему заготовки температуры в течение оптимального процесса нагрева показано на рис. 11.

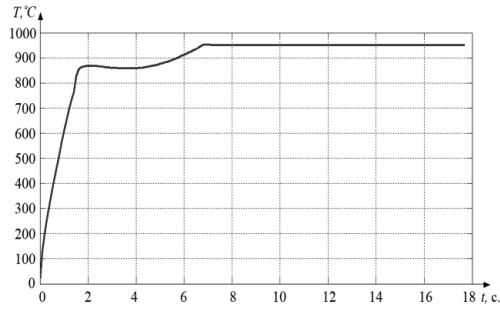


Рис. 11.История изменения максимальной температуры в процессе нагрева

Температурное поле в продольном сечении заготовки в конце оптимального процесса нагрева показано на рис. 12. Как видно из представленного рисунка, максимальная температура по объему закаливаемой заготовки практически не превышает заданное максимально допустимое значение $950^{\circ}C$ в течение всей стадии нагрева.

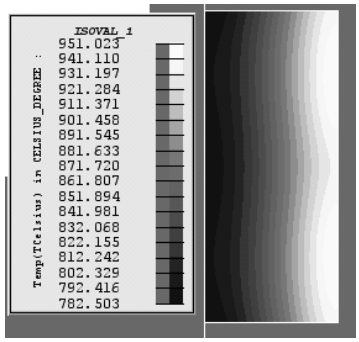


Рис. 12. Результирующее температурное распределение в продольном сечении заготовки при оптимальном управлении с ограничением на максимально допустимую температуру

IV. Заключение

В данной работе была сформулирована задача оптимального проектирования индуктора для стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки стальных цилиндрических заготовок.

Решение сформулированной задачи на базе альтернансного метода осуществлялось с помощью автоматической процедуры оптимизации, реализованной в пакете MATLAB, в которую была интегрирована численная двумерная модель, разработанная в ППП Altair FLUX.

Результаты решения задачи оптимального проектирования без учета ограничений на максимально допустимую температуру показали наличие существенной неравномерности температурного поля внутри закаливаемого слоя заготовки, а также перегрева поверхности.

Для устранения данной проблемы была сформулирована и решена задача оптимального управления с учетом фазового ограничения на максимальную температуру по объему нагреваемой заготовки. В результате решения задачи оптимизации с учетом ограничения получено, что максимальное абсолютное отклонение конечной температуры вдоль границы закаливаемого слоя от требуемого значения T^* не превышает $6^{\circ}C$. При этом максимальная температура по объему закаливаемой заготовки практически не превышает заданное максимально допустимое значение $950^{\circ}C$ в течение всей стадии нагрева.

Список литературы

[1] *Rudnev V., Loveless D.* Handbook of induction heating. – New York, Basel: Marcel Dekker Inc., 2003. – 797 p.

[2] *Плешивцева Ю.Э., Попов А.В., Попова М.А., Деревянов М.Ю.* Оптимальное проектирование индуктора для поверхностной закалки цилиндрических заготовок на основе численной двумерной модели // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2019. - №1 – С.40-50.

[3] Yu. Pleshivtseva, E. Rapoport, A. Popov, B. Nacke, A. Nikanorov Designing of induction heating systems based on three-criteria numerical optimization // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIX Международной конференции (12-15 сентября 2017 г., Самара, Россия) / Под ред. акад. Е.А. Федосова, акад. Н.А. Кузнецова, проф. В.А. Виттиха. – Самара, ООО «Офорт», 2017. -616 с. – С. 37-44.

[4] *Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. - М.: Наука, 2012. 309 с.

[5] *Рапопорт Э.Я.* Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. - М.: Металлургия, 1993. 279 с.

[6] *Рапопорт Э.Я.* Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. - М.: Высшая школа, 2009. – 678 с.

[7] *Рапопорт Э.Я.* Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – 336 с.

[8] *Altair FLUX*. URL: http://hyperview.eu/product/Flux (дата обращения 01.03.2019 г.)

[9] *Шарапова О.Ю.* Численное моделирование процесса периодического индукционного нагрева на базе конечно-элементного программного пакета FLUX // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. - №7(28). – С.180-185.

[10] Yu. Pleshivtseva, G. Rogachev, A. Popov MATLAB-FLUX Coupling for numerical modeling in education // SHS Web of Conferences 29,02033 (2016).

[11] *Чиркин В.С.* Теплофизические свойства материалов. - М.: Физматгиз,1959. 356 с.

[12] *MATLAB help*. URL: https://www.mathworks.com/help/matlab/

[13] *Попов А.В., Дьяконов А.И.* Оптимальное по быстродействию управление процессом периодического индукционного нагрева с учетом ограничения на максимальную температуру // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – №3(47). – С. 56-68.

Индукционный нагрев при закалке шаров подшипников

Проценко А.Н.
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
г. Самара, Российская Федерация
alex290853@yandex.ru

Танаев А.В.
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
г. Самара, Российская Федерация
Retribushn@mail.ru

Макарова И.С.
ФБГОУ ВО «СамГУПС»
г. Самара, Российская Федерация
makarova_is@mail.ru

***Abstract*—Hardening is widely used by production of various details like balls for ball bearings. Processes of spheres heat treatment of are in attention focus because of mass character of production. High requirements to profitability, accuracy and repeatability are imposed to such processes. Classical technologies of gas and electric heating do not meet these requirements because speed of heating are small and internal parts of spheres gets warm. So, induction heating forces out traditional heating technologies in this process. Traditional designs of inductors are unsuitable as they do not provide the required uniformity of heating for hardening.However, technologies of induction heating need to be adapted for heat treatment of details of sphere shape.**

In article the new design of the inductor for spheres hardening is proposed. It allows to obtain uniform distribution of temperature on the surface of heated sphere. For the purpose of check of proposed design, the numerical model of installation in the Cedrat FLUX v10.4 program was constructed. The temperature field on a sphere surface was obtained. Temperature difference on the surface of sphere was 30 °C that meets requirements of hardening. Because of the high speed of heating in the inductor the middle of sphere does not heat up. It allows to increase heating efficiency as there are no energy consumption for heating of the sphere's center. Also, the combination of high skin hardness and the viscoplastic middle is reached. It raises working life of the ball bearing and its reliability.

The aim of the article is to show the approach to geometrical design of inductor to achieve uniform surface temperature on heated ball. Numerical modeling is carried out for check of the offered design.

Keywords – induction heating, uniform heating, hardening, ball, numerical modeling.

I. Введение

Повышение качества и долговечности подшипников качения неразрывно связано с совершенствованием технологии и оборудования для термической обработки. Основными направлениями для совершенствования технологии термообработки деталей подшипников являются [1]:

- концентрация технологических операций (для обеспечения непрерывности и поточности производства);
- интенсификация нагрева и обеспечение равномерности нагрева;
- максимальная автоматизация технологического процесса;
- применение защитных атмосфер.

Реализации данных направлений способствует применение индукционного нагрева. Благодаря высокой скорости нагрева и точному воспроизведению режима он приходит на смену классическому пламенному и электропечному нагреву.

Данная статья посвящена исследованию индукционного нагрева шаров подшипников для последующей закалки, как наиболее ответственных деталей, качество которых влияет на срок работы всего подшипника в целом.

В настоящее время для изготовления шаров применяются эффективные методы поперечной и поперечно-клиновой прокатки. Полученные в результате прокатки шары отжигают с целью их смягчения. Эта операция облегчает механическую обработку, а также подготавливает структуру стали к последующей закалке.

Закалка включает в себя технологические операции нагрева и быстрого охлаждения. В конце цикла нагрева температура на поверхности шаров должна быть однородной для предотвращения возникновения нежелательных напряжений, пятнистой твёрдости и растрескивания.

II. Отечественный опыт создания комбинированных установок для закалки шариков подшипников

Примером отечественных установок может служить агрегат для термообработки шаров, предложенный инженером А.П. Морозовым в 1960 гг. Его конструкция представляет собой последовательно расположенную индукционную нагревательную установку и канальную электрическую печь. Общий вид агрегата приведён на рис. 1 [2].

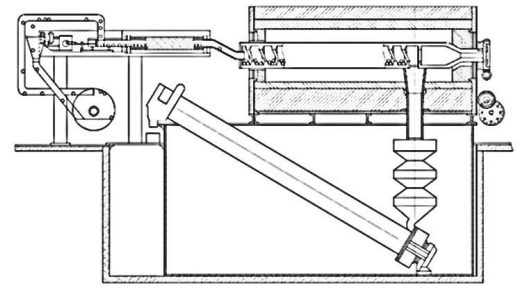


Рис. 1. Агрегат для индукционной закалки шаров

Выбор такой конструкции обусловлен тем, что при нагреве шара в соленоидальном индукторе нельзя добиться однородной температуры поверхности шара без изменения положения его оси вращения в процессе нагрева. Поэтому шары нагреваются в индукторе, а

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

затем в течение длительного времени выдерживаются в канальной электрической печи для гарантированного достижения требуемой равномерности нагрева.

Указанная конструкция позволяет добиться высокой однородности температуры на поверхности шаров. Однако она наследует все недостатки, присущие электропечным установкам: долгое время выхода на рабочий режим; большие тепловые потери; тепловая инертность.

Применение данной конструкции агрегата для закалки шаров приводит к дополнительным энергозатратам, связанным с нагревом сердцевин шаров. Кроме того, возрастают капитальные затраты на устройство печи, а также стоимость эксплуатации и обслуживания.

Для ликвидации указанных выше недостатков необходимо создание такого электромагнитного поля в индукторе, которое гарантировало бы равномерное тепловое поле на поверхности детали.

Большой вклад в решение проблем равномерного нагрева тел сложной формы внесли Вологдин В.П., Бабат Г.И., Немков В.С., Титов С.С., Кувалдин А.В., Lupi S., Forzan M. и другие [1,3-6].

III. Индуктор для равномерного нагрева поверхности шаров

Технически, наиболее просто реализовать прокатывание шара сквозь индуктор по двум горизонтальным направляющим. При этом его ось вращения перемещается в горизонтальной плоскости, которая параллельна плоскости направляющих. Однако электромагнитное поле соленоидального индуктора имеет такую конфигурацию, которая исключает достижение равномерной температуры поверхности шара при таком механическом движении.

Чтобы достичь равномерной температуры на поверхности шара при нагреве в соленоидальном индукторе необходимо вращать плоскость, в которой перемещается ось вращения шара, вокруг оси соленоида. Технически, такой характер механического движения шара может быть получен путём использования направляющего профиля особой конфигурации [6]. Однако применение данной конструкции приводит к дополнительным капитальным затратам на устройство индукционной нагревательной установки, а также возрастанию стоимости эксплуатации и обслуживания.

Для устранения вышеописанных недостатков в настоящей статье предлагается иная конструкция индуктора.

Индуктор состоит из нескольких индуктирующих проводов, каждый из которых имеет форму цилиндрической винтовой линии и имеет длину, равную ¼ шага винтовой линии. Начала индуктирующих проводов равномерно распределены во II-ой четверти индукционной нагревательной установки (рис. 3). Направление вращения винтовой линии выбрано таким, чтобы группа проводов была расположена выше плоскости, в которой перемещается ось вращения шара (при простом прокатывании). Провода электрически соединены параллельно.

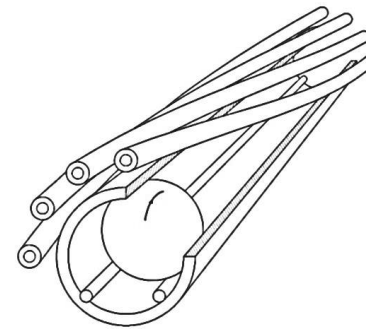


Рис. 2. Индукционная нагревательная установка для закалки шаров. Общий вид

Число индуктирующих проводников в группе может отличаться от представленного на рис. 2 при условии их равномерного распределения по четверти окружности.

Электромагнитное поле, создаваемое таким индуктором, в отличие от электромагнитного поля соленоидального индуктора, изменяет свою конфигурацию по длине индукционной нагревательной установки. Поле поворачивается вслед за индуктирующими проводами.

Данная особенность позволяет исключить необходимость вращения плоскости, в которой перемещается ось вращения шара, что значительно повышает технологичность изготовления и простоту обслуживания установки.

Для уменьшения индуктивности контура и повышения удельной мощности, передаваемой в нагреваемую деталь, возможно добавление второй группы индуктирующих проводов. Вторая группа расположена осесимметрично относительно первой группы. Ось симметрии совпадает с осью цилиндрической винтовой линии. Провода в группе так же соединены параллельно, а соединение между группами – последовательное.

IV. Математическое моделирование

Моделирование процесса нагрева заключается в совместном решении электромагнитной и тепловой задач, с учётом нелинейности физических свойств материала нагреваемой детали.

Поле, относительно магнитного векторного потенциала, описывается (1)[1,4]:

$$j\omega\sigma A + rot\left(\frac{1}{\mu} rot A\right) = J \qquad (1)$$

Здесьω - угловая частота, σ - электрическая проводимость, μ - магнитная проницаемость и J – плотность тока.

Нестационарное тепловое поле описывается (2):

$$\gamma c \frac{\partial T}{\partial t} + div(-\lambda grad T) = q \qquad (2)$$

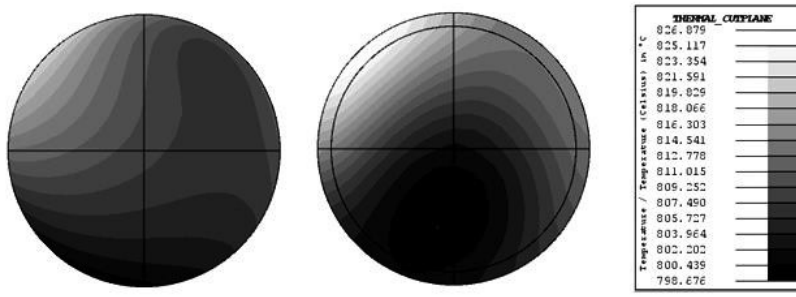


Рис. 3. Температурное поле на поверхности шара (слева) и по сечению шара (справа)

Здесьλ - теплопроводность, T – температура, γ - плотность, c – удельный нагрев. Вихревые токи, индуцированные в электропроводящем нагреваемом теле, создают специфические Джоулевы потери q (3):

$$q = \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t}\right)^2 \quad (3)$$

Как известно, высокая сложность уравнений для трёхмерных задач не позволяет аналитически рассчитать электромагнитное поле, обеспечивающее равномерный поверхностный нагрев шара. В связи с этим для проверки предложенной конструкции индуктора было применено численное моделирование в среде конечно-элементного моделирования CEDRAT Flux.

V. Численное моделирование

Численное моделирование связанных полей проведено с помощью программного пакета для конечно-элементного моделирования Cedrat FLUX [7].

Расчётная область модели разбита на 45 000 элементов. Электромагнитная задача решалась с интервалом времени 0,005 секунд. В результате расчета электромагнитного поля было получено распределение источников тепла в нагреваемой детали, которое использовалось при решении нестационарной тепловой задачи в течение следующего интервала времени. Некоторые исходные данные численной модели приведены в таблице I.

ТАБЛИЦА I. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

Параметр	Значение	Ед. изм.
Диаметр шара	20	мм
Диаметр индуктора внутренний	26	мм
Число индуктирующих проводников	4	мм
Диаметр проводника	4	мм
Материал шара	Сталь ШХ15	
Материал индуктора	Медь М1	
Температура окружающей среды	20	°C
Начальная температура шара	20	°C
Конечная температура шара	860	°C

Материал шара – ШХ15, материал индуктора – М1. Физические свойства материала шара взяты по [5].

В результате численного моделирования были получены температурные поля на поверхности и по сечению шара, показанные на рис. 3. Время нагрева до заданной температуры составило 2,5 секунды. Максимальный перепад температуры составил 28°C. Если полученное температурное поле на поверхности шара не отвечает технологическим условиям для закалки особо ответственных деталей, возможно использование предложенной индукционной нагревательной установки в линии с канальной электрической печью. Это позволит сократить длину печи и снизить затраты на её устройство и эксплуатацию.

VI. Заключение

Высокая равномерность температурного поля по сравнению с другими конструкциями индукторов [8] позволяет использовать предлагаемую установку для сквозного нагрева и для поверхностной закалки. Планируемые дальнейшие исследования позволят распространить применение индуктора рассмотренной конструкции на всю номенклатуру шаров.

Список литературы

[1] Слухоцкий А.Е., Немков В.С., Павлов Н.А. Установки индукционного нагрева. - Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.

[2] Морозов А.П., Футорянский Ю.В. Термообработка без окисления и обезуглероживания. - Куйбышевское книжное издательство, Куйбышев, 1967. - 90 с.

[3] Rudnev V. Handbook of Induction Heating. - Marcel Dekker Inc., New York, 2003.

[4] Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева.- Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. – 280 с.

[5] http://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/shx15

[6] Титов С.С. Разработка и исследование электротехнического комплекса для симметричного индукционного нагрева металлоизделий шарообразной формы: дис. канд. техн. наук: 05.09.03: 20.06.2014. - Липецк, 2014. – 160 с.

[7] О продукте CedratFLUX. (https://altairhyperworks.com).

[8] Н.Н. Клочкова, А.В. Обухова, А.Н. Проценко. Оптимизация формы индуктора для закалки сферических поверхностей. Вестник Самарского государственного технического университета, серия Технические науки №3 (55) 2017.

Моделирование и нечеткая оптимизация процесса индукционного нагрева тонкостенных оболочек

Рогачев Г.Н.
СамГТУ
Самара, Россия
grogachev@mail.ru

Рогачев Н.Г.
СамГТУ
Самара, Россия
rogachev8@mail.ru

***Abstract* — A mathematical model of induction heating process of paramagnetic thin shells was considered. Electromagnetic processes in the system "inductor, heated shell, temperature equalization devices" are modeled by the method of coupled circuits, thermal processes - by the differential-difference method. The model is implemented in MATLAB and is used to optimize the heating process on the basis of partial criteria formulated in a fuzzy form.**

Ключевые слова — индукционный нагрев, математическая модель, нечеткая оптимизация, индуктивно связанные контуры

I. Введение

Технология индукционного нагрева металлов является самой современной методикой нагрева. У нее множество достоинств: относительно низкая инерционность, энергосбережение, малые габариты установки и др. Но имеются и недостатки, основной из которых заключается в неравномерности распределения температуры по радиусу и длине нагреваемого тела. В связи с этим появляется необходимость разработки конструкций и режимов работы индуктора, обеспечивающих требуемое качество нагрева. Целью значительного числа исследований был поиск оптимальных или близких к оптимальным решений. Задачам оптимального проектирования и оптимального управления посвящено значительное число работ, к настоящему времени получен целый ряд фундаментальных результатов. Здесь прежде всего нужно отметить основополагающие работы Э.Я. Рапопорта, труды Г.Л. Дегтярева, А.И. Егорова, М.Ю. Лившица, Ю.Э. Плешивцевой, Т.К. Сиразетдинова.

Целью нашего исследования была разработка системы близкого к оптимальному по совокупности частных критериев, сформулированных в нечетком виде, программного управления процессом индукционного нагрева парамагнитных тонкостенных оболочек до заданных кондиций с последующей стабилизацией температуры на этом уровне. В работе эта проблема редуцируется в задачу нечетко-оптимального синтеза программы работы цифрового регулятора гибридной непрерывно-дискретной системы управления. Непрерывную часть составляет система «индуктор – нагреваемое изделие – устройства выравнивания температуры по длине изделия», являющаяся нелинейным, многомерным и многосвязным объектом управления, дискретную – цифровой программный регулятор. Технологический процесс является многооперационным, состоящим из этапа нагрева и этапа стабилизации температуры. Разработанный цифровой регулятор должен обеспечивать выполнение требований самого общего характера к управляемым процессам, в том числе формулируемых нечетко.

Практические требования к повышению качества управляемых процессов, равно как и многие существенные особенности прикладных задач, определяющие их специфику, не вписываются в постановочные аспекты используемых классических схем решения оптимизационных задач, формализм которых вынужденно абстрагируется от целого ряда важных для приложений факторов. Во многих существующих работах исследование сложных многооперационных систем управления проводится на основе традиционных подходов. Игнорируется взаимное влияние как отдельных частей технологического процесса, так и управляющих подсистем. Синтез алгоритмов работы подсистем производится без учета влияния предыдущих этапов на качество последующих.

Новизна предлагаемого подхода состоит в способе организации на цифровых регуляторах алгоритмов управления в виде систем правил (продукций) вида «условие-действие», задача поиска которых формулируется как проблема нечеткой оптимизации. Системы продукций могут изменяться во времени, адаптируясь к условиям работы технологической цепочки, что достигается организацией в темпе с многооперационным процессом выполняемых цифровыми регуляторами необходимых вычислительных процедур. Существенным моментом является также учет при определении алгоритмов работы отдельных управляющих подсистем не только требований к текущему этапу, но и возможных последствий для последующих.

II. Моделирование процесса индукционного нагрева парамагнитных тонкостенных оболочек

Рассматривается система управления процессом индукционного нагрева парамагнитных тонкостенных оболочек до заданных кондиций с последующей стабилизацией температуры на этом уровне. Изделие помещается внутрь индукционного нагревателя, состоящего из индуктора, питающегося от источника переменного тока, и теплоизоляции – футеровки. Температура нагрева контролируется термопарами в трех точках, разнесенных по длине нагреваемого тела (выходные сигналы y_1, y_2, y_3). Температурное поле на завершающей стадии процесса должно достаточно продолжительное время быть равномерным на уровне

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-08-00506 А

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

$y_1, y_2, y_3 \in [\, y_{зад} - \varepsilon, y_{зад} + \varepsilon]$, т.е. отклоняться от заданной температуры $y_{зад}$ не более чем на ε . Это требование обеспечивают три управляющих воздействия: u_1, u_2, u_3 . Основной канал управления $u_1 \in \{u_{min}, u_{max}\}$ – мощность питающего индуктор источника. Этот канал позволяет воздействовать на среднюю температуру изделия, нагретого до температур, сравнимых с $y_{зад}$ (средняя температура при этом растет, если $u_1 = u_{max}$ и снижается, если $u_1 = u_{min}$), но не в состоянии существенно изменять закон распределения температуры по длине изделия. Для обеспечения требуемой равномерности нагрева индуктор снабжен дополнительными витками как устройствами выравнивания температуры по длине изделия. В разомкнутом состоянии ($u_i = 0, i = 2,3$) витки не оказывают влияния на процесс нагрева. При замыкании витка ($u_i = 1$) в нем наводится противо-ЭДС. Это вызывает локальное снижение мощности нагрева в зоне размещения витка, что способствует выравниванию температуры в нагреваемом изделии.

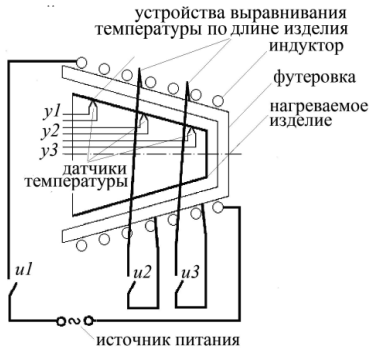


Рис. 1. Система управления процессом индукционного нагрева парамагнитных тонкостенных оболочек

Рассматриваемый технологический процесс является многооперационным, этапы нагрева и стабилизации температуры следуют один за другим, устройства выравнивания температуры по длине изделия включаются в работу по мере необходимости вместе или поочередно, функционируя одновременно с индукционным нагревателем.

Процесс нагрева тонких оболочек может быть описан одномерным уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{\Gamma}{x} \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) + P(x,t) \qquad (1)$$

с краевыми условиями

$$T(x,0) = T_0(x); \frac{\partial T(X_1,t)}{\partial x} = q_{X_1}(T); \frac{\partial T(X_2,t)}{\partial x} = q_{X_2}(T) \quad (2)$$

В (1), (2) $T(x,t)$ - температурное поле нагреваемого изделия, зависящее от времени t и пространственной координаты $x \in [X_1, X_2]$, $\Gamma \in \{1,2\}$ -коэффициент формы нагреваемого тела, $P(x,t)$ -функция внутреннего тепловыделения. Для определения потерь с торцов целесообразно использовать закон Стефана-Больцмана

$$q_{X_1}(T) = k\left(T^{*4}(X_1,t) - T_{cp}^{*4}\right),$$
$$q_{X_2}(T) = k\left(T^{*4}(X_2,t) - T_{cp}^{*4}\right)$$

где k - зависящий от эффективной степени черноты нагреваемого материала и постоянной Стефана-Больцмана коэффициент пропорциональности, T^* и T_{cp}^* - выраженные в относительных единицах абсолютные значения температуры изделия и среды.

Получать аналитическое решение нелинейного уравнения теплопроводности (1) с произвольным характером изменения мощности внутренних теплоисточников $P(x,t)$ и нелинейными граничными условиями (2) в обозримой, удобной для дальнейшего использования форме не представляется возможным даже в одномерном случае. Достаточно эффективным для решения таких уравнений является дифференциально-разностный метод [1], использованный в работе в качестве базового метода расчета тепловых полей. Однако применение стандартных программ расчета тепловых полей для нечеткой оптимизации процессов индукционного нагрева представляется нецелесообразным из-за низкой в этих условиях эффективности стандартных программ, не учитывающих специфику рассматриваемых процессов и задач, поэтому авторами были разработаны собственные подпрограммы.

Объемная плотность мощности внутренних теплоисточников $P(x,t)$ характеризует интенсивность внутреннего тепловыделения, происходящего в нагреваемом изделии при индукционном нагреве. Расчет распределения внутренних теплоисточников является сложной самостоятельной задачей и осуществляется в ходе моделирования электромагнитных процессов.

В качестве методов исследования электромагнитных процессов при индукционном нагреве применяются как аналитические, так и численные методы. Аналитические методы [2] широко использовались на ранних стадиях изучения процесса индукционного нагрева. Наиболее существенные ограничения, присущие аналитическим методам, – это трудность получения в приемлемой, удобной для дальнейшего использования форме аналитического решения задачи распространения электромагнитных волн в телах с произвольным характером изменения по объему электрофизических характеристик и невозможность учета неравномерности, часто весьма существенной, распределения напряженности внешнего поля по поверхности тела.

Наличие этих, труднопреодолимых в рамках аналитических методов, ограничений диктует необходимость использования численных моделей электромагнитных процессов индукционного нагрева.

Численное моделирование электромагнитных процессов индукционного нагрева осуществляется

методами конечных разностей, конечных элементов и вторичных источников. Метода вторичных источников имеет неоспоримые преимущества при рассмотрении внешних краевых задач, решение которых методами конечных разностей или конечных элементов требует или рассмотрения всей области существования поля или искусственного замыкания расчетной области и постановки граничных условий из априорных соображений. Использование же метода вторичных источников позволяет рассматривать лишь области, занятые источниками поля, что повышает точность и сокращает время расчетов.

Изложений в [3] метод расчета электромагнитных полей в немагнитных и ферромагнитных телах с использованием вторичных источников выбран в качестве базового для моделирования электромагнитных процессов в индукционных нагревателях. Расчет полей в немагнитных телах согласно [3] сведен к определению тока $\dot{I}_{1N}$ в индукторе и токов $\dot{I}_{1i}$, $i = 1, 2, ..., N-1$ в $N-1$ элементарных соленоидах, на которые разбивается исследуемое тело. Для нахождения токов составляется система N уравнений вида

$$\left[\dot{Z}_1\right]\left[\dot{I}_1\right] = \left[\dot{U}\right], \qquad (3)$$

получаемая применением 2-го закона Кирхгофа к каждому из N соленоидов. В (3) полное сопротивление каждого элемента $\left[\dot{Z}_1\right] = \left[R_1\right] + j\left[X_{11}\right]$, $R_{1ij} = \begin{cases} R_{1i}, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases}$, где R_{1i} - активное сопротивление i-го соленоида, $\rho(T_i)$ - удельное электрическое сопротивление материала соленоида при температуре T_i; $X_{1ij} = \begin{cases} \omega L_i, & i = j \\ \omega M_{ik}, & i \neq j \end{cases}$, где ω - угловая частота; L_i - индуктивность i-го соленоида, M_{ik} - взаимная индуктивность i-го и k-го соленоидов;

$\dot{Z}_{1ik} = R_{1i} + jX_{1ik}$, $\quad j = \sqrt{-1}$, $\quad \left[\dot{U}\right] = \left[0,\ 0,\ ...,\ \dot{U}\right]^T$.

Решение системы (3) определяет значение токов в индукторе и в соленоидах, которыми представлены составляющие электромагнитную систему тела. Токи соленоидов используются далее для определения мощности теплоисточников $P(x,t)$ в (1),

$$P_{nj} = I_{nj}^2 \, Re(\dot{Z}_{nj}) \qquad (4)$$

Для численного моделирования электромагнитных процессов индукционного нагрева авторами были разработаны специальные подпрограммы, составляющие в совокупности с подпрограммами расчета тепловых процессов цифровую модель индукционного нагрева парамагнитных тонкостенных оболочек. Модель реализована в пакете MATLAB и использовалась для нечеткой оптимизации многоэтапного процесса нагрева.

III. Постановка и решение нечетко-оптимальной задачи управления

Рассмотрению задач синтеза систем правил работы цифровых регуляторов гибридных непрерывно-дискретных систем управления посвящено значительное число исследований. В [4] отмечено, что применительно к целому ряду прикладных задач синтеза (в том числе оптимального) компьютерных систем управления возможно либо осуществить предварительную конечномерную параметризацию некоторых элементов системы продукций, определяющей алгоритм работы искомого регулятора, либо определить набор элементарных функций, из которых будет строиться решение. Это позволяет решать подобные задачи численно как задачи конечномерной оптимизации. Традиционный подход к решению таких задач предполагает формулировку их как задач математического программирования вида

$$\min_{z \in Z} f(z), \quad g_i(z) \geq 0, i = 1, 2, ..., m \qquad (5)$$

где $z \in Z^*$ - искомое решение, $f(z)$ - целевая функция, минимизируемый критерий качества, $g_i(z)$ - уравнения связи или ограничения.

Проблема (4) может быть переформулирована так, чтобы границы, которые отделяют приемлемые решения от неприемлемых, стали размытыми, а степени приемлемости отдельных решений представлены нечеткими числами. Для этого целевая функция и ограничения должны пониматься в нечетком смысле [5]. При использовании обозначений, используемых в области нечеткой оптимизации, нечеткая версия проблемы (4) может быть записана так:

$$\tilde{\min}_{z \in Z} f(z), \quad g_i(z) \tilde{\geq} 0, i = 1, 2, ..., m \qquad (6)$$

где волнистая черта «~» - символ нечеткой операции. Пусть функции принадлежности $\mu_0(.)$, $\mu_i(.), i = 1, 2, \ldots, m$ представляют степени выполнения цели и ограничений. Решение оптимизационной задачи (6) должно удовлетворять, насколько возможно, и цели и ограничениям, т.е. максимизировать минимальное из значений $\mu_i(.), i = 0, 1, \ldots, m$. Нечеткая проблема математического программирования (6) может быть преобразована [6] в задачу поиска $\max_{z \in Z} C(z)$, где $C(z)$ представляет глобальную степень удовлетворения решением z цели и ограничений: $C(z) = \min\{v_0, v_1, \ldots, v_m\}$, $v_0 = \mu_0(f(z)), v_i = \mu_i(g_i(z)), i = 1, 2, ..., m.$ Окончательно нечеткая проблема (2) приобретает вид определения такого решения $z \in Z$, которое обеспечивает

$$\max_{z \in Z^*} \min_i (v_i), \ i = 0, 1, ..., m, \qquad (7)$$

где $v_0 = \mu_0(f(z)), v_i = \mu_i(g_i(z)), i = 1,2,...,m$, функции принадлежности $\mu_0(.)$, $\mu_i(.)$, $i = 1, 2, \ldots, m$ представляют степени выполнения цели и ограничений соответственно. Далее проблема (7) решается известными численными методами. В качестве процедуры численного решения проблемы (7) использовалась функция fminimax пакета MATLAB [7], позволяющая минимизировать максимальное из значений множества целевых функций с учетом линейных и нелинейных ограничений.

Изложенным способом могут быть решены задачи достаточно общего вида, включая представляющую особый интерес задачу управления при помощи цифровых регуляторов нелинейными, многомерными и многосвязными объектами в виде многооперационных технологических процессов. А именно, пусть управляемый процесс состоит из P этапов с номерами $p = (1,...,P)$. Процессы могут следовать один за другим или идти одновременно. Требуется минимизировать функционал вида

$$J = \sum_{p=1}^{P} J^{(p)} = \sum_{p=1}^{P} [\Phi^{(p)}(x^{(p)}(t_0), t_0, x^{(p)}(t_f), t_f, q^{(p)}) + \int_{t_0^{(p)}}^{t_f^{(p)}} L^{(p)}(x^{(p)}(t), u^{(p)}(t), t, q^{(p)})dt]$$

с учетом динамических ограничений $\dot{x}^{(p)} = f^{(p)}(x^{(p)}, u^{(p)}, t, q^{(p)})$, граничных условий $\varphi_{min} \le \varphi^{(p)}(x^{(p)}(t_0), t_0^{(p)}, x^{(p)}(t_f), t_f^{(p)}, q^{(p)}) \le \varphi_{max}$, ограничений в виде неравенств $C^{(p)}(x^{(p)}(t), u^{(p)}(t), t, q^{(p)}) \le 0$ и условий непрерывности фазовых переменных в точках «сочленения» этапов

$$P^{(s)}(x^{(p_l^s)}(t_f), t_f^{(p_l^s)}, q^{(p_l^s)}, x^{(p_u^s)}(t_0), t_0^{(p_u^s)}, q^{(p_u^s)}) = 0 \quad ,$$

$(p_u^s . p_l^s \in [1...L]$. Здесь $x^{(p)}(t) \in R^{n_p}$, $u^{(p)}(t) \in R^{m_p}$, $q^{(p)}(t) \in R^{q_p}$ и $t \in R$ – соответственно состояние, управление, параметры и время на этапе $p \in [1,\ldots,P]$, L – количество «сочленений» этапов, $p_l^s \in [1,\ldots,L]$ и $p_u^s \in [1,\ldots,L]$ – номер «левого» и «правого» «сочлененных» этапов соответственно.

Эта «многоэтапная» задача разбивается на P подзадач, связанных граничными условиями для непрерывных переменных. В результате решения этой задачи определяется набор оптимальных программных управлений $u^{(p)}(t) \in R^{m_p}$, $p = (1,...,P)$. Структура этого управления определяет количество правил продукционной модели регулятора как число интервалов постоянства закона изменения оптимального управления.

В качестве характерного примера рассмотрена задача синтеза нечетко-оптимальной системы правил работы регулятора в задаче управления процессом индукционного нагрева парамагнитных тонкостенных оболочек до заданного значения с последующей стабилизацией температуры на этом уровне.

Задача управления с нечеткой целью и ограничениями сформулирована следующим образом. Необходимо за кратчайшее время $t_F \to min$ обеспечить перевод модели объекта управления (1) – (4) в точку фазового пространства $\max_{x \in [X_1, X_2]} |T_F(x)| \le \varepsilon$, где $T_F(x) = (T(x, t_F) - T_{ЗАД})$ при выполнении дополнительного условии $\max_{t \in [0, t_F]} (T_D) \le 2\varepsilon$, где $T_D = \max_{x \in [X_1, X_2]} T(x,t) - \min_{x \in [X_1, X_2]} T(x,t)$. Далее необходимо в течение времени t_S обеспечить выполнение условия $\max_{t \in (t_F, t_F + t_S]} (T_D) \le 2\varepsilon$. Сигмоидальные функции принадлежности нечетких множеств заданы аналитически: $\mu_0(t_F) = \frac{1}{1 + e^{(t_F - 1.5)^2}}$;

$\mu_1(\rho_1) = \frac{1}{1 + e^{(\rho_1 - 0.15)^2}}$; $\rho_1 = \max_{x \in [X_1, X_2]} |T_F(x)|$;

$\mu_2(\rho_2) = \frac{1}{1 + e^{(\rho_2 - 0.3)^2}}$; $\rho_2 = \max_{t \in [0, t_F]} (T_D)$;

$\mu_3(\rho_3) = \frac{1}{1 + e^{(\rho_3 - 0.3)^2}}$; $\rho_3 = \max_{t \in [t_F, t_F + t_S]} (T_D)$.

Нечеткое решение найдем из соотношения (7). Систему правил работы цифрового программного регулятора с единичной частотой срабатывания (один раз в единицу модельного времени) будем искать в виде системы правил вида «если $t \in [i, i+1)$ то $u_1(t) = u_{1i}, u_2(t) = u_{2i}, u_3(t) = u_{3i}$ », $i = 0, 1, 2, \ldots, t_F + t_S - 1$, где $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ – сигналы управления мощностью индуктора и устройствами выравнивания температуры по длине изделия $u_1(t) \in [0,1], u_2(t) \in [0,1], u_3(t) \in [0,1]$. Результаты расчетов представлены на рисунках 2, 3, где $y_1 = T(X_1), y_2 = T((X_1 + X_2)/2), y_3 = T(X_2)$, $t_F = 1$, $t_S = 1$. Степень удовлетворения полученного решения заданным условиям составляет 0.91-0.93.

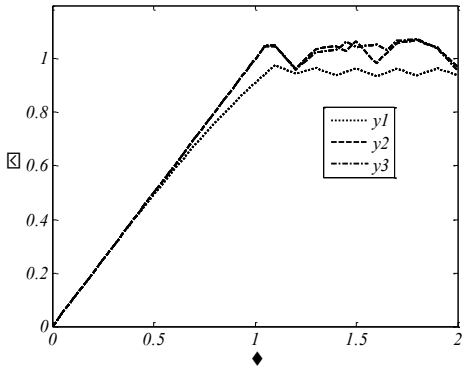


Рис. 2. График изменения температуры в нечетко-оптимальной задаче

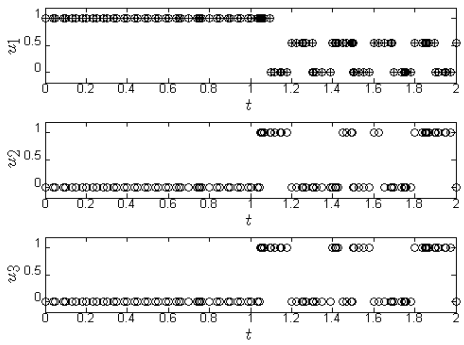


Рис. 3. График изменения управляющих воздействий в нечетко-оптимальной задаче

IV. Заключение

Рассмотренный пример свидетельствует о возможности использования нечеткой логики в задачах синтеза систем продукций регуляторов в условиях нечетко сформулированных требований к промежуточным и конечному состоянию нелинейного, многомерного многосвязных технологической цепочки и ограничений, налагаемых на вид системы продукций. Такой подход представляется весьма перспективным, на его базе возможно автоматизировать весь процесс проектирования систем управления от постановки задачи до моделирования их работы, включая проверку программного обеспечения, создавать технические устройства, самостоятельно генерирующие алгоритмы работы своих систем управления и при необходимости модернизировать их.

Список литературы

[1] Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами. – М.: Высш. шк., 2005. - 291 с.

[2] Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. - Л.: Энергия, 1974. - 264 с.

[3] Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева - Л.: Энергоатомиздат, 1988. - 271с.

[4] Рогачев Г.Н. Гибридно-автоматный метод анализа и синтеза систем автоматического управления // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки», 2006. № 41. с. 43-47.

[5] Bellman R.E., Zadeh L.A. Making in Fuzzy Environment // Management Science, 17, №.4, 1970, p.141-164.

[6] Carlsson C., Fullér R., Giove S. Optimization under fuzzy rule constraints// Belgian Journal of Operations Research, Statistics and Computer Science, 38, 1998, p. 17-24.
Yang W. Y., Cao W., Chung T.-S., Morris J. Applied Numerical Methods Using MATLAB. - John Wiley and Sons, 2005. – 502 p.

Управление индукционным нагревом для титановых сплавов

Смольянов И.А.
Кафедра «Электротехника и электротехнологические системы» УрФУ
Екатеринбург, Россия
i.a.smolianov@urfu.ru

Сарапулов Ф.Н.
Кафедра «Электротехника и электротехнологические системы» УрФУ
Екатеринбург, Россия
sarapulovfn@yandex.ru

Сарапулов С.Ф.
Кафедра «Электротехника и электротехнологические системы» УрФУ
Екатеринбург, Россия
s.f.sarapulov@urfu.ru

***Abstract* — The problem of through induction heating of Ti6Al4V billet is being solved. The main difficulties of the induction heating of titanium alloys are considered. The task is formulated as a complexly interdisciplinary problem of magnetic and temperature fields. The control process is implemented using PID control. Optimum temperature control is realized using BOBYQA, Nelder-Meaded, Monte Carlo optimization algorithms. The performance of each algorithm was estimated numerically using the Pareto front. The main purpose of the work is to select the regulator coefficients at which there will be a minimum temperature difference in the entire volume of the workpiece, and the average temperature will tend to 950 °C.**

Ключевые слова — сквозной нагрев, МКЭ, индукционный нагрев, управление, оптимизация, ПИД регулятор, Ti6Al4V, титан.

I. Введение

Титановые сплавы являются одним из самых популярных конструкционных материалов наравне с алюминиевыми и стальными сплавами. Основные промышленные отрасли производства, в которых применяют титановые сплавы – это авиастроение, космическая и оборонная промышленность. Широкое использование титановых сплавов связано с высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах, немагнитностью, хорошей жаропрочностью при температурах экспликации до 500-600 ºС [1-4].

Вышеупомянутые преимущества достигаются в большинстве случаев после термической обработки изделия. Осуществление процесса нагрева осложняется его же преимуществами. Например, значение теплопроводности титана в 15 раз ниже, чем у алюминия и примерно в 5 раз ниже, чем у стали [5]. Температуропроводность титана также в 15 раз ниже, чем у алюминия и в 3.5 раза ниже, чем у сталей [5]. Поэтому, быстрый нагрев может привести к существенному локальному перегреву и, как следствие, образованию трещин.

Указанное выше обуславливает ограничение скорости нагрева при термической обработке. В большинстве случаев используют предварительный нагрев в индукционных печах, а затем производят процесс выравнивания температур в печах сопротивления, что требует большого временного цикла.

Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт №02.A03.21.0006

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

При неблагоприятном выборе режимов индукционного нагрева слитков возможно расплавление подповерхностных слоев и выплескивание металла при последующей деформации.

Один из возможных реальных процессов нагрева заготовки из Ti6Al4V до 950 ºС перед пластической деформацией производится следующим образом [6, 7]:

- Предварительный нагрев в индукционной печи до максимально возможной температуры (20-40 мин)
- Перемещение разогретой заготовки к печи сопротивления
- Выравнивание температуры в печи сопротивления до температуры 950 ºС
- Перемещение к прессовальной установке.

В этой работе предлагается рассмотреть возможность осуществления полного цикла сквозного нагрева заготовки Ti6Al4V в индукционной печи без последующего выравнивания в печах сопротивления. Предполагается, что такой подход позволит снизить время полного цикла, а также энергозатраты на процесс нагрева.

Основные подходы к решению связанных задач расчета температурного и магнитного полей основаны на дискретном представлении области пространства и времени. В работах [8, 9], рассматривают магнитное поле в частотной области, а температурное поле во временной. Такой подход позволяет разрешить проблему большого различия постоянных времени температурного и магнитного полей. Существенным недостатком таких подходов является существенные требования к вычислительным ресурсам. В ряде работ рассматривают процесс настройки регулятора с помощью схем замещения [10, 11]. Авторы работ [12,13] отмечают преимущества использования детализированных схем замещения (магнитных и тепловых) для задач оптимизации и управления. Все это показывает, что пока не существует единственного оптимального подхода к решению задач управления нагревом титановых тел.

II. Описание задачи

Установка нагрева состоит из двух медных водоохлаждаемых обмоток индуктора, внешней и внутренней, которые включены последовательно и согласно. Каждая обмотка содержит по 54 витка. Внешняя обмотка имеет ряд отпаек, за счет чего можно регулировать эффективную зону нагрева заготовки (шунтирование магнитного поля). В данной работе рассматривается подключение всех витков внешней

обмотки. Между заготовкой и индуктором размещена футеровка из асбестоцемента. Основные геометрические размеры установки приведены на Рис. 1. Индукционная установка питается от преобразователя частоты с полной мощностью 300 кВА и рабочей частотой от 100 до 300 Гц.

Свойства используемых в модели титановых сплавов в зависимости от температуры показаны на Рис. 2 - Рис. 4. Относительная магнитная и диэлектрическая проницаемости для всех расчетных областей приняты равными единице. Физические параметры катушек, футеровки и окружающей среды не зависят от температуры. Электропроводность меди, из которой изготовлены катушки, равна 59.98 МС/м. Теплопроводность, плотность и теплоемкость футеровки, выполненной из асбестоцемента, равны 8 $Вт/(м\cdot{}^{o}C)$, 1.8 $г/см^3$ и 1.13 $кДж/(кг\cdot{}^{o}C)$ соответственно.

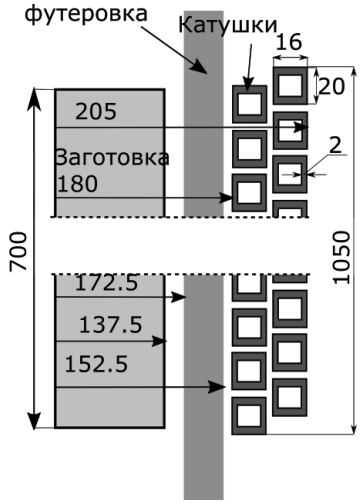


Рис. 1. Основные геометрические параметры установки

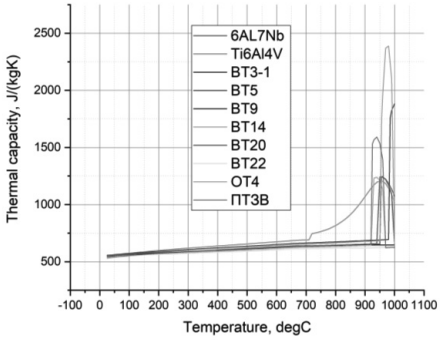


Рис. 2. Зависимости теплоемкости от температуры

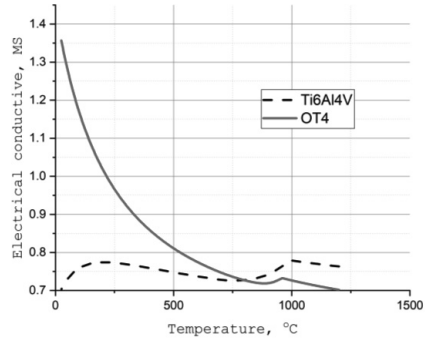


Рис. 3. Зависимость электропроводности от температуры

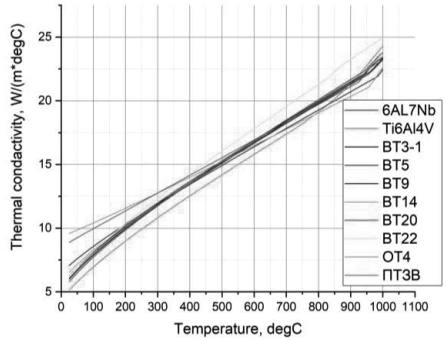


Рис. 4. Теплопроводность в зависимотси от температуры для различных титановых сплавов

III. Описание математической модели

Процесс индукционного нагрева титановой заготовки, расположенной симметрично индуктору, можно описать в двухмерной осесимметричной постановке задачи. Выражение для расчета электромагнитного поля можно записать в А-формулировке

$$\nabla\times\left(\nabla\times\underline{\mathbf{A}}\right)=j\mu\omega(P)\gamma(T)\underline{\mathbf{A}}\,, \qquad (1)$$

где $\underline{\mathbf{A}}$ - фазор векторного магнитного потенциала, μ - абсолютная магнитная проницаемость среды, ω - угловая частота поля в зависимости от электрической мощности индуктора P, $\gamma(T)$ - функция электропроводности от температуры T. Стоит отметить, что частота поля (угловая частота) изменяется по эмпирической функции в зависимости от активной мощности преобразователя.

Выражение для расчета температурного поля в этой задаче удобно записать в виде

$$\nabla\cdot\left(\lambda(T)\nabla T\right)=\frac{\partial\left(\rho C_p(T)T\right)}{\partial t}-p \qquad (2)$$

где, $\lambda(T)$ - функция теплопроводности от температуры, ρ - плотность среды, C_p - относительная теплоемкость.

Передаваемая в загрузку объемная мощность определяется согласно закону Джоуля-Ленца как

$$p = \frac{|J_{ind}|^2}{\gamma(T)} \ . \qquad (3)$$

При этом индуцируемый ток рассчитывается, как $J_{ind} = -j\omega\gamma(T)\underline{\mathbf{A}}$.

Электропитание индуктора в модели задается с помощью выражения (4). Это выражение зависит от температуры T_m, которая измеряется на поверхности заготовки в середине ее длины, и температуры по заданию T_g. Регулирование осуществляется с помощью подбора коэффициентов K_p, K_i и K_d. Это выражение (4) реализовано в пакете численного моделирования Comsol Multiphysics и обновляется при каждом пересчете якобиана вычисляемой системы. Пересчет якобиана вычисляемой модели зависит от скорости изменения температурного поля. Изменении напряжения (4) приводит к пересчету уравнения (1) с новыми параметрами и как следствие к изменению значения теплового источника (3).

$$U = K_p\left(T_g - T_m\right) + K_i\int_0^t\left(T_g - T_m\right)dt + K_d\frac{dT_m}{dt} \qquad (4)$$

Поиск коэффициентов K_p, K_i и K_d, в дальнейшем будет упоминаться, как пропорциональный, интегральный и дифференциальный, соответственно, и реализован с помощью двух методов оптимизации приближенного расчета градиента целевой функции линейной аппроксимации Nelder-Mead и аппроксимации градиента целевой функции второго порядка BOBYQA.

Целевая функция определяется выражением (5), как разность максимальной $T_{\max}$ и минимальной $T_{\min}$ по всему объему нагреваемой заготовки. Вторая вспомогательная целевая функция описывается с помощью средней температуры в объеме нагреваемой заготовки T_{av} . Цель задачи оптимизации свести выражения (5) и (6) к минимуму. Решение, при котором максимальное и минимальное значения в конце процесса нагрева, не лежат в диапазоне температур от 900 до 960 ^{o}C, не учитывается.

$$F_{obj} = T_{\max} - T_{\min} \qquad (5)$$

$$F_{obj} = \left|T_{av} - T_g\right| \qquad (6)$$

Граничное условия для магнитной задачи вдоль расчетной области принимается как $\mathbf{n}\times\mathbf{A} = \mathbf{0}$. Излучение в таких задачах играет существенную роль, поэтому его необходимо учитывать. Этот тип обмена тепловой энергией описывается с помощью граничного условия (7). Уравнение (7) определено для поверхностей заготовки и внутренней поверхности футеровки. Граничное условие на внешней стенке футеровки описывается граничным условием первого рода T=60 ^{o}C. На остальных границах расчетной области для тепловой задачи определено выражение $\mathbf{n}\cdot\mathbf{q} = 0$.

$$\mathbf{n}\cdot\mathbf{q} = n^2\sigma T^4\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \qquad (7)$$

здесь, $\mathbf{n}$ - нормальный единичный вектор к границе, $\mathbf{q}$ - плотность теплового потока, σ - постоянная Больцмана, ε - излучательная способность тела.

Тепловая изоляция в виде каолиновой ваты имитируется с помощью граничного условий на крайних гранях нагреваемой заготовки

$$-\mathbf{n}\cdot\mathbf{q} = -\frac{1}{2}d\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}\left(\frac{T_u - T_d}{R_s}\right) \qquad (8)$$

где, ρ - плотность тепловой изоляции, C_p - теплоемкость изоляции, тепловое сопротивление определяется из толщины d и теплопроводности k и равна $R_s = \frac{d}{k}$, температуры внешней T_d и внутренней T_u стенок изоляции.

IV. Представление результатов

В данной работе рассматривается возможность оптимизации параметров ПИД регулятора на примере титановой заготовки сплава Ti6Al4V, основные физические свойства показаны на Рис. 2 - Рис. 4, а основные параметры на Рис.1. По заданию распределение температур предполагается оценивать в 5 точках, которые показаны на Рис. 5. Эти точки выбраны в соответствии с ранее проведенными экспериментами, в этих точках были размещены термопары.

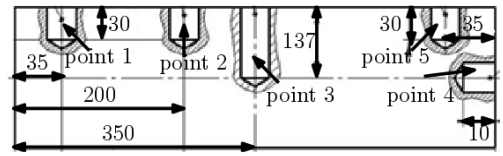


Рис. 5. Рассположение термопар в заготовке

На первом этапе оптимизации необходимо было оценить поведение целевой функции для того, чтобы определить достаточное количество итераций для поиска оптимума. На Рис. 6 показана целевая функция, рассчитанная с помощью алгоритма оптимизации Nelder-Meaded до 1000 итераций. Время расчета 1000 итераций составляет 63 часа. Красными точками показаны решения, при котором все значения температур лежат в диапазоне от 900 до 960 ^{o}C. Можно

видеть, что на Рис. 6 после 60-70 итераций целевая функция практически не изменяется. Поэтому для всех остальных задач оптимизации в этой работе количество итераций было ограничено 80.

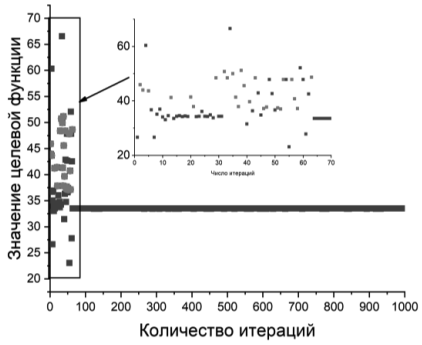


Рис. 6. Эволюция целевой функции

Анализ различных алгоритмов оптимизации удобно сравнить с помощью фронта Парето. В работе были проанализированы три алгоритма оптимизации Nelder Meaded, BOBYQA и MonteCarlo. Эволюция целевой функции в зависимости от пропорционального (K_p) и интегрального (K_i) коэффициентов показана на рис. 6. Из анализа Рис. 7 следует, что целевая функция Nelder Meaded быстрее приходит к минимуму. Все три алгоритма существенно зависят от первоначальных значений оптимизируемых величин. Существует вероятность при некотором выборе первоначальных значений алгоритм может не найти глобальный максимум целевой функции. В этом случае необходимо менять исходные значения оптимизируемых величин или масштаб изменения варьируемых величин.

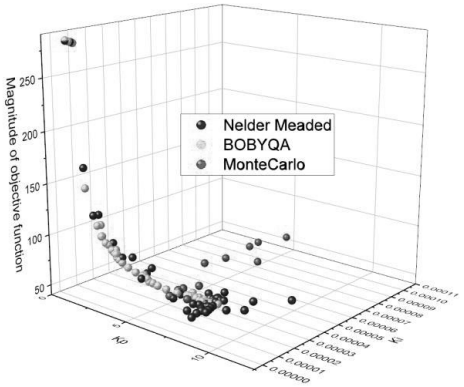


Рис. 7. Фронт Парето для разных алгоритмов оптимизации

Важным фактором в задачах по оптимизации является скорость поиска оптимальных решений. В данной работе с ограничением максимального количества итераций 80-ю по поиску оптимума целевой функции, как суммы (5) и (6), алгоритм Monte Carlo рассчитывал 5ч. 32 мин, Nelder Meaded – 5ч. 57 мин. и BOBYQA – 6 ч. 7 мин.

Полученные результаты изменения температур в пяти точках оптимальных решений различными алгоритмами показаны на Рис. 8-Рис. 10. Анализируя эти графики можно сделать вывод, что эти алгоритмы позволяют находить решения по поставленным им задачам. Но также стоит отметить, что характер этих функций отличается даже при небольшом количестве варьируемых параметров, как в данной задаче.

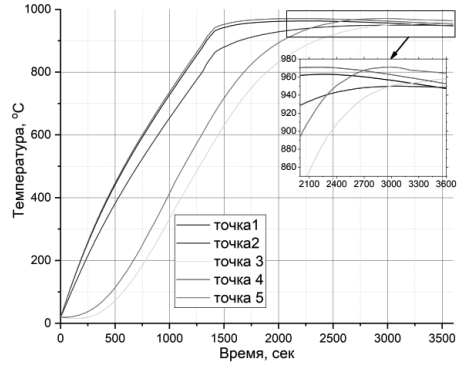


Рис. 8. Оптимальное решение, полученное с помощью алгоритма BOBYQA

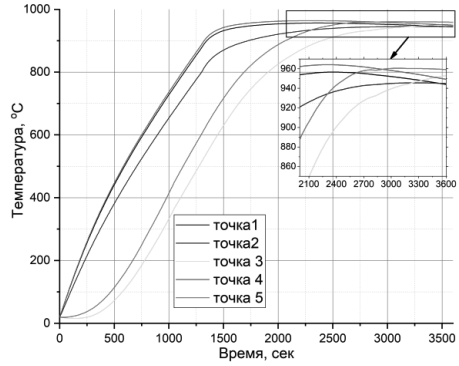


Рис. 9. Оптимальное решение полученное с помощью алгоритма Monte Carlo

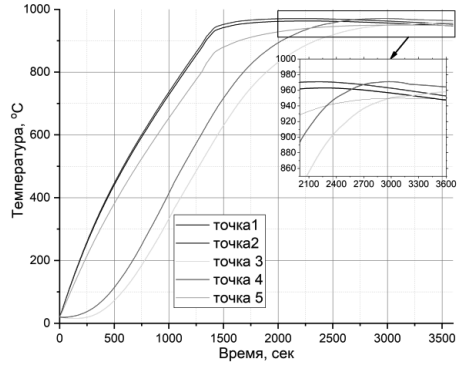


Рис. 10.Оптимальное решение, полученное с помощью алгоритма Nelder-Meaded

Еще один фактор, который стоит учитывать при оптимизации какой-либо установки, это корректность задания физических свойств. В сквозном индукционном нагреве слитков существенную роль играет коэффициент излучения. Результаты максимальной, минимальной температур и их разности (перепад) в конце расчета в зависимости от заданного коэффициента излучения на поверхности показаны на Рис. 11. Справочные данные значения коэффициента излучения в зависимости от температуры лежат в пределах от 0.1-0.4. Максимальная сходимость эксперимента [14] по измерению температур с численным моделированием происходит при коэффициенте излучения 0.1-0.2. Перепад температур при коэффициенте 0.4 в 30% выше, чем при 0.2. Что в большинстве задач является недопустимым отклонением.

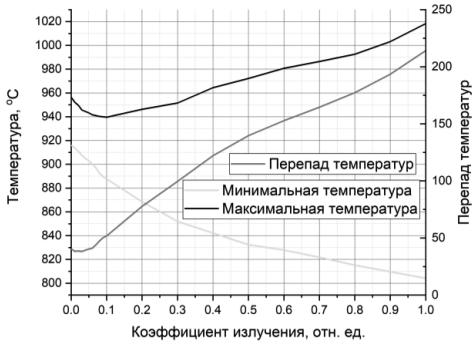


Рис. 11.Зависимости максимального, минимального и перепада температур от коэффициента излучения

V. Заключение

В работе обсуждены основные сложности сквозного нагрева титановых сплавов. Решена связанная задача расчета температурного поля с ПИД регулированием по напряжению. При решении задачи учитывается изменение частоты в зависимости от подводимой к индуктору электрической мощности. Был произведен анализ трех алгоритмов оптимизации по поиску коэффициентов для ПИД регулирования. Рассмотрен процесс нагрева с полученными оптимальными решениями от различных алгоритмов. Численно показано влияние коэффициента излучения на процесс нагрева.

Список литературы

[1] Szafranska A., Antolak-Dudka A., Baranowski P. et. al. Identification of Mechanical Properties for Titanium Alloy Ti-6Al-4V Produced Using LENS Technology // Materials, 2019. 12(6). doi:10.3390/ma12060886

[2] Carroll, B.E.; Palmer, T.A.; Beese, A.M. Anisotropic tensile behavior of Ti–6Al–4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing. Acta Mater. 2015, 87, 309–320.

[3] Sterling, A.; Shamsaei, N.; Torries, B.; Thompson, S.M. Fatigue Behaviour of Additively Manufactured Ti-6Al-4 v. Procedia Eng. 2015, 133, 576–589.

[4] Zhai, Y.; Galarraga, H.; Lados, D.A. Microstructure Evolution, Tensile Properties, and Fatigue Damage Mechanisms in Ti-6Al-4V Alloys Fabricated by Two Additive Manufacturing Techniques. Procedia Eng. 2015, 114, 658–666.

[5] Технологические и эксплутационные войства титановых сплавов: учебное пособие / А. Г. Илларионов, А. А. Попов.- Екатеринбург : Изд-во Урал. Ун-та. 2014. – 137 с.

[6] Смольянов И. А., Тарасов Ф. Е., Фризен В. Э. Модернизаци индукционного нагревателя для сквозного нагрева титановых заготовок большого диаметра // Труды третьей научно-технической конф. мол. уч. Уральского энергетического инст. (21-24 мая 2018 г., Екатеринбург, Россия). – Екатеринбур: УрФУ, 2018. – С. 217-220

[7] Сарапулов Ф. Н., Смольянов И. А., Тарасов Ф. Е. Проблемы сквозного нагрева титановых заготовок и способы их решения // XVII Международная Конференция «Электромеханика, электротехнологии, Электротехнические Материалы и Компоненты» ТРУДЫ МКЭЭЭ-2018 24 -28 сентября, Крым, Алушта, с.311-314

[8] Liangliang Lu, Shaoming Zhang, Jun Xu, Huijun He, Xinming Zhaou. Numerical study of titanium melting by high frequency inductive heating / International journall of heat and mass transfer. Vol 108 (2017). pp. 2021- 2028.

[9] Sarapulov F. N., Smolyanov I. A., Tarasov F. E. Study of the linear inducton motor with bimetalic secondary element / Acta Technica CSAV, Vol. 63, № 2, 2018. pp. 205-220.

[10] KANG Jun-jie, Cui Yan-jun, Wang Zhi-qiang, et. al. Medium frequency induction furnace temperature control based on BP neural network PID // Proc. Of the IEEE Int. Conf. on Infrmation and Automation Ningbo, China, August 2016, pp. 1110- 1115.

[11] Glebov A., Karpushkin S., Malygin E. Mokrozub V.m Alekhin P. Finite-element analysis of induction heating devices during PID-control stage // 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2018; Albena; Bulgaria; 2-8 July 2018, pp. 397-404.

[12] Sarapulov F., Frizen V., Smolyanov I., Shmakov E. Dynamic study of thermal characteristics of linear induction motors // 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2017 – Proceedings, 2017, pp. 414-418.

[13] Tarchutkin N. V., Shmakov E. I., Smolyanov I. A, Sarapulov F. N. Modeling of thermal operating modes of a linear electrical machine in a strong coupled task // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018, pp. 819-821.

[14] Smolyanov I., Kotlan V., Dolezel I. “Optimal heat induction treatment of titanium alloys” // International Conference on Heating by Electromagnetic Sources, Padua, Italy, May 22-24, 2019 pp.137-142.

Трехмерная численная модель двухстороннего электромагнитного перемешивателя бегущего магнитного поля

Швыдкий Е.
Кафедра электротехники
и электротехнологических систем
Уральский Федеральный университет
Екатеринбург, Россия
e.l.shvydky@urfu.ru

Бааке Э.
Институт электротехнологии
Ганноверский университет им. Лейбница
Ганновер, Германия
baake@etp.uni-hannover.de

***Abstract* — Electromagnetic control of liquid metal flow has a numerous benefits for modern industry. Alternating magnetic field influence on electro conducting liquids leads to their movement and consequently forced convection. That phenomena widely used in wide range of metallurgical applications and one of them is an electromagnetic stirring during the solidification of metal. We consider a case of travelling magnetic field stirrer (TMF) for liquid gallium in a rectangular cell. TMF inductors was used instead of rotating permanent magnets and showed a certain advantages as lack of mechanical vibrations and flexible control of magnetic field parameters. The 3D harmonic electromagnetic (EM) analysis is performed by means of finite element method . The magnetic flux density distribution, induced current density and the Lorentz forces in the melt are analysed. The mesh in liquid metal domain was refined at boundary layers taking into account the skin effect. For hydrodynamic simulation of EM driven liquid metal flow finite volume software Fluent was implemented. EM calculated As a result a velocity field in liquid metal domain is obtained. Comparison of numerical results with experimental data obtained by the Doppler ultrasound velocimetry has a good agreement.**

Ключевые слова — бегущее магнитное поле, электромагнитное перемешивание, метод конечных элементов, метод конечных объемов, электромагнитная индукция, электромагнитные усилия

I. Введение

Современная металлургия задает определенные требования по повышению качества литых заготовок. Измельчение микроструктуры, переход от глобулярной к равноосной кристаллической структуре, отсутствие ликваций и равномерность химического состава по объему, все это способствует улучшению механических свойств и удешевляет процесс производства готовых изделий как из цветных так и черных металлов [1–6]. В настоящее время активно идут исследования процесса кристаллизации во внешних полях [7]. По мимо прочего в вопросе кристаллизации определяющим значением обладает характер и интенсивность конвекции в жидкой фазы слитка. Бегущее магнитное поле один из способов контроля движения жидкого металла и как следствие конвекционных потоков.

Для исследования влияния магнитного поля на перемешивание жидкой фазы слитка в процессе кристаллизации, была построена экспериментальная установка с вращающимися постоянными магнитами [8].

Работа была выполнена при финансовой поддержке стипендией Президента России для обучения за рубежом, а так же постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт №02.A03.21.0006

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

Однако такой способ воздействия обладал эксплуатационными недостатками, такими как вибрация и наличие механических связей. С учетом этих особенностей способ воздействия при помощи бегущего магнитного поля (БМП) поля зарекомендовал себя как перспективный метод [9–11]. Конструкция состоящая из двух индукторов размещенных по бокам емкости позволяет добиваться потоков большей интенсивности и более гибко контролировать режим перемешивания [12, 13].

Исходя из вышесказанного была разработанна и создана установка электромагнитного перемешивания на основе двух индукторов БМП [14]. Авторами были успешно проведено экспериментальное исследование, однако для полного понимания механизмов образования потоков и их зависимость от параметров бегущего магнитного поля необходимо провести дополнительные численные исследования. Целью данной работы является создание численной модели соответствующей экспериментальной установки для проведения исследований электромагнитного перемешивания под воздействием БМП.

II. Численная модель

Исследуемый процесс электромагнитного перемешивания можно разделить на электромагнитную и гидродинамическую часть. Для расчета электромагнитных и гидродинамических полей инструмент численного моделирования является наиболее точным способным учесть все геометрические и физические особенности модели.

A. Электромагнитная часть.

Расчет электромагнитного поля выполнен с помощью метода конечных элементов на основе векторного магнитного потенциала в программной среде Ansys Mechanical APDL.

Геометрия модели представлена на рисунке 1, все размеры полностью соответствует экспериментальной установке описанной в работе [14]. Она состоит из двух индукторов БМП и расположенной между ними объемом жидкого металла. Метал это чистый галлий с электропроводностью 3.7 МСм м. Индуктор состоит из магнитопровода в пазах которого уложено три пары катушек. Эти катушки выполнены из 150 витков изолированного медного провода. Они подключены к источнику трехфазового напряжения и уложены в пазы так, что образуют бегущее магнитное поле с углом сдвига между пазами 60 электрических градусов.

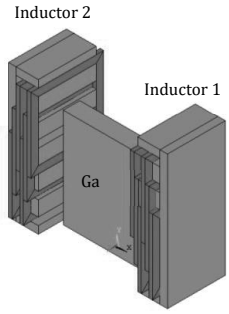


Рис. 1. Геометрия модели

Магнитопровод выполнен из шихтованной электротехнической стали и имеет магнитную проницаемость равную 30. Учет насыщения и более подробное описание численной модели для расчета электромагнитного поля в программной среде Ansys Mechanical APDL изложены в работе [15].

Сетка для электромагнитного анализа показана на рисунке 2. Она построена из гексаэдральных элементов с десятью узлами типа SOLID97. Размер элемента в катушках - 2 мм. Частота питающего тока составляет 100 Гц, поэтому, в области жидкого металла из-за поверхностного эффекта размер элемента сетки был задан измельчен в направлении к индукторам. Общее количество элементов модели составило 752 052.

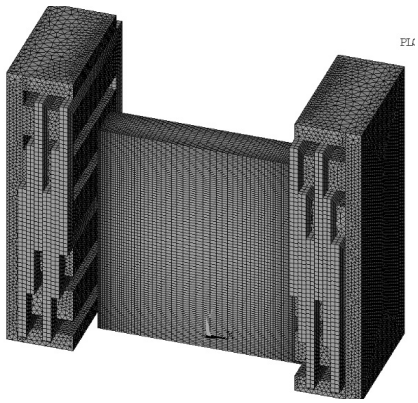


Рис. 2. Сетка конечных элементов для электромагнитного расчета

Результатом расчета электромагнитной задачи является поле электромагнитных усилий в объеме жидкого металла. Далее по средствам “user-defined function“ матрица этих усилий переносится в программный пакет Fluent где производится расчет гидродинамической задачи.

B. Гидродинамическая часть.

Гидродинамические течения описываются уравнениями Навье-Стокса и сохранения энергии. Поток развиваемый под действием электромагнитных усилий развивает значительные скорости, значение числа Рейнольдса достигает 10000 и, следовательно, характер потока является турбулентным или переходом от ламинарного у турбулентному. В этой связи расчет гидродинамических потоков выполнялся с использованием модели турбулентности k-epsilon. Подробнее процедура моделирования гидродинамических течений под воздействием БМП изложена в [16]

III. Результаты

Принцип действия заключается в том, что перченный ток частотой 100 Гц, протекающий в катушках порождает бегущее магнитное поле, которое замыкается по магнитопроводу и жидкому металлу через воздушный зазор. На рисунке 3 изображена магнитная индукция на поверхности расплава в начальной момент времени. Как видно максимальное значение индукции находится на ближайших к индукторам поверхностям и составляет 0.024 Тл.

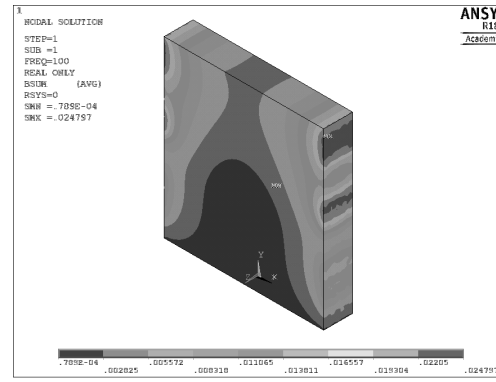


Рис. 3. Магнитная индукция на поверхности объема металла

В электропроводном жидком металле под воздействием переменного магнитного поля наводится электродвижущая сила и протекают вихревые токи, которые изображены на рисунке 4. Индуцированные токи так же сконцентрированы на поверхности металла из-за поверхностного эффекта. В результате взаимодействия этих токов с магнитным полем возникают электромагнитные усилия или так называемые силы Лоренца действующие на жидкий металл и приводящие его в движение. Распределение и направление этих усилий показано на рисунке 5. Как и магнитное поле значительная часть электромагнитных усилий сконцентрирована на ближних к индукторам боковых поверхностям. Ток протекающий в z направлении генерирует усилие направленное в y направлении. В настоящей работе рассматривается случай бегущего магнитного поля направленного вниз и следовательно силы так же направленны вниз.

Далее, как было сказано выше, поле усилий является источником членом в уравнении Навье-Стокса и приводит к движению жидкости. Из-за низкого магнитного числа Рейнольдса пренебрегаем адвекцией магнитного поля движущимся металлом [17]. Физические параметры жидкости взяты из работ [8, 14] и сетка для этого этапа расчета составляет 90 × 84 × 15 элементов.

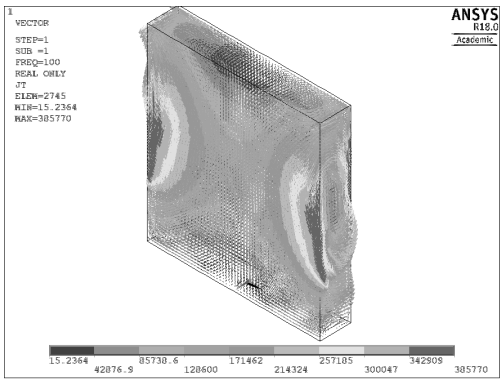


Рис. 4. Индуцированная плотность тока в объеме жидкого металла

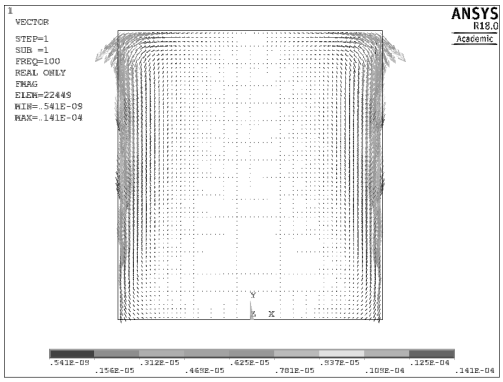


Рис. 5. Силы Лоренца в объеме жидкого металла

На рисунке 6 изображено поле скоростей в объеме жидкого метала. Под воздействием усилий приложенных вниз, поток развиваться возникает в пристеночных областях и достигает здесь максимальное значение скорости — 0.08 м/с. Затем два вихря обедняются на в области центральной оси и вектора скорости направлены “вверх” при этом скорость достигает значения 0.045 м/с.

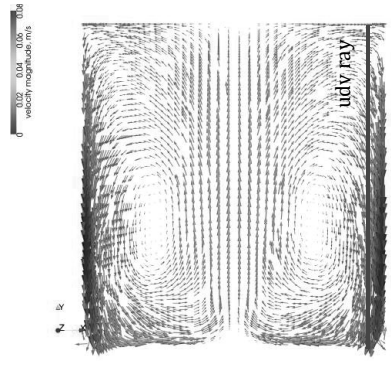


Рис. 6. Поле скоростей жидкого металла под воздействием БМП

Верификация численной модели производится при помощи сравнения профиля скорости с данными полученными с помощью ультразвукового Доплеровского измерения. Измерительный датчик располагался в приставочной области и измерялась одна *y* компонента скорости. результат сравнения представлены на рисунке 7. Исходя из графика можно сделать вывод, что характер течения определяется численной моделью достаточно точно, так же как максимальное значение профиля. Однако некоторые несовпадения присутствуют, данное явление может быть связанно, с тем что датчик расположился близко к стенке емкости и это могло повлиять на снижение скорости до нуля.

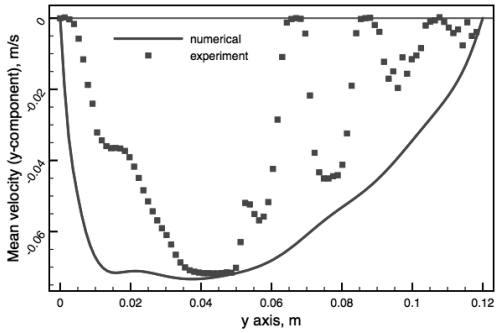


Рис. 7. Сравнение профиля *y*-компоненты скорости с экспериментом

IV. Заключение

Создана трехмерная численная модель связанного решения задач электромагнитного поля и гидродинамических течений. Проведена верификация скорости жидкого металла. Эта модель позволит провести исследования влияния параметров индуктора бегущего магнитного поля на течения жидкого металла. Так же планируется провести численные исследования модулированного питания и кристаллизации [14].

Благодарности

Евгений Швыдкий выражает благодарность канд. техн. наук Диане Кёппен за оказанную помощь для похождения стажировки в Институте электротехнологии Ганноверского университета.

Список литературы

[1] Hachani L., Zaidat K., Fautrelle Y. Experimental study of the solidification of Sn-10 wt.%Pb alloy under different forced convection in benchmark experiment // 2015. Int. J. Heat Mass Transf., vol. 85, -pp. 438–454.

[2] Хрипченко С.Ю., Долгих В.М., Денисов С.А., Колесниченко И.В., Никулин Л.В. Формирование структуры и свойств алюминиевых слитков в условиях магнитогидродинамического воздействия // 2013. Цветные металлы. № 4 (844). -с. 70-73.

[3] Eckert S., Nikrityuk P.A., Willers B., Dirk R. Electromagnetic melt flow control during solidification of metallic alloys, // 2013. Eur. Phys. J. Spec. Top. 220, vol. 137, -pp. 123–137.

[4] Wang, X., Moreau, R., Etay, J. et al. A periodically reversed flow driven by a modulated traveling magnetic field: part I. experiments with GaInSn // 2009. Metall and Materi Trans B 40B, -pp 82-90. https://doi.org/10.1007/s11663-008-9210-2.

[5] Бычков С.А., Батов Н.Г., Сокунов Б.А. Воздействие электромагнитного поля на расплав в процессе кристаллизации // 2010. Вестник Московского энергетического института. № 2. -с. 67-71.

[6] Тимофеев В.Н., Авдулов А.А., Бояков С.А., Авдулова Е.С., Гудков И.С. Электромагнитный модификатор структуры алюминиевого слитка для роторной литейной машины // 2015. Электрометаллургия. № 2. -с. 25-31.

[7] Eskin D.G. Mi J. Solidification processing of metallic alloys under external fields. -Springer International Publishing, 2018.

[8] Dzelme V., Jakovics A., Vencels J., Köppen D., Baake E. Numerical and experimental study of liquid metal stirring by rotating permanent magnets // 2018. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 424, -p. 012047.

[9] Losev G.L., Kolesnichenko I.V., Khalilov R.I. Control of the metal crystallization process by the modulated traveling magnetic field //2018. J. Phys.: Conf. Ser., 1128, -p. 0120512018.

[10] Avnaim M.H., Mikhailovich B., Azulay A., Levy A. Numerical and experimental study of the traveling magnetic field effect on the horizontal solidification in a rectangular cavity part 2: Acting forces ratio and solidification parameters // 2018. Int. J. Heat Fluid Flow, vol. 69, -pp. 9–22.

[11] Dadzis K. Modeling of directional solidification of multicrystalline silicon in a traveling magnetic field, PhD Thesis, 2012.

[12] Швыдкий Е.Л., Бычков С.А., Захаров В.В., Соколов И.В., Тарасов Ф.Е. Исследование распределения примеси в двухстороннем электромагнитном перемешивателе // 2018. Электрометаллургия, №10. -с. 11-17.

[13] Zhang L., Yu J., Wang W., Xiang Z., Wang E. The Effect of Electromagnetic Stirring on the Microstructure Evolution of Cu-15%Co Alloy // 2018. Metals, *8(11)*, -p. 869; doi:10.3390/met8110869.

[14] Musaeva D., Baake E., Köppen A., Vontobel P. Application of neutron radiography for in-situ visualization of gallium solidification in travelling magnetic field // 2017. Magnetohydrodynamics, vol. 53, no. 3, -pp. 583–593.

[15] Shvydkiy E. and I. Kolesnichenko 3D numerical simulation of the linear induction motor, considering magnetic saturation // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018, doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317206.

[16] Максимов А.А., Хацаюк М.Ю., Тимофеев В.Н. Сравнительная оценка результатов численного моделирования гидродинамических процессов в системе “ванна - МГД перемешиватель” // 2018. Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. Т. 11. № 2. -с. 138-147.

[17] Azulay A. et al., Magnetic field advection in a rotating magnetic field driven flow induced by a non- ideal inductor Magnetic field advection in a rotating magnetic field driven flow induced by a non-ideal inductor // 2018. Physics of Fluids 30; doi: 10.1063/1.5030005.

Optimal control theory and its applications

Теория оптимального управления и ее приложения

Об одной задаче оптимального управления колебаниями струны с неразделенными условиями на значения функции прогиба в заданных промежуточных моментах времени

Барсегян В.Р.
Институт механики
НАН Армении,
Ереванский государственный университет,
Ереван, Армения
barseghyan@sci.am

***Abstract* — An optimal control problem for the equation of string oscillations with given initial, final conditions and with non-separated values of deflection at intermediate moments of time with a quality criterion set for the entire time interval is considered. The problem is solved using the methods of separation of variables and the theory of optimal control of finite-dimensional systems with non-separated multipoint intermediate conditions. As an application of the proposed approach, an optimal control action is constructed for a string oscillation with a given value of the deflection of the points of the string at some intermediate moment of time.**

Ключевые слова — колебания струны, оптимальное управление колебаниями, промежуточные значения прогиба, неразделенные многоточечные условия.

I. Введение

Одни из самых распространенных процессов в природе и технике – колебательные, которые моделируются волновым уравнением [1-4]. Многие процессы управления из различных областей науки и техники приводят к необходимости исследования многоточечных краевых задач управления и оптимального управления динамических систем. На практике часто возникают задачи управления и оптимального управления, когда нужно сгенерировать желаемую форму колебания, удовлетворяющую промежуточным условиям. Внимание исследователей привлекли многоточечные краевые задачи управления и оптимального управления, в которых, наряду с классическими краевыми (начальное и конечное) условиями, заданы также неразделенные (нелокальные) многоточечные промежуточные условия [5-15]. Задачи управления и оптимального управления колебательными процессами как внешними, так и граничными управляющими воздействиями при различных типах краевых условий, рассмотрены в работах [1-4, 8-16] и предложены различные методы решения задач управления.

Неразделенные многоточечные краевые задачи, с одной стороны, возникают как математические модели реальных процессов, а с другой стороны – для многих процессов невозможна корректная постановка локальных краевых задач. Неразделенность многоточечных условий обусловлена, в частности, невозможностью на практике мгновенно проводить замеры измеряемых параметров состояния объекта или в отдельно взятых точках. Подобные задачи имеют важную прикладную и теоретическую значимость, что естественным образом влечет необходимость их исследования в различных постановках.

В настоящей работе рассматривается задача оптимального управления для уравнения колебания струны с заданными начальным, конечным условиями и неразделенными значениями прогиба в промежуточных моментах времени с критерием качества, заданным на весь промежуток времени. Задача решается с привлечением метода разделения переменных и теории оптимального управления конечномерными системами с неразделенными многоточечными промежуточными условиями. В качестве приложения предложенного конструктивного подхода построено оптимальное управляющее воздействие для колебания струны с заданным значением прогиба точек струны в некотором промежуточном моменте времени.

II. Постановка задачи

Рассмотрим однородную упругую натянутую струну длиной l, края которой закреплены. В вертикальной плоскости на струну действуют распределенные силы с плотностью $u(x,t)$. Пусть состояние распределенной колебательной системы (малые поперечные колебания струны), т.е. отклонения от состояния равновесия, описываются функцией $Q(x,t)$, $0 \le x \le l$, $0 < t < T$, которая подчиняется при $0 < x < l$ и $0 < t < T$ волновому уравнению

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + u(x,t) \qquad (1)$$

с однородными граничными условиями

$$Q(0,t) = 0, \quad Q(l,t) = 0, \quad 0 \le t \le T, \qquad (2)$$

и удовлетворяет начальным и конечным условиям

$$Q(x,0) = \varphi_0(x), \quad \left.\frac{\partial Q}{\partial t}\right|_{t=0} = \psi_0(x), \quad 0 \le x \le l, \quad (3)$$

$$Q(x,T) = \varphi_T(x) = \varphi_{m+1}(x),$$

$$\left.\frac{\partial Q}{\partial t}\right|_{t=T} = \psi_T(x) = \psi_{m+1}(x), \quad 0 \le x \le l. \quad (4)$$

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

В уравнении (1) $a^2 = \frac{T_0}{\rho}$, где T_0 – натяжение струны, ρ – плотность однородной струны. Функция $Q(x,T)$, удовлетворяющая уравнению (1), дважды непрерывно дифференцируема вплоть до границы области. Пусть в некоторые промежуточные моменты времени $0 = t_0 < t_1 < \ldots < t_m < t_{m+1} = T$ на значения функции прогиба струны заданы неразделенные (нелокальные) условия в виде

$$\sum_{k=1}^{m} f_k Q(x,t_k) = \alpha(x), \qquad (5)$$

где f_k – заданные величины $(k = \overline{1,m})$, $\alpha(x)$ – некоторая известная функция, $\varphi_0(x)$, $\psi_0(x)$, $\varphi_T(x)$, $\psi_T(x)$ и $\alpha(x)$ – заданные гладкие функции, удовлетворяющие условиям согласования. Предполагается, что система (1) при ограничениях (2)-(5) на промежутке времени $[0,T]$ является вполне управляемой [6, 17]. Задача оптимального управления колебаниями струны с заданными неразделенными значениями функции прогиба в промежуточные моменты времени t_k $(k = \overline{1,m})$ можно сформулировать следующим образом: среди возможных управлений $u(x,t)$, $0 \le x \le l$, $0 \le t \le T$, требуется найти оптимальное управляющее воздействие $u^0(x,t)$, переводящее колебания струны (1) с граничными условиями (2) из заданного начального состояния (3) в заданное конечное состояние (4), обеспечивая удовлетворение неразделенных многоточечных промежуточных условиий (5) и минимизирующее функционал

$$J[u] = \left[\int_0^T \int_0^l \left(u(x,t)\right)^2 dx dt \right]^{\frac{1}{2}}. \qquad (6)$$

III. Решение задачи

Для построения решения поставленной задачи решение уравнения (1) с граничными условиями (2) ищем в виде

$$Q(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n(t) \sin \frac{\pi n}{l} x. \qquad (7)$$

Представим функции $u(x,t)$ и $\alpha(x)$ в виде рядов Фурье

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(t) \sin \frac{\pi n}{l} x, \quad \alpha(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \sin \frac{\pi n}{l} x. \qquad (8)$$

Подставим разложения (7), (8) в соотношения (1)-(5). В силу ортогональности системы собственных функций следует, что коэффициенты Фурье $Q_n(t)$ и $u_n(t)$ удовлетворяют счетной системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\ddot{Q}_n(t) + \lambda_n^2 Q_n(t) = u_n(t), \quad \lambda_n^2 = \left(\frac{a\pi n}{l}\right)^2, \quad n = 1, 2, \ldots, \qquad (9)$$

и следующим начальным неразделенным многоточечным промежуточным и конечным условиям:

$$Q_n(0) = \varphi_n^{(0)}, \ \dot{Q}_n(0) = \psi_n^{(0)}, \qquad (10)$$

$$\sum_{k=1}^{m} f_k Q_n(t_k) = \alpha_n, \qquad (11)$$

$$Q_n(T) = \varphi_n^{(T)} = \varphi_n^{(m+1)}, \ \dot{Q}_n(T) = \psi_n^{(T)} = \psi_n^{(m+1)}, \qquad (12)$$

где через $\varphi_n^{(0)}$, $\psi_n^{(0)}$, $\varphi_n^{(m+1)}$, $\psi_n^{(m+1)}$, $u_n(t)$ и α_n – обозначены коэффициенты Фурье, соответствующие функциям $\varphi_0(x)$, $\psi_0(x)$, $\varphi_{m+1}(x)$, $\psi_{m+1}(x)$, $u(x,t)$ и $\alpha(t)$. Общее решение уравнения (9) с начальными условиями (10) имеет вид

$$\begin{aligned} Q_n(t) = {} & \varphi_n^{(0)} \cos \lambda_n t + \frac{1}{\lambda_n} \psi_n^{(0)} \sin \lambda_n t + \\ & + \frac{1}{\lambda_n} \int_0^t u_n(\tau) \sin \lambda_n (t-\tau) d\tau. \end{aligned} \qquad (13)$$

Теперь, учитывая промежуточные неразделенные (11) и конечные (12) условия, используя подходы, приведенные в работах [6, 7], из уравнения (13) получим, что функции $u_n(\tau)$ для каждого n должны удовлетворять следующим интегральным соотношениям:

$$\begin{aligned} & \int_0^T u_n(\tau) h_{1n}(\tau) d\tau = C_{1n}(T), \\ & \int_0^T u_n(\tau) h_{2n}(\tau) d\tau = C_{2n}(T), \\ & \int_0^T u_n(\tau) h_{1n}^{(m)}(\tau) d\tau = C_{1n}^{(m)}(t_1, \ldots, t_m), \end{aligned} \qquad (14)$$

$n = 1, 2, \ldots,$ где приняты следующие обозначения

$$h_{1n}(\tau) = \sin \lambda_n (T-\tau), \ h_{2n}(\tau) = \cos \lambda_n (T-\tau), \ 0 \le \tau \le T,$$

$$h_{1n}^{(m)}(\tau) = \sum_{k=1}^{m} f_k h_{1n}^{(k)}(\tau),$$

$$h_{1n}^{(k)}(\tau) = \begin{cases} \sin \lambda_n (t_k - \tau) & npu \quad 0 \le \tau \le t_k, \\ 0 & npu \quad t_k < \tau \le t_{m+1} = T, \end{cases} \qquad (15)$$

$$C_{1n}(T) = \lambda_n \varphi_n^{(m+1)} - \lambda_n \varphi_n^{(0)} \cos \lambda_n T - \psi_n^{(0)} \sin \lambda_n T,$$

$$C_{2n}(T) = \psi_n^{(m+1)} + \lambda_n \varphi_n^{(0)} \sin \lambda_n T - \psi_n^{(0)} \cos \lambda_n T, \quad (16)$$

$$C_{1n}^{(m)}(t_1,...,t_m) = C_{1n}^{(m)} =$$
$$= \lambda_n \left[\alpha_n - \sum_{k=1}^{m} f_k \left(\varphi_n^{(0)} \cos \lambda_n t_k + \frac{1}{\lambda_n} \psi_n^{(0)} \sin \lambda_n t_k \right) \right].$$

Учитывая разложение (8) и ортогональность системы собственных функций, минимизация функционала (6) равносильна минимизации функционалов

$$\int_0^T u_n^2(\tau)\, d\tau \quad (n = 1, 2, ...). \quad (17)$$

Таким образом, решение поставленной задачи оптимального управления (1)-(6) для каждого $n = 1, 2, ...$ сводится к нахождению такого оптимального управления $u_n^0(t)$, $t \in [0, T]$, которое удовлетворяет интегральным соотношениям (14) и доставляет минимум функционалу (17). Отметим, что условия (14) являются линейной операцией, порожденной функцией $u_n(t)$ на промежутке времени $[0, T]$, а функционал (17) является нормой линейного нормированного пространства. Следовательно, решение полученной задачи оптимального управления (14), (17) целесообразно искать с помощью алгоритма решения проблемы моментов [6, 17]. Следуя [6, 17] и решая конечномерную проблему моментов (14), (17), получим искомое оптимальное управление $u_n^0(t)$. Далее, подставляя оптимальную функцию $u_n^0(t)$ в (13), получим $Q_n^0(t)$ на промежутке времени $t \in [0, T]$. Следовательно, из формулы (7) и (8) получим оптимальную функцию $Q^0(x,t)$ прогиба струны и оптимальное управление $u^0(x,t)$. Таким образом, для оптимального управления будем иметь

$$u^0(x,t) = \begin{cases} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{B_n} \tilde{h}_n^{10}(t) \sin \frac{\pi n}{l} x, & 0 \le t \le t_1, \\ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{B_n} \tilde{h}_n^{20}(t) \sin \frac{\pi n}{l} x, & t_1 < t \le t_2, \\ \quad \dots & \\ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{B_n} \tilde{h}_n^{m0}(t) \sin \frac{\pi n}{l} x, & t_{m-1} < t \le t_m, \\ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{B_n} \tilde{h}_n^{(m+1)0}(t) \sin \frac{\pi n}{l} x, & t_m < t \le t_{m+1} = T, \end{cases}$$

где приняты следующие обозначения:

$$\tilde{h}_n^{10}(t) = \tilde{h}_n^{(m+1)0}(t) + \Delta_n(q_{1n}) \sum_{k=1}^{m} f_k \sin \lambda_n (t_k - t),$$
$$\tilde{h}_n^{20}(t) = \tilde{h}_n^{(m+1)0}(t) + \Delta_n(q_{1n}) \sum_{k=2}^{m} f_k \sin \lambda_n (t_k - t),$$
$$\dots$$
$$\tilde{h}_n^{m0}(t) = \tilde{h}_n^{(m+1)0}(t) + \Delta_n(q_{1n}) f_m \sin \lambda_n (t_m - t),$$
$$\tilde{h}_n^{(m+1)0}(t) = \Delta_n(p_{1n}) h_{1n}(t) + \Delta_n(p_{2n}) h_{2n}(t),$$

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_n^{(1)} & a_n^{(2)} & b_n^{(2)} \\ a_n^{(2)} & b_n^{(1)} & d_n^{(2)} \\ b_n^{(2)} & a_n^{(2)} & a_n^{(1)} \end{vmatrix}, \Delta_n(p_{1n}) = \begin{vmatrix} C_{1n}(T) & a_n^{(2)} & b_n^{(2)} \\ C_{2n}(T) & b_n^{(1)} & d_n^{(2)} \\ C_{1n}^{(m)} & d_n^{(2)} & d_n^{(1)} \end{vmatrix},$$

$$\Delta_n(p_{2n}) = \begin{vmatrix} a_n^{(1)} & C_{1n}(T) & b_n^{(2)} \\ a_n^{(2)} & C_{2n}(T) & d_n^{(2)} \\ b_n^{(2)} & C_{1n}^{(m)} & d_n^{(1)} \end{vmatrix}, \; a_n^{(1)} = \int_0^T \left(h_{1n}(\tau)\right)^2 d\tau,$$

$$\Delta_n(q_{1n}) = \begin{vmatrix} a_n^{(1)} & a_n^{(2)} & C_{1n}(T) \\ a_n^{(2)} & b_n^{(1)} & C_{2n}(T) \\ b_n^{(2)} & d_n^{(2)} & C_{1n}^{(m)} \end{vmatrix}, \; b_n^{(1)} = \int_0^T \left(h_{2n}(\tau)\right)^2 d\tau,$$

$$a_n^{(2)} = \int_0^T h_{1n}(\tau) h_{2n}(\tau) d\tau, \quad (18)$$

$$d_n^{(1)} = \int_0^T \left(h_{1n}^{(m)}(\tau)\right)^2 d\tau = \int_0^T \left(\sum_{k=1}^{m} f_k h_{1n}^{(k)}(\tau) \right)^2 d\tau,$$

$$b_n^{(2)} = \int_0^T h_{1n}(\tau) h_{1n}^{(m)}(\tau) d\tau = \int_0^T h_{1n}(\tau) \left(\sum_{k=1}^{m} f_k h_{1n}^{(k)}(\tau) \right) d\tau,$$

$$d_n^{(2)} = \int_0^T h_{2n}(\tau) h_{1n}^{(m)}(\tau) d\tau = \int_0^T h_{2n}(\tau) \left(\sum_{k=1}^{m} f_k h_{1n}^{(k)}(\tau) \right) d\tau,$$

$$A_n = \Delta_n(p_{1n}) C_{1n}(T) + \Delta_n(p_{2n}) C_{2n}(T) + \Delta_n(q_{1n}) C_{1n}^{(m)},$$

$$B_n = \int_0^T \left(\tilde{h}_n^0(t)\right)^2 dt, \quad (19)$$

$$\tilde{h}_n^0(t) = \Delta_n(p_{1n}) h_{1n}(t) + \Delta_n(p_{2n}) h_{2n}(t) + \Delta_n(q_{1n}) h_{1n}^{(m)}(t)$$

Решение задачи (14), (17) построено в предположении, что $\Delta_n \neq 0$. Из выражения для $u^0(x,t)$ видно, что оптимальное управляющее воздействие является кусочно-непрерывной функцией. Для иллюстрации полученных результатов предположим, что $m = 1$ (т.е. $0 < t_1 < t_2 = T$) и $f_1 = 1$, в этом случае условие (5) принимает вид $Q(x, t_1) = \alpha(x)$, тогда из выражения (18), с учетом обозначений (15), будем иметь

$$a_n^{(1)} = \frac{T}{2} - \frac{1}{4\lambda_n} \sin 2\lambda_n T, \; b_n^{(1)} = \frac{T}{2} + \frac{1}{4\lambda_n} \sin 2\lambda_n T,$$

$$a_n^{(2)} = \frac{\sin^2 \lambda_n T}{2\lambda_n}, \; d_n^{(1)} = \frac{1}{4\lambda_n} \left(2\lambda_n t_1 - \sin 2\lambda_n t_1\right),$$

$$d_n^{(2)} = \frac{1}{2\lambda_n} \left(\sin \lambda_n T \sin \lambda_n t_1 - \lambda_n t_1 \sin \lambda_n (T - t_1)\right).$$

$$b_n^{(2)} = \frac{1}{2} t_1 \cos \lambda_n (T - t_1) - \frac{\cos \lambda_n T}{2\lambda_n} \sin \lambda_n t_1,$$

Полагая, что $t_1 = \frac{l}{a}$, $T = 4\frac{l}{a}$, получим, что $t_1 \lambda_n = \pi n$, $T\lambda_n = 4\pi n$, $\lambda_n (T - t_1) = 3\pi n$. Следовательно, из вышеприведенных выражений и формулы (16) получим

$$a_n^{(1)} = b_n^{(1)} = \frac{2l}{a},\ a_n^{(2)} = d_n^{(2)} = 0,\ b_n^{(2)} = \frac{(-1)^n l}{2a},$$

$$d_n^{(1)} = \frac{l}{2a},\ C_{1n}(T) = \lambda_n\left(\varphi_n^{(2)} - \varphi_n^{(0)}\right),$$

$$C_{2n}(T) = \psi_n^{(2)} - \psi_n^{(0)},\ C_{1n}^{(m)} = \lambda_n\left(\alpha_n - (-1)^n \varphi_n^{(0)}\right).$$

Для определителей Δ_n, $\Delta_n(p_{1n})$, $\Delta_n(p_{2n})$, $\Delta_n(q_{1n})$ будем иметь следующие значения

$$\Delta_n = \frac{3}{2}\left(\frac{l}{a}\right)^3,\ \Delta_n(p_{1n}) = \left(\frac{l}{a}\right)^2 \lambda_n\left[\varphi_n^{(2)} - (-1)^n \alpha_n\right],$$

$$\Delta_n(p_{2n}) = \left(\frac{l}{a}\right)^2 \left(\psi_n^{(2)} - \psi_n^{(0)}\right)\left[1 - \frac{(-1)^n}{4}\right],$$

$$\Delta_n(q_{1n}) = \left(\frac{l}{a}\right)^2 \lambda_n\left[4\alpha_n - (-1)^n\left(3\varphi_n^{(0)} + \varphi_n^{(2)}\right)\right].$$

Имея эти значения, согласно формуле (19), вычисляя значения величин A_n и B_n, будем иметь

$$A_n = \Delta_n(p_{1n})C_{1n}(T) + \Delta_n(p_{2n})C_{2n}(T) + \Delta_n(q_{1n})C_{1n}^{(m)} =$$

$$= \left(\frac{l}{a}\right)^2 \left\{\lambda_n^2\left[4\alpha_n^2 + \varphi_n^{(2)}\left(\varphi_n^{(2)} - \varphi_n^{(0)}\right) + \left(3\varphi_n^{(0)} + \varphi_n^{(2)}\right)\times\right.\right.$$

$$\left.\left.\times\left(\varphi_n^{(0)} - 2(-1)^n \alpha_n\right)\right] + \left[1 - \frac{(-1)^n}{4}\right]\left(\psi_n^{(2)} - \psi_n^{(0)}\right)^2\right\},$$

$$B_n = \int_0^T \left(\tilde{h}_n^0(t)\right)^2 dt = \left(\frac{l}{a}\right)\left[2\Delta_n^2(p_{1n}) + 2\Delta_n^2(p_{2n}) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2}\Delta_n^2(q_{1n}) + (-1)^n \Delta_n(p_{1n})\Delta_n(q_{1n})\right].$$

Получим явные выражения функции оптимального управления $u^0(x,t)$ в следующем виде: при $0 \le t \le \frac{l}{a}$

$$u^0(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{B_n}\{\Delta_n(p_{1n})\sin\lambda_n(T-t) +$$

$$+\Delta_n(p_{2n})\cos\lambda_n(T-t) + \Delta_n(q_{1n})\sin\lambda_n(t_1 - t)\}\sin\frac{\pi n}{l}x;$$

при $\frac{l}{a} < t \le 4\frac{l}{a}$

$$u^0(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{B_n}\left[\Delta_n(p_{1n})\sin\lambda_n(T-t) + \right.$$

$$\left. +\Delta_n(p_{2n})\cos\lambda_n(T-t)\right]\sin\frac{\pi n}{l}x.$$

Таким образом, имея явные выражения функций оптимального управления, с помощью вышеприведенных формул можно также найти соответствующее выражение функции прогиба струны.

IV. Заключение

Решена задача оптимального управления колебаниями струны с заданными неразделенными значениями функции прогиба в промежуточные моменты времени с критерием качества, заданным на весь промежуток времени. Используется метод разделения переменных и теория оптимального управления конечномерными системами с многоточечными промежуточными условиями. В качестве приложения построено оптимальное управление колебаниями струны с заданным значением прогиба точек струны в некотором промежуточном моменте времени.

Список литературы

[1] Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1975. – 586 с.

[2] Сиразетдинов Т.К. Оптимизация систем с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1977. – 480 с.

[3] Дегтярев Г.Л., Сиразетдинов Т.К. Теоретические основы оптимального управления упругими космическими аппаратами. – М.: Наука, 1986. – 216 с.

[4] Знаменская Л.Н. Управление упругими колебаниями. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 176 с.

[5] Ащепков Л.Т. Оптимальное управление системой с промежуточными условиями // ПММ, 1981. Т. 45. Вып. 2. – С. 215–222.

[6] Барсегян В.Р. Управление составных динамических систем и систем с многоточечными промежуточными условиями. М.: Наука, 2016. – 230 с.

[7] Барсегян В.Р., Барсегян Т.В. Об одном подходе к решению задач управления динамических систем с неразделенными многоточечными промежуточными условиями // Автоматика и телемеханика, 2015. № 4. – С. 3-15.

[8] Барсегян В.Р., Саакян М.А. Оптимальное управление колебаниями струны с заданными состояниями в промежуточные моменты времении // Известия НАН РА. Механика, 2008. Т. 61. № 2. – С. 52–60.

[9] Барсегян В.Р. Об оптимальном управлении колебаниями мембраны при фиксированных промежуточных состояниях // Уч. записки ЕГУ, 1998. № 1(188). – С. 24–29.

[10] Barseghyan V.R. and Movsisyan L.A. Optimal control of the vibration of elastic systems described by the wave equation // International Applid Mechanics, 2012. Vol. 48. № 2, – P. 234–239.

[11] Корзюк В.И., Козловская И.С., Двухточечная граничная задача для уравнения колебания струны с заданной скоростью в некоторый момент времени. I // Труды Ин-та мат. НАН Беларуси, 2010. Т. 18. № 2. – С. 22–35.

[12] Корзюк В.И., Козловская И.С. Двухточечная граничная задача для уравнения колебания струны с заданной скоростью в некоторый момент времени. II // Труды Ин-та мат. НАН Беларуси, 2011. Т. 19. № 1. – С. 62–70.

[13] Макаров А. А., Левкин Д. А. Многоточечная краевая задача для псевдодифференциальных уравнений в полислое // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Математика, прикладна математика і механіка, 2014. № 1120. Вып. 69. – С. 64–74.

[14] Асанова А.Т., Иманчиев А.Е. О разрешимости нелокальной краевой задачи для нагруженных гиперболических уравнений с многоточечными условиями // Вестник Карагандинского университета. Серия: Математика, 2016. № 1(81). – С. 15–20.

[15] Бакирова Э.А., Кадирбаева Ж.М. О разрешимости линейной многоточечной краевой задачи для нагруженных дифференциальных уравнений // Изв. НАН РК. Сер. физ.-мат., 2016. № 5. – С. 168–175.

[16] Ильин В.А., Моисеев Е.И. Оптимизация граничных управлений колебаниями струны // Успехи математических наук, 2005. Т. 60. Вып. 6 (366). – С. 89-114.

[17] Красовский Н.Н. Теория управления движением. – М.: Наука, 1968. – 476 с.

О применении сингулярных интегральных уравнений к исследованию задач автоматического управления

Бойков И.В.
Кафедра «Высшая и прикладная математика»
Пензенский государственный университет
Пенза, Россия
i.v.boykov@gmail.com

Айкашев П
Кафедра «Высшая и прикладная математика»
Пензенский государственный университет
Пенза, Россия
aikashev.pavel@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the modeling of some problems arising in the analysis and synthesis of automatic control systems by methods of singular integral equations. The problems of determining the impulse response functions of dynamic systems in the presence of noise, problems of optimal extrapolation and filtering of the signals, which lead to the Wiener – Hopf equations of the first kind, are considered. The study of multidimensional automatic control systems leads to the Riemann boundary value problem in n-dimensional domains. Approximate methods for solving singular and bisingular integral equations arising in the study of automatic control problems are proposed and substantiated. Numerical example is given.

Ключевые слова — автоматическое управление, уравнение Винера – Хопфа первого рода, краевая задача Римана, сингулярные интегральные уравнения, полисингулярные интегральные уравнения.

I. Введение

Статья посвящена применению сингулярных интегральных уравнений для анализа и синтеза систем автоматического управления. При синтезе систем автоматического управления имеется несколько постановок задач, приводящих к одномерным уравнениям Винера-Хопфа первого рода [1], [2], [3], которые, в общем случае, являются некорректными задачами. Изучение многомерных систем автоматического управления приводит к необходимости построения численных методов решения краевой задачи Римана в n -мерных областях.

В статье предложены методы сведения задач автоматического управления к сингулярным и бисингулярным интегральным уравнениям. Предложены и обоснованы приближенные методы решения сингулярных и бисингулярных интегральных уравнений, возникающих при исследовании задач автоматического управления. Приведен численный пример.

II. Одномерные задачи

Построим приближенный метод определения импульсной переходной функции (ИПФ) $g(t)$ изолированной устойчивой линейной системы с постоянными параметрами при условии, что известны входной $x(t)$ и выходной $y(t)$ сигналы, которые являются стационарными случайными эргодическими функциями времени. Из условий физической реализуемость системы следует, что $g(t) \geq 0$ при $t \geq 0$ и $g(t) = 0$ при $t < 0$.

В этом случае входной и выходной сигналы связаны уравнением [2]

$$\int_0^\infty x(t-\tau)g(\tau)d\tau + n(t) = f(t), t \in (0,\infty) \qquad (1)$$

где неизвестная шумовая функция $n(t)$, как правило, не связана с входным сигналом $x(t)$.

Отметим, что к уравнению (1) приводят задачи синтеза систем автоматического управления [1], а также задачи обработки сигналов.

Для фильтрации неизвестной шумовой функции n(t) осуществляется [1], [3] переход к уравнению Винера - Хопфа

$$R_{yx}(u) = \int_0^\infty R_{xx}(u-\tau)g(\tau)d\tau, u \in (0,\infty), \qquad (2)$$

где R_{xx} и R_{yx} соответственно авто и взаимно-корреляционные функции

$$R_{xx}(u) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} x(t)x(t-u)dt, \qquad (3)$$

$$R_{yx}(u) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} y(t)x(t-u)dt. \qquad (4)$$

В ряде работ (см., например, [3]), ИПФ $g(t)$ определяется по формуле

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(i\omega)e^{-i\omega t}d\omega, \Phi(i\omega) = S_{yx}(i\omega) / S_{xx}(i\omega),$$

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

где $S_{yx}(i\omega), S_{xx}(i\omega)-$ преобразования Фурье функций $R_{yx}(u), R_{xx}(u).$

Так как решение уравнения (2) является некорректной задачей [4], то определение ИПФ по формуле (2) не всегда дает нужный результат и возникает необходимость в разработке методов регуляризации.

В [4] построен метод регуляризации, основанный на введении регуляризующих множителей. Однако его использование требует наличия информации о нулях функции $S_{xx}(i\omega)$ и о поведении функций $S_{xx}(i\omega)$ и $S_{yx}(i\omega)$ на бесконечности.

Отметим, что интегралы (3), (4) вычисляются стандартными методами вычислительной математики [5].

Рассмотрим несколько других методов регуляризации решения задачи идентификации импульсной переходной функции, реализация которых не требует этой информации.

В качестве первого воспользуемся непрерывным методом решения операторных уравнений [6], который хорошо себя зарекомендовал при решении нелинейных гиперсингулярных интегральных уравнений [7] и при решении обратных задач гравиразведки [8], которые также являются некорректными задачами.

Будем искать приближенное решение уравнения (2) в виде

$$g_n(t) = \sum_{k=1}^{n} \alpha_k \psi_k(t), \qquad (5)$$

где $\psi_k(t)-$ фундаментальные функции по системе узлов $t_k,\ k = 1,2,\ldots,n.$

В качестве узлов $t_k,\ k = 1,2,\ldots,n$, можно взять узлы полиномов Лагерра, ортогональных на интервале $[0,\infty)$ с весом e^{-t}.

Более предпочтительной является система узлов $t_k = tg((k-1)\pi/(2n+1)),\quad k = 1,\ldots,n,$ т.к. фундаментальные полиномы по этой системе узлов имеют простой вид

$$\psi_k(t) = \frac{2}{2n+1}\left(\frac{1}{2} + \sum_{l=1}^{n}(c_l(t)c_l(t_k) + s_l(t)s_l(t_k))\right),$$
$$c_l(t) = \cos\left(2larctgt\right),\ \ s_l(t) = \sin\left(2larctgt\right).$$

Уравнение (2) аппроксимируется системой линейных алгебраических уравнений

$$\sum_{l=1}^{n} h_l R_{xx}(t_k - t_l)\alpha_l = R_{yx}(t_k), k = 1,2,\ldots,n, \qquad (6)$$

полученной методом механических квадратур.

Здесь $h_l,\ l = 1,2,\ldots,n$ – веса квадратурной формулы.

Системе алгебраических уравнения (6) ставится [6] в соответствие система дифференциальных уравнений

$$\frac{d\alpha_k(v)}{dv} = \beta_k\left(\sum_{l=1}^{n} h_l R_{xx}(t_k - t_l)\alpha_l(v) - R_{yx}(t_k)\right), \qquad (7)$$

$k = 1,2,\ldots,n,$

где параметр $\beta_k = \pm 1$. Значения $\beta_k,\quad k = 1,2,\ldots,n,$ подбираются так, чтобы логарифмическая норма матрицы $A = \{a_{kl}\},\ a_{kl} = \beta_k h_l R_{xx}(t_k - t_l),\ k,l = 1,2,\ldots,n,$ была отрицательной, $\Lambda(A) \le -\chi,\ \chi > 0.$

В этом случае решение системы дифференциальных уравнений (7) при любом начальном значении устойчиво сходится к решению системы уравнений (7).

Напомним, следуя [9], определение логарифмической нормы.

Пусть $X-$ банахово пространство; K – оператор, действующий из X в X; $B(a,r) = \{x, a \in X : \| x - a \| \le r\}$; $S(a,r) = \{x, a \in X : \| x - a \| = r\}$; $\Lambda(K)-$ логарифмическая норма линейного оператора K, определяемая [9] выражением $\Lambda(K) = \lim_{h\downarrow 0}(\| I + hK \| - 1)/h,$ где символ $h \downarrow 0$ означает, что h стремится к нулю, убывая.

Для матриц в часто используемых пространствах логарифмические нормы известны.

Пусть дана вещественная матрица $A = \{a_{ij}\}$, $i,j = 1,2,\ldots,n,$ в n -мерном пространстве R_n векторов $x = (x_1,\ldots,x_n)$ с нормой

$$\| x \|_1 = \sum_{k=1}^{n} | x_k |, \| x \|_2 = [\sum_{k=1}^{n} | x_k |^2]^{1/2}, \| x \|_3 = \max_{1\le k\le n} | x_k |.$$

Логарифмическая норма матрицы A равна [10]:

$$\Lambda_1(A) = \max_j(a_{jj} + \sum_{i=1, i\ne j}^{n} | a_{ij} |), \quad \Lambda_2(A) = \lambda_{\max}\left(\frac{A + A^T}{2}\right),$$
$$\Lambda_3(A) = \max_i(a_{ii} + \sum_{j=1, j\ne i}^{n} | a_{ij} |).$$

Здесь $\lambda_{\max}((A + A^T)/2)$ – наибольшее собственное значение матрицы $(A + A^T)/2.$

Для решения системы уравнений (7) может быть использован любой численный метод.

Замечание. В Приложении приведены результаты решения модельного примера.

В качестве второго метода рассмотрим переход от уравнения Винера - Хопфа к сингулярному интегральному уравнению.

Введем обозначения

$$g^+(t)=\begin{cases} g(t), & t\ge 0,\\ 0, & t<0; \end{cases} \quad g^-(t)=\begin{cases} 0, & t\ge 0,\\ g(t), & t<0; \end{cases}$$

$$R_{yx}^+(t)=\begin{cases} R_{yx}(t), & t\ge 0,\\ 0, & t<0; \end{cases}$$

и перепишем уравнение (2) в виде

$$R_{yx}^+(u)=\int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(u-\tau)g^+(\tau)d\tau, u\in(0,\infty). \qquad (8)$$

Следуя [11], доопределим уравнение (8) на отрицательной полуоси, введя новую неизвестную одностороннюю функцию $g^-(t)$. В результате получаем уравнение

$$\int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(u-\tau)g^+(\tau)d\tau = R_{yx}^+(u)+g^-(u), -\infty<u<\infty. \qquad (9)$$

Применяя к (9) преобразование Фурье, имеем

$$F_{xx}(\omega)G^+(\omega)=F_{yx}^+(\omega)+G^-(\omega), -\infty<\omega<\infty, \quad (10)$$

где $F_{xx}(\omega), G^+(\omega), F_{yx}^+(\omega), G^-(\omega)$ – преобразование Фурье функций $R_{xx}(u)$, $g^+(u)$, $R_{yx}^+(u)$, $g^-(u)$, соответственно.

Воспользовавшись формулами Сохоцкого-Племеля [11], приводим уравнение (10) к сингулярному интегральному уравнению

$$(F_{xx}(\omega)+1)\frac{1}{2}\varphi(\omega)+\frac{1}{2}(F_{xx}(\omega)-1)\frac{1}{\pi i}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\varphi(\tau)}{\tau-\omega}d\tau = F_{yx}^+(\omega), \qquad (11)$$

где функции $\varphi(\omega)$ и $G(\omega)$ связаны интегралом Коши

$$G(z)=\frac{1}{2\pi i}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\varphi(\tau)}{\tau-z}d\tau, \varphi(\pm\infty)=0.$$

Таким образом, задача свелась к решению сингулярного интегрального уравнения (11) при дополнительном условии $\varphi(\pm\infty)=0$.

Известно, что решение сингулярных интегральных уравнений в аналитическом виде возможно лишь в исключительных случаях [12]. В связи с этим для решения уравнения (11) привлекаются численные методы. Подробное изложение приближенных методов решения сингулярных интегральных уравнений дано в монографии [13]. Приближенные методы вычисления сингулярных интегралов исследованы в книге [14].

В случае, если $F_{xx}(\omega)\ne 0$ при $-\infty<\omega<\infty$, уравнение (11) является сингулярным интегральным уравнением нормального (не иключительного) типа и к нему применимы стандартные приближенные методы [13].

В случае, если функция $F_{xx}(\omega)$ может обращаться в нуль в отдельных точках (или на других множествах), то для приближенного решения уравнения (11) более рациональным является применение непрерывного метода решения операторных уравнений.

Опишем применение непрерывного метода решения операторных уравнений к уравнениям вида (11). Для простоты представления метода рассмотрим уравнение вида

$$a(t)x(t)+\frac{b(t)}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{x(\tau)}{\tau-t}d\tau=f(t), -\infty<t<\infty. \quad (12)$$

Приближенное решение уравнения (12) будем искать в виде функции

$$x_n(t)=\sum_{k=-n}^{n}\alpha_k\psi_k(t),$$

где $\psi_k(t)=\frac{2}{2n+1}\left(\frac{1}{2}+\sum_{l=1}^{n}(c_l(t)c_l(v_k)+s_l(t)s_l(v_k))\right)$,

$$c_l(t)=\cos\left(2larctgt\right),\ \ s_l(t)=\sin\left(2larctgt\right),$$

$$v_k=tg(k\pi/(2n+1)),\ \ k=\overline{-n,n}.$$

Коэффициенты α_k, $k=\overline{-n,n}$, находятся из системы алгебраических уравнений, полученных методом коллокации

$$a(v_k)\alpha_k+\frac{2b(v_k)}{2n+1}\sum_{l=-n}^{n}\alpha_l\sum_{j=-n}^{n}(-s_j(v_k)c_j(v_l)+ +(c_j(v_k)+(-1)^{j+1})s_j(v_l))=f(v_k),\ k=\overline{-n,n}. \qquad (13)$$

Здесь использованы следующие формулы для преобразования Гильберта [15]:

$$\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{s_n(\tau)}{\tau-t}d\tau=c_n(t)+(-1)^{n+1}, n=0,1,\ldots,$$

$$\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{c_n(\tau)}{\tau-t}d\tau=-s_n(t), n=0,1,\ldots.$$

Можно показать, используя общую теорию приближенных методов анализа [16], что если функции $a(t)$, $b(t)$, $f(t)$ достаточно гладкие, и $a^2(t)\ne b^2(t)$, $t\in(-\infty,\infty)$, то система уравнений (13) стремится к

решению $x^*(t)$ уравнения (12) в метрике пространства $L_2(-\infty,\infty)$ и в метрике пространства функций Гельдера. (Предполагается однозначная разрешимость уравнения (12) в соответствующих пространствах.)

В случае, если функция $a^2(t)-b^2(t)$ может обращаться в нуль на некоторых множествах точек из интервала $(-\infty,\infty)$, то общая теория приближенных методов не применима.

Поэтому для обоснования разрешимости системы уравнений (13) и получения решения нужно применить непрерывный метод решения операторных уравнений.

Поставим системе уравнений (13) в соответствие систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}&\frac{d\alpha_k(u)}{du}=\beta_k(a(v_k)\alpha_k(u)+\\&+\frac{2b(v_k)}{2n+1}\sum_{l=-n}^{n}\alpha_l(u)\sum_{j=1}^{n}(-s_j(v_k)c_j(v_l)+\\&+(c_j(v_k)+(-1)^{j+1})s_j(v_l))-f(v_k)),\end{aligned}\qquad(14)$$

$k=-n,...,-1,0,1,...,n.$

Система дифференциальных уравнений (14) решается любым численным методом. Наиболее простым в данном случае является метод Эйлера.

Здесь $\beta_k=\pm1, k=\overline{-n,n}$, и выбирается таким образом, чтобы логарифмическая норма матрицы правой части системы (14) была отрицательна.

В этом случае решение системы (14) сходится при $u\to\infty$ к решению системы (13).

После определения функции $\varphi(t)$, находим функцию $G^+(t)$ по формулам Сохоцкого – Племеля

$$G^+(t)=\frac{1}{2}\varphi(t)+\frac{1}{2\pi i}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\varphi(\tau)}{\tau-t}d\tau$$

и затем функцию $g^+(t)$ обратным преобразованием Фурье.

Замечание. Выше было представлено два метода определения ИПФ. Так как непрерывный метод решения операторных уравнений обладает большей устойчивостью и областью сходимости при решении интегральных уравнений с сингулярностями, то метод сингулярных интегральных уравнений определения ИПФ имеет более широкую область применения нежели метод уравнений Винера - Хопфа, хотя в вычислительном отношении он более сложен.

III. Многомерный случай

Для простоты обозначений будем рассматривать двумерный случай. При этом все рассуждения дословно переносятся на случай любой конечной размерности.

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned}R_2^{++}&=\{(x_1,x_2):(0\le x_1<\infty)\bigcap(0\le x_2<\infty)\},\\R_2^{+-}&=\{(x_1,x_2):(0\le x_1<\infty)\bigcap(-\infty\le x_2<0)\},\\R_2^{-+}&=\{(x_1,x_2):(-\infty<x_1<0)\bigcap(0\le x_2<\infty)\},\\R_2^{--}&=\{(x_1,x_2):(-\infty<x_1<0)\bigcap(-\infty<x_2<0)\}.\end{aligned}$$

Рассмотрим уравнение

$$\frac{1}{2\pi}\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}h(t_1-\tau_1,t_2-\tau_2)x(\tau_1,\tau_2)d\tau_1d\tau_2=f(t_1,t_2),\qquad(15)$$

$(t_1,t_2)\in R_2^{++}$

где $x(t_1,t_2)$ и $f(t_1,t_2)-$ входной и выходной сигналы, $h(t_1,t_2)-$ искомая аппаратная функция.

На функции $x(t_1,t_2),f(t_1,t_2),h(t_1,t_2)$ налагаются следующие условия: функции $x(t_1,t_2),f(t_1,t_2)$ определены в области R_2^{++}, функция $h(t_1,t_2)=0$, если $(t_1<0)\bigcup(t_2<0)$.

Введем обозначения:

$$\begin{aligned}h^{++}(t_1,t_2)&=\begin{cases}h(t_1,t_2), & (t_1,t_2)\in R_2^{++},\\0, & (t_1,t_2)\in R_2\setminus R_2^{++},\end{cases}\\h^{+-}(t_1,t_2)&=\begin{cases}h(t_1,t_2), & (t_1,t_2)\in R_2^{+-},\\0, & (t_1,t_2)\in R_2\setminus R_2^{+-},\end{cases}\\h^{-+}(t_1,t_2)&=\begin{cases}h(t_1,t_2), & (t_1,t_2)\in R_2^{-+},\\0, & (t_1,t_2)\in R_2\setminus R_2^{-+},\end{cases}\\h^{--}(t_1,t_2)&=\begin{cases}h(t_1,t_2), & (t_1,t_2)\in R_2^{--},\\0, & (t_1,t_2)\in R_2\setminus R_2^{--}.\end{cases}\end{aligned}$$

Включив в уравнение (15) новые неизвестные функции $h^{\pm\mp}(t_1,t_2),h^{--}(t_1,t_2)$, приходим к уравнению

$$\begin{aligned}&\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}h^{++}(t_1-\tau_1,t_2-\tau_2)x(\tau_1,\tau_2)d\tau_1d\tau_2+\\&+h^{+-}(t_1,t_2)+h^{-+}(t_1,t_2)+h^{--}(t_1,t_2)=f_1(t_1,t_2),\end{aligned}\qquad(16)$$

$(t_1,t_2)\in R_2.$

Здесь через $f_1(t_1,t_2)$ обозначено продолжение нулем функции $f(t_1,t_2)$ на $R_2\setminus R_2^{++}$.

Обозначим через $H^{\pm\pm}(z_1,z_2)$, $X(z_1,z_2)$, $F_1(z_1,z_2)$ преобразование Фурье функций $h^{\pm\pm}(t_1,t_2)$, $x(t_1,t_2)$, $f_1(t_1,t_2)$.

Так как функции $h^{\pm\pm}(t_1,t_2)$ отличны от нуля только в соответствующем квадрате, то функции $H^{\pm\pm}(z_1,z_2)$ являются аналитическими в областях $D^{\pm\pm}$.

Обозначим через $H^{\pm\pm}(\omega_1,\omega_2), X(\omega_1,\omega_2), F_1(\omega_1,\omega_2)$ предельные значения функций $H^{\pm\pm}(z_1,z_2)$, $X(z_1,z_2)$, $F_1(z_1,z_2)$.

Применяя к уравнению (16) преобразование Фурье, имеем

$$X(\omega_1,\omega_2)H^{++}(\omega_1,\omega_2)+H^{+-}(\omega_1,\omega_2)+ \\ +H^{-+}(\omega_1,\omega_2)+H^{--}(\omega_1,\omega_2)=F_1(\omega_1,\omega_2). \quad (17)$$

Известны [13] приближенные методы решения краевой задачи Римана (17). Однако, их реализация в общем случае затруднительна. Поэтому естественно перейти к бисингулярным интегральным уравнениям.

Известен [17] следующий двумерный аналог формул Сохоцкого – Племеля.

Введем обозначения

$$S_1\varphi=\frac{1}{2\pi i}\int\limits_{-\infty}^{\infty}\frac{\varphi(\tau_1,t_2)}{\tau_1-t_1}d\tau_1,$$
$$S_2\varphi=\frac{1}{2\pi i}\int\limits_{-\infty}^{\infty}\frac{\varphi(t_1,\tau_2)}{\tau_2-t_2}d\tau_2,$$
$$S_{12}\varphi=\frac{1}{(2\pi i)^2}\int\limits_{-\infty-\infty}^{\infty\infty}\frac{\varphi(\tau_1,\tau_2)}{(\tau_1-t_1)(\tau_2-t_2)}d\tau_1d\tau_2.$$

При ряде дополнительных условий, накладываемых на функцию $\varphi(t_1,t_2)$ в окрестности бесконечно удаленных точек, справедливы следующие двумерные аналоги формул Сохоцкого–Племеля:

$$H^{++}=\frac{1}{4}(\varphi+S_1\varphi+S_2\varphi+S_{12}\varphi),$$
$$H^{+-}=\frac{1}{4}(\varphi-S_1\varphi-S_2\varphi+S_{12}\varphi),$$
$$H^{-+}=\frac{1}{4}(-\varphi-S_1\varphi+S_2\varphi+S_{12}\varphi),$$
$$H^{--}=\frac{1}{4}(-\varphi+S_1\varphi-S_2\varphi+S_{12}\varphi).$$

Здесь

$$H(z_1,z_2)=\frac{1}{(2\pi i)^2}\int\limits_{-\infty-\infty}^{\infty\infty}\frac{\varphi(\tau_1,\tau_2)d\tau_1d\tau_2}{(\tau_1-z_1)(\tau_2-z_2)}.$$

Воспользовавшись формулами Сохоцкого – Племеля, представим краевую задачу Римана (17) в виде бисингулярного интегрального уравнения

$$\big(X(t_1,t_2)-1\big)\varphi(t_1,t_2)+\big(X(t_1,t_2)-1\big)\frac{1}{2\pi i}\int\limits_{-\infty}^{\infty}\frac{\varphi(\tau_1,t_2)}{\tau_1-t_1}d\tau_1+ \\ +\big(X(t_1,t_2)-1\big)\frac{1}{2\pi i}\int\limits_{-\infty}^{\infty}\frac{\varphi(t_1,\tau_2)}{\tau_2-t_2}d\tau_2+ \\ +\big(X(t_1,t_2)+3\big)\frac{1}{(2\pi i)^2}\int\limits_{-\infty-\infty}^{\infty\infty}\frac{\varphi(\tau_1,\tau_2)}{(\tau_1-t_1)(\tau_2-t_2)}d\tau_1d\tau_2= \\ =4f(t_1,t_2). \quad (18)$$

Для простоты обозначений ограничимся рассмотрением уравнения

$$a(t_1,t_2)\varphi(t_1,t_2)+\frac{c(t_1,t_2)}{4\pi^2}\int\limits_{-\infty-\infty}^{\infty\infty}\frac{\varphi(\tau_1,\tau_2)d\tau_1d\tau_2}{(\tau_1-t_1)(\tau_2-t_2)}= \\ =f_1(t_1,t_2), \quad (19)$$

где $a(t_1,t_2)$, $c(t_1,t_2)$, $f_1(t_1,t_2)$ – гладкие функции вещественных переменных t_1,t_2.

Замечание. Подробная запись вычислительной схемы для уравнения (18) достаточно громоздкая.

Приближенное решение уравнения (19) будем искать в виде функции

$$x_{nn}(t_1,t_2)=\sum_{k=-n}^{n}\sum_{l=-n}^{n}\alpha_{kl}\psi_k(t_1)\psi_l(t_2),$$

где $\psi_k(t)=\frac{2}{2n+1}\left(\frac{1}{2}+\sum_{l=1}^{n}(c_l(t)c_l(v_k)+s_l(t)s_l(v_k))\right)$,

$c_l(t)=\cos\left(2larctgt\right)$, $s_l(t)=\sin\left(2larctgt\right)$,

$v_k=tg\frac{k\pi}{2n+1}$, $k=\overline{-n,n}$.

Воспользовавшись этими формулами, построим вычислительную схему метода коллокации для бисингулярного уравнения (19):

$$a(v_k,v_l)\alpha_{kl}+\frac{c(v_k,v_l)}{(2n+1)^2}\sum_{j_1=-n}^{n}\sum_{j_2=-n}^{n}\sum_{q_1=1}^{n}\alpha_{j_1j_2}\times \\ \times(-s_{q_1}(v_k)c_{q_1}(v_{j_1})+(c_{q_1}(v_k)+ \\ +(-1)^{q_1+1})s_{q_1}(v_{j_1}))\sum_{q_2=1}^{n}(-s_{q_2}(v_l)c_{q_2}(v_{j_2})+ \\ +(c_{q_2}(v_l)+(-1)^{q_2+1}))s_{q_2}(v_{j_2}))=f_1(v_k,v_l),k,l=\overline{-n,n}. \quad (20)$$

Системе алгебраических уравнений (20) поставим в соответствие систему дифференциальных уравнений

$$\frac{d\alpha_{kl}(u)}{du}=\beta_{kl}(a(v_k,v_l)\alpha_{kl}(u)+ \\ +\frac{c(v_k,v_l)}{(2n+1)^2}\sum_{j_1=-n}^{n}\sum_{j_2=-n}^{n}\sum_{q_1=1}^{n}\alpha_{j_1j_2}(u)(-s_{q_1}(v_k)c_{q_1}(v_{j_1})+ \\ +(c_{q_1}(v_k)+(-1)^{q_1+1})s_{q_1}(v_{j_1}))\sum_{q_2=1}^{n}(-s_{q_2}(v_l)c_{q_2}(v_{j_2})+ \\ +(c_{q_2}(v_l)+(-1)^{q_2+1}))s_{q_2}(v_{j_2}))-f_1(v_k,v_l)),k,l=\overline{-n,n}. \quad (21)$$

Здесь коэффициенты $\beta_{kl}, k,l = \overline{-n,n},$ подбираются из условия асимптотической устойчивости системы дифференциальных уравнений (21). При выполнении этого условия решение системы уравнений сходится к решению системы (20).

После нахождения функции $H^{++}(z_1,z_2)$ функция $h(t_1,t_2)$ находится обратным преобразованием Фурье.

IV. Приложение

Построенные выше алгоритмы были протестированы на модельных примерах. Результаты тестирования показали их эффективность и устойчивость.

Ниже приведены результаты решения уравнения Винера - Хопфа первого рода

$$\int_0^\infty x(t-\tau)g(\tau)d\tau + n(t) = f(t), t \in (0,\infty)$$

непрерывным операторным методом. Здесь

$$x(t) = \frac{t}{2t^2+3},\ n(t) = \frac{1}{t^3+0.01}$$

$$f(t) = \frac{1}{t^3+0.01} - \frac{2tln(2)+\sqrt{6}\pi - 2tln\left(2t^2+3\right)}{4(2t^2+4t+5)} - \frac{2\sqrt{6}\cdot arctan\left(\frac{1}{3}\right)t\sqrt{6}+2ln(2)-2ln\left(2t^2+3\right)}{4(2t^2+4t+5)}$$

Точное решение $g(t) = 1/(t+1).$

График зависимости погрешности решения от количества используемых узлов приведен на рис. 1.

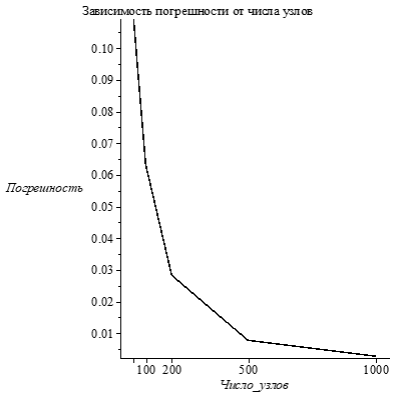


Рис. 1. Зависимость погрешности от количества узлов

Список литературы

[1] Солодовников В.В. Введение в статистическую динамику систем автоматического управления.- М.Л.: ГИТТЛ. 1952. - 368 с.

[2] Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления.- М.: ГИФМЛ. 1960. - 884 с.

[3] Иванов В.В. Теория приближенных методов и ее применение к численному решению сингулярных интегральных уравнений. - Киев: Наукова Думка. 1968. - 288 с.

[4] Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. - М. : Наука, 1974. - 224 с.

[5] Бахвалов Н.С. Численные методы. - М.: Наука. 1973. - 632 с.

[6] Бойков И.В. Об одном непрерывном методе решения нелинейных операторных уравнений // Дифференциальные уравнения. 2012. Т. 48, № 9, - с. 1308 - 1314.

[7] Boykov I.V., Roudnev V.A., Boykova A.I., Baulina O.A. New iterative method for solving linear and nonlinear hypersingular integral equations// Applied Numerical Mathematics. Volume 127, May 2018, - pp. 280-305.

[8] Boikov I.V., Boikova A.I., Baulina O.A. Continuous Method for Solution of Gravity Prospecting Problems. In: Nurgaliev D., Khairullina N. (eds) Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. 2019. - pp. 55-68.

[9] Далецкий Ю.Л., Крейн М.Г. Устойчивость решений дифференциальных уравнений в банаховом пространстве. - М.: Наука. 1970. – 535 с.

[10] Деккер К., Вервер Я. Устойчивость методов Рунге-Кутты для жестких нелинейных дифференциальных уравнений. - М.: Мир, 1988. – 335 с.

[11] Гахов, Ф. Д., Черский Ю.И. Уравнения типа свертки. - М.: Наука. 1978. 296 с.

[12] Бойков И.В., Бойкова А.И. Аналитические методы решения гиперсингулярных интегральных уравнений /Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико - математические науки. Математика. 2017. № 2. 63 - 78.

[13] Бойков И.В. Приближенное решение сингулярных интегральных уравнений. - Пенза: Издательство ПГУ. 2004. - 316 с.

[14] Бойков И.В. Приближенные методы вычисления сингулярных и гиперсингулярных интегралов. Часть первая. Сингулярные интегралы. Пенза: Издательство ПГУ. - 2005. - 360 с.

[15] Gregor Jrzi O aproximaci obrazu v Hilbertove transfomaci ortogonalnimi radami racionalnich lomenych funkci // Aplik. Matem. Ceskoslovenska Arademie VED. 1961. V.6, №3, - pp. 214–240.

[16] Канторович Л.В., Акилов Г.П. Функциональный анализ. - М.: Наука. 1977. - 750 с.

[17] Гахов Ф. Д. Краевые задачи. - М.: Наука, 1977. - 640 с.

Исследование эффективности параллельных алгоритмов стохастической оптимизации

Воронухин М.Е.
Самарский государственный университет путей сообщения
Самара, Россия
wape123@list.ru

Засов В.А.
Самарский государственный университет путей сообщения
Самара, Россия
vzasov@mail.ru

***Abstract* — This paper presents the results of research the performance indicators of two parallel algorithms for stochastic optimization - the genetic algorithm and the particle swarm optimization. The experimental dependences of the following indicators of the efficiency of parallel algorithms are given: execution time, acceleration, error, stability on the type and dimension of the objective function, the number of agents and processor cores used, as well as comparative estimates of the performance of these algorithms.**

Ключевые слова — стохастическая оптимизация, генетический алгоритм, роевой алгоритм, параллельные вычисления, показатели эффективности, ускорение, устойчивость, погрешность, вычислительные эксперименты, программный комплекс

I. Введение

Эффективность оптимального управления в значительной мере определяется характеристиками применяемых алгоритмов оптимизации и средствами их реализации. Одной из проблем, возникающей при решении задач оптимального управления, является априорная неопределенность свойств объектов и процессов управления. Для решения задач оптимизации в условиях неполной информации наиболее эффективными являются стохастические алгоритмы, ибо эффективность детерминированных алгоритмов сильно зависит от условий конкретной задачи [1,2].

Случайный поиск успешно применяется, когда целевая функция многоэкстремальная, с разрывами и пространство решений является неоднородным, т.е. нельзя определить признаки приближения к оптимальному решению [2,3]. Хотя стохастические алгоритмы, также как и детерминированные, не гарантируют получение точного решения, но они, как правило, позволяют находить достаточно близкие для практического использования решения за приемлемое для задач оперативного управления время.

Среди стохастических алгоритмов выделим две группы заимствованных у природы алгоритмов оптимизации - эволюционные и роевого интеллекта. Эти алгоритмы отличаются использованием при поиске решения популяций особей (агентов) и ориентированы на эффективные мультиагентные технологии программирования [2,3]. Естественный параллелизм этих алгоритмов существенно упрощает реализацию их параллельных вариантов, предназначенных для выполнения на параллельных вычислительных системах, что является важным для обеспечения режима реального временив системах управления [4].

С другой стороны, применение стохастических алгоритмов оптимизации не является тривиальной задачей из-за стохастической природы этих алгоритмов. Поэтому перед практическим применением в прикладных задачах для каждой конкретной алгоритмической реализации целесообразно проведение вычислительных экспериментов для определения быстродействия, устойчивости, погрешности и других показателей эффективности алгоритмов.

Кроме того, параллельные алгоритмы оптимизации сложнее последовательных и затраты на организацию информационного взаимодействия потоков существенно возрастают при увеличении степени распараллеливания. Этот фактор негативно влияет на рост ускорения вычислений при увеличении числа потоков, поэтому оценка эффективности распараллеливания алгоритмов оптимизации также требует проведения вычислительных экспериментов.

Задачей работы является вычисление и анализ показателей эффективности двух групп параллельных алгоритмов стохастической дискретной оптимизации: эволюционных и роевого интеллекта.

II. Параллельные стохастические алгоритмы оптимизации и программный комплекс для их исследования

Задача стохастической оптимизации есть задача определения экстремума целевой функции $f(X)$, т.е.

$$f_{opt}(X) = \max_{X \in D} f(X) \text{ или } f_{opt}(X) = \min_{X \in D} f(X),$$

где X - вектор варьируемых параметров, D - область допустимых значений X. Обозначим S - количество агентов популяции, каждый из которых представляет собой некоторую точку в пространстве поиска решений задачи. Процесс оптимизации состоит в управляемом перемещении агентов в этом пространстве.

Алгоритмы эволюционной оптимизации: генетический классический и его различные модификации предполагают на каждом шаге (итерации) создание новых популяций агентов с учетом опыта, полученного предыдущими популяциями агентов.

Наиболее распространенный генетический алгоритм (Genetic Algorithm - GA) состоит из следующих шагов: генерация начальной популяции агентов (особей) S; вычисление целевой функции $f(X)$ для каждого из агентов S; выбор агентов и их скрещивание; случайные изменения агентов - мутация; завершение, если условие

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

завершения выполнено, иначе переход к повторному вычисление целевой функции $f(X)$ [2,5].

Алгоритмы роевого интеллекта (роя частиц, роя пчел, поиск косяком рыб и др.) основаны на организации децентрализованного перемещения агентов одной популяции без процедур отбора, уничтожения и порождения агентов, и используют набор правил обмена информацией между агентами.

Характерный для этой группы алгоритм роя частиц (Particle Swarm Optimization - PSO) содержит следующие шаги: инициализация начальных состояний агентов S; вычисление целевой функции $f(X)$ для каждого из агентов S; миграция (перемещение) агентов с учетом правил формирования направления и величины вектора скорости в новую точку; обновления значения координат лучшего из найденных решений для каждого из агентов S и для всех агентов в целом. После этого итерация повторяется, пока не выполнится условие остановки [2,6,7].

Анализ рассмотренных алгоритмов оптимизации позволяет определить, что основным методом создания параллельных вариантов алгоритмов является выделение для каждого из агентов отдельного вычислителя – процессорного ядра, на котором в свою очередь, можно в виде потоков распараллелить шаги алгоритма (инициализацию агентов, вычисления целевой функции и т.д.). Для сокращения временных затрат на информационное взаимодействие агентов целесообразно применять разделяемую оперативную память.

Для решения поставленной задачи создан тестовый программный комплекс, позволяющий выполнять вычислительные эксперименты и получить экспериментальные зависимости таких показателей эффективности параллельных алгоритмов стохастической оптимизации, как времени выполнения, ускорения, погрешности в зависимости от вида и размерности целевой функции, количества агентов и используемых процессорных ядер, а также сравнительные оценки этих показателей для разных алгоритмов.

Программный комплекс разработан для установки на вычислительные системы с многоядерной архитектурой, использующих технологию многопоточной обработки [8,9]. Для увеличения масштабируемости параллельных алгоритмов применяется технология CUDA (Computer Unified Device Architecture) [10,11], позволяющая создавать недорогие высокопроизводительные параллельные вычислительные системы на основе графических процессоров (GPU).

Использование распространенных в задачах управления вычислительных платформ и языка программирования позволяют получать не только качественные, но и количественные параметры показателей эффективности параллельных алгоритмов оптимизации для конкретных вычислительных систем.

Это позволяет более точно оценивать возможности использования алгоритмов оптимизации для заданных условий применения.

Программный комплекс состоит из следующих модулей: выбора целевой функции, выбора алгоритма оптимизации и задания его параметров, планирования и проведения вычислительных экспериментов, вычисления показателей эффективности алгоритмов оптимизации в конкретных условиях применения, формирования обзорных отчетов в табличной и графической формах по результатам экспериментов, организация архивов результатов экспериментов.

Модуль выбора целевой функции оптимизации позволяет выбрать целевую функцию из библиотеки функций, наиболее распространенных для тестирования: МакКормика, Растригина, Била, Бута, Матьяса, Трехгорбого верблюда, Изома [5,12] или же использовать целевую функцию, предложенную разработчиком.

Модуль выбора алгоритма оптимизации дает возможность выбрать из библиотеки и задать параметры одного из последовательных и параллельных стохастических алгоритмов оптимизации.

Модуль планирования проведения вычислительных экспериментов предназначен для вычисления показателей эффективности алгоритмов в конкретных условиях применения.

III. Результаты вычислительных экспериментов и их анализ

На базе программного комплекса проведены вычислительные эксперименты с целью определения показателей эффективности параллельных алгоритмов, которые наиболее характерно представляют эволюционные и роевые стохастические алгоритмы оптимизации.

В группе эволюционных алгоритмов выбран генетический алгоритм, в группе роевого интеллекта – алгоритм роя частиц. В качестве целевой функции для серий экспериментов используется функция МакКормика [5,12].

Экспериментальные зависимости времени работы последовательных и параллельных вариантов генетического (GA) и роевого (PSO) алгоритмов от количества агентов приведены на рис.1.

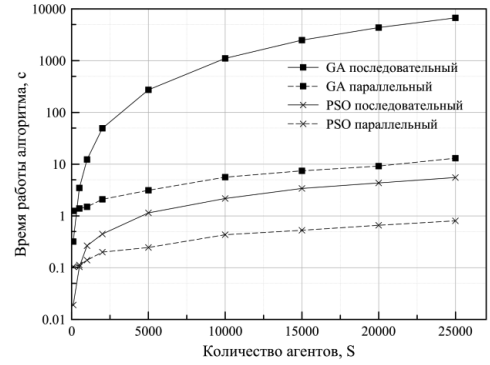


Рис. 1. Экспериментальные зависимости времени работы алгоритмов GA и PSO от количества агентов

Условием завершения работы алгоритмов является выполнение заданного числа итераций (в экспериментах число итераций равно 200). Время работы последовательного и параллельного вариантов генетического алгоритма почти на два порядка превышает время работы алгоритмов роя частиц.

Это обусловлено существенно более сложными алгоритмами преобразования агентов в генетических алгоритмах (кроссинговером, мутациями, сменой поколений агентов). При числе агентов ($S > 10000$) последовательный генетический алгоритм из-за большого времени работы практически неприемлем для использования в задачах оперативного управления.

С другой стороны, сравнение времени работы последовательных и параллельных вариантов алгоритмов показывает высокую эффективность распараллеливания генетического алгоритма.

Этот вывод подтверждается вычисленными значениями величин ускорения алгоритмов GA и PSO, представленных на рис. 2.

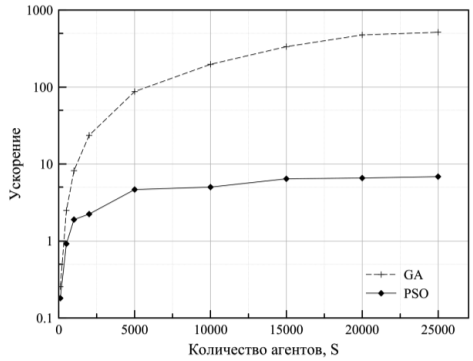


Рис. 2. Экспериментальные зависимости ускорения параллельных алгоритмов GA и PSO от количества агентов

Под ускорением алгоритмов [8] понимается величина отношения времени выполнения заданного числа итераций (в приведенном эксперименте 200) последовательным и параллельным вариантами алгоритмов.

Ускорение, достигаемое параллельными генетическими алгоритмами значительно выше, чем ускорение параллельного алгоритма роя частиц и с увеличением количества агентов это преимущество возрастает.

Таким образом, эффективность использования агентов (процессорных ядер), определяемая отношением величины ускорения и количества агентов, в параллельных генетических алгоритмах существенно больше.

Важным показателем эффективности алгоритмов оптимизации является величина погрешности вычисления экстремума целевой функции $f_{opt}(X)$.

Величина погрешности определяется отличием вычисленного определенным алгоритмом экстремума тестовой целевой функции от его известного эталонного значения. В дальнейшем, величину погрешности (назовем ее относительной) будем измерять отношением величины диаметра окрестности в области экстремума тестовой целевой функции к величине этого экстремума.

Учитывая стохастическую природу исследуемых алгоритмов, проведены исследования зависимости вероятности вычисления экстремума с заданной относительной погрешностью от величины относительной погрешности.

Эти результаты приведены на рис. 3 и получены для серий экспериментов с числом итераций для каждого из алгоритмов равным 200.

Результаты исследований показывают явное преимущество алгоритма роя частиц даже при малом количестве агентов (500 у PSO и 50000 у GA). Вычислительные эксперименты по оценке погрешностей последовательных генетических и роевых алгоритмов показали сопоставимость результатов с результатами параллельных алгоритмов.

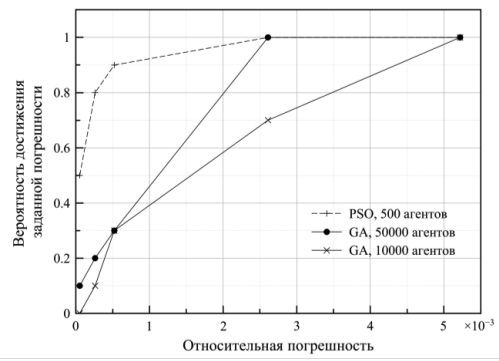


Рис. 3. Экспериментальные зависимости вероятности вычисления экстремума с заданной погрешности от величины относительной погрешности

Для практических приложений актуален такой показатель эффективности алгоритмов оптимизации как время достижения устойчивого решения (сходимость алгоритмов).

Устойчивость решения предлагается измерять числом следующих друг за другом решений (вычислений экстремумов целевой функции), относительная погрешность которых не превышает заданную.

Для конкретных задач удобно использовать отношение показателя устойчивости в выше упомянутом смысле к показателю устойчивости «идеальному» для данной задачи.

Примеры экспериментальных зависимостей времени достижения устойчивого решения от величины относительной устойчивости приведены на рис. 4.

Время достижения устойчивого решения для алгоритма роя частиц намного меньше по сравнению с генетическим алгоритмом. Однако, по своей форме зависимости похожи, и увеличение относительной

устойчивости приводит к существенному росту времени вычисления алгоритмами экстремума целевой функции.

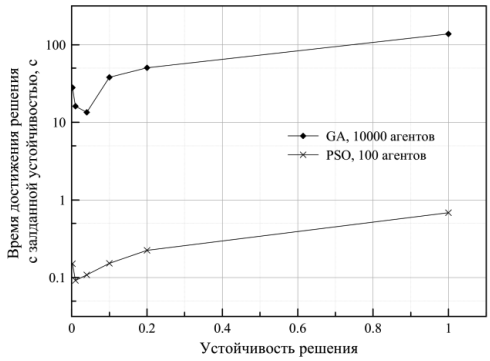


Рис. 4. Экспериментальные зависимости времени достижения решения с заданной устойчивостью от относительной устойчивости решения

Приведенные результаты получены для величины относительной погрешности 1×10^{-3}, а «идеальный» показатель устойчивости для задачи равен 5000.

Полученные экспериментально временные характеристики параллельных генетического алгоритма и алгоритма роя частиц для разных целевых функций приведены в таблице I.

ТАБЛИЦА I. ВРЕМЯ ВЫПОЛНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РАЗНЫХ ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ

Тестовая целевая функция	**Время работы алгоритма GA, с**	**Время работы алгоритма PSO, с**
Растригина	0,311	4,631
Била	0,316	Большой разброс результатов
Бута	0,333	0,132
Матьяса	0,306	0,221
Трехгорбого верблюда	0,313	0,231
Изома	1,188	0,446
МакКормика	1,185	0,189

Время работы относительно медленного генетического алгоритм в условиях априорной неопределенности целевой функции имеет меньший разброс по сравнению с временем работы алгоритма роя частиц, т.е. этот алгоритм работает стабильнее.

В условиях небольшой априорной неопределенности целевой функции, алгоритм роя частиц возможно применять при соответствующей настройке констант алгоритма, отвечающих за перемещение агента на каждой итерации. Это более специализированный алгоритм и из-за неправильной настройки констант решение алгоритма роя частиц может не попасть в область экстремума. Большая величина шага агента приводит к неустойчивой работе алгоритма роя частиц, что наблюдается при тестирования алгоритма на целевой функции Била.

Вариант практического применения параллельного роевого алгоритма оптимизации представлен на рис. 5 структурной схемой адаптивной параметрической идентификации объекта управления. Современные мониторинг и управление в значительной мере базируются на параметрах моделей, описывающих управляемые объекты, поэтому оперативное определение параметров моделей является актуальной задачей процесса управления.

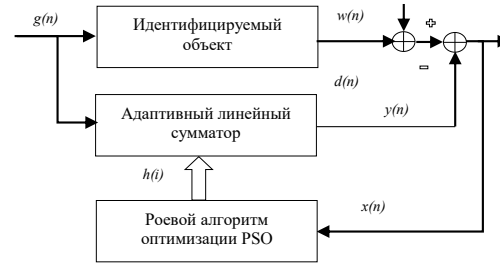


Рис. 5. Структурная схема адаптивной параметрической идентификации на основе параллельного роевого алгоритма оптимизации

После завершения процесса адаптации, т.е. определения экстремума - минимального значения целевой функции среднеквадратичной ошибки $E\left\{\left|x(n)\right|^2\right\}$, параметры $h(i)$ адаптивного линейного сумматора будут близки параметрам модели объекта идентификации. Далее вычисленные параметры используются в системе управления.

Эффективность применения параллельного роевого алгоритма оптимизации в задачах идентификации подтверждается результатами компьютерного моделирования, приведенными на рис. 6.

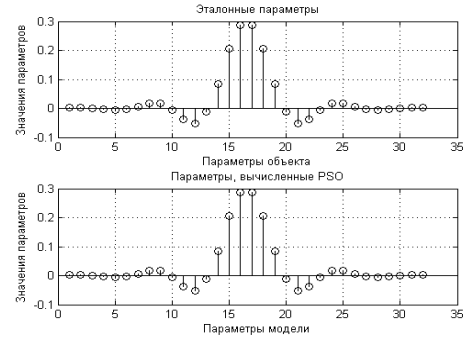


Рис. 6. Эталонные и вычисленные параметры модели

В условиях помех наблюдений $w(n)$, задаваемых равномерным белым шумом с дисперсией 0,08, произведена идентификация объекта с заранее известными (эталонными) параметрами, число которых равно $i = 32$.

Сравнение по критерию среднего абсолютного отклонения вычисленных параметров модели с эталонными показало приемлемую для инженерных приложений погрешность идентификации ~ 4,4%.

Время идентификации в условиях указанных помех $w(n)$ наблюдений составляет 0,06 с. Это время в 2 раза меньше времени идентификации, например, распространенным детерминированным алгоритмом LMS (Least Mean Square) [13]. С увеличением числа параметров (размерности целевой функции) выигрыш по времени по сравнению с упомянутым детерминированным алгоритмом возрастает и при $i = 512$ достигает 2,8 раз.

IV. Заключение

В работе представлены результаты исследований показателей эффективности параллельных алгоритмов стохастической оптимизации - генетического алгоритма и алгоритма роя частиц.

Приведены экспериментальные зависимости следующих показателей эффективности параллельных алгоритмов: времени выполнения, ускорения, погрешности, устойчивости от вида и размерности целевой функции, количества агентов и используемых процессорных ядер, а также сравнительные оценки показателей этих алгоритмов.

Рассмотрен пример практического применения алгоритма оптимизации роя частиц для задач адаптивной параметрической идентификации в условиях помех наблюдений, который показал преимущества по быстродействию этого алгоритма перед детерминированным алгоритмом Least Mean Square.

Вычислительные эксперименты выполнены на программном комплексе с многоядерной архитектурой и технологией многопоточной обработки CUDA.

Список литературы

[1] Васильев Ф.П. Методы оптимизации. - М.: Факториал Пресс, 2002. - 824 с.

[2] Матренин П.В., Гриф М.Г., Секаев В.Г. Методы стохастической оптимизации: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 67 с.

[3] Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.

[4] Гитман М.Б. Введение в стохастическую оптимизацию: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед.политехн. ун-та, 2014. – 104 с.

[5] Haupt, Randy L. Haupt, Sue Ellen. Practical genetic algorithms. - New York : J. Wiley, 2004. - 272 p.

[6] Trelea I.C. The Particle Swarm Optimization Algorithm: convergence analysis and parameter selection // Information Processing Letters. – 2003, №85. - P. 317-325.

[7] Воронухин М.Е. Исследование эффективности параллельного алгоритма роя частиц для задач оптимизации //Аналитические и численные методы моделирования естественно-научных и социальных проблем: Труды XIII международ. научно-техн. Конференции. – Пенза: ПГУ, 2018. – С.145-150.

[8] Гергель В.П. Теория и практика параллельных вычислений: учебное пособие. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 423 с.

[9] Параллельные алгоритмы. Разработка и реализация /Ю.К. Демьянович и др. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 344 с.

[10] Боресков А.В. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA: Учебное пособие. – М: МГУ, 2012. – 336с.

[11] Боресков А.В. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA: Учебное пособие. – М: МГУ, 2012. – 336с.

[12] Mishra, Sudhanshu. Some new test functions for global optimization and performance of repulsive particle swarm method // MPRA Paper.North-Eastern Hill University, Shillong. – 2006. - 25 p.

[13] Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. – М.: Техносфера, 2013. – 528 с.

Методы последовательной параметрической оптимизации в обратных задачах технологической теплофизики

Дилигенская А.Н.
Самарский государственный технический университет
Самара, РФ
adiligenskaya@mail.ru

***Abstract* — A method is proposed for the linear and some nonlinear base inverse heat conduction problems. The method is based on the optimal control theory for objects with distributed parameters. The initial ill-posed inverse problem is reduced to a conditionally well-posed one which solution is maintained from the sought data of the initial problem and belongs to the class of continuous and continuously differentiable functions. Parameterization of the identifiable characteristics leads to the parameter optimization problem, which solution is based on the special alternance method and provides the optimal values of the parameter vector.**

Ключевые слова — inverse heat conduction problem, compact set, parametric optimization, optimal control problem, minimax problem

I. Введение

Проблема создания единого подхода к анализу процессов нестационарной теплопроводности в разнообразных тепловых системах и построению на основе их базовых закономерностей обобщенной формализованной математической модели, удобной для последующего синтеза алгоритмов или систем управления рассматриваемыми процессами, является одной из важнейших проблем современной инженерной теплофизики [1-3]. Решение прикладных задач анализа теплового состояния технических объектов и систем в большом числе практических ситуаций основывается на использовании динамических линейных и нелинейных, одномерных и многомерных моделей процесса теплопроводности с распределенными параметрами.

Эффективным средством комплексного исследования процессов теплообмена с окружающей средой на поверхности технологических объектов, процессов теплопроводности внутри самих тел, а также их теплофизических свойств является математический аппарат обратных задач технологической теплофизики, использующий сопоставление физически обоснованных модельных реализаций с экспериментальными данными на основе сформулированного определенным образом функционала качества [4,5].

В данной работе рассматривается один из возможных подходов к решению широкого спектра обратных задач технологической теплофизики, основанный на методах теории оптимального управления системами с распределенными параметрами (ТОУ СРП) [6] и позволяющий отыскивать физически реализуемые по степени гладкости решения при использовании равномерной метрики оценивания температурной невязки [7].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-08-00565).

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

II. Постановка обратной задачи технологической теплофизики

Для широкого класса объектов технологической теплофизики модель поведения температурного поля $\theta(x,t)$ в зависимости от времени t и пространственной координаты $x \in \overline{D}, \overline{D} \in R^1$ или $\overline{D} \in R^2$ в пределах открытой части D области $\overline{D}$ с границей S описывается неоднородным операторным уравнением

$$L[\theta(x,t)] = f_1\left(x,t,h_{D_1}(x),h_{D2}(t),h_\beta(x,t,\theta)\right), \quad x \in D, t \in [0,T], \tag{1}$$

дополненным граничными

$$\Gamma[\theta(x,t)] = f_2(h_S(x,t)), x \in S, t > 0 \tag{2}$$

и начальными условиями

$$N[\theta(x,t)] = h_{\overline{D}_0}(x), x \in \overline{D}, t = 0 \tag{3}$$

Здесь $h_{D_1}(x), x \in D$ и $h_{D2}(t)$ – пространственно распределенное и сосредоточенное внутренние воздействия, $h_S(x,t), x \in S$ – пространственно-временное граничное воздействие, $h_{\overline{D}_0}(x), x \in \overline{D}$ – пространственно распределенное начальное состояние, $h_\beta(x,t,\theta)$ – характеристики (или в частном случае параметры), выражающие теплофизические свойства и зависящие в общем случае от пространственной координаты, времени или температуры; L, Γ, N – заданные линейные или нелинейные (в общем случае) дифференциальные операторы; f_1, f_2 – известные функции своих аргументов, удовлетворяющие обычным требованиям гладкости.

Обратная задача теплопроводности (ОЗТ) формулируется как задача определения какой-либо характеристики $h = \left\{h_{D_1}(x), h_{D2}(t), h_S(x,t), h_{\overline{D}_0}(x)\right\}$ процесса теплопроводности на основе дополнительной информации о распределении температуры $\theta^*(\psi)$ по временному $\psi = \{t \in [0,T]\}$ или пространственному

$\psi = \{x \in \overline{D}\}$ аргументу, полученной в некоторой доступной для измерения области $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2\}$. В наиболее распространенных постановках типичных ОЗТ в качестве Ω_1 рассматривается фиксированная точка $x^* \in \overline{D}$ пространственной области изменения аргумента или (в некоторых постановках ретроспективных ОЗТ) в качестве Ω_2 используется фиксированный (конечный) момент времени $t^* \in [0, T]$. Искомые характеристики принадлежат соответствующим множествам

$$h_{D_1}(x) \in H_{D_1}(x), h_{D2}(t) \in H_{D2}(t), \quad h_S(x,t) \in H_S(x,t), h_{\overline{D}_0}(x) \in H_{\overline{D}_0}(x) \tag{4}$$

достаточно гладких функций. Таким образом, для температурного поля $\theta\left(x,t,h_{D_1}(x), h_{D2}(t), h_S(x,t), h_{\overline{D}_0}(x)\right)$ формулируется задача в экстремальной постановке с критерием оптимальности по векторному параметру ψ в следующем виде

$$\begin{aligned} &\psi = t\colon I_1 = \max_t \left|\theta\left(x^*,t,h\right) - \theta^*\left(x^*,t\right)\right| \to \min_h; \\ &\psi = x\colon I_1 = \max_x \left|\theta\left(x,t^*,h\right) - \theta^*\left(x,t^*\right)\right| \to \min_h. \end{aligned} \tag{5}$$

Задача (5) соответствует широкому кругу типичных постановок ОЗТ: граничных, внутренних, ретроспективных и коэффициентных обратных задач теплопроводности, в которых требуется идентифицировать граничные условия, функцию внутренних источников тепла, начальное состояние или теплофизические характеристики объекта.

III. Метод параметрической оптимизации

В рамках предлагаемого подхода [8-11] конструктивное решение обратных задач технологической теплофизики основывается на методах ТОУ СРП, для чего сформулированная задача (5) рассматривается как задача отыскания оптимального управляющего воздействия $u = h$, обеспечивающего минимизацию функционала [5].

Рассмотрим разработанный метод в одномерной области $\overline{D} \in R^1$, $\psi \in [0, \Psi]$, предусматривающий поиск физически обоснованных решений $h \in C^1$ на компактном множестве C^1 непрерывных вместе со своей первой производной функций, что обеспечивается введением подчиненного ограничению на максимальное значение $w_{\max}$ условного управляющего воздействия w, в качестве которого рассматривается вторая производная u по соответствующему аргументу ψ

$$w(\psi) = \frac{d^2u}{d\psi^2};\ |w(\psi)| \le |w_{\max}|. \tag{6}$$

Формулируется соответствующая минимаксная задача

$$\begin{aligned} &\psi = t\colon I_2 = \max_t \left|\theta\left(x^*,t,h\right) - \theta^*\left(x^*,t\right)\right| \to \min_w; \\ &\psi = x\colon I_2 = \max_x \left|\theta\left(x,t^*,h\right) - \theta^*\left(x,t^*\right)\right| \to \min_w \end{aligned} \tag{7}$$

с нелинейной функцией максимума, которая на текущий момент не имеет общих методов решения в рамках ТОУ СРП. Решение сформулированных подобным образом задач программного оптимального управления на основе методов оптимального управления СРП может базироваться на использовании необходимых условий оптимальности, среди которых центральным результатом является принцип максимума Понтрягина.

Для этого осуществляется редукция задачи (7) к задаче с интегральным функционалом качества

$$I_3(w,\alpha) = \frac{1}{\Psi}\int_0^{\Psi} \alpha d\psi = \alpha \to \min_{w,\alpha} \tag{8}$$

и дополнительным фазовым ограничением

$$\begin{aligned} &\psi = t\colon \left|\theta\left(x^*,t,h\right) - \theta^*\left(x^*,t\right)\right| - \alpha \le 0; \\ &\psi = x\colon \left|\theta\left(x,t^*,h\right) - \theta^*\left(x,t^*\right)\right| - \alpha \le 0, \end{aligned} \tag{9}$$

содержащим вспомогательный параметр α.

К задаче (8) могут быть применены необходимые условия оптимальности в форме принципа максимума Понтрягина, что приводит к параметрическому представлению условных оптимальных управлений w^0 в виде кусочно-постоянных функций времени или пространственной координаты соответственно

$$\begin{aligned} &w^0(\psi) = \beta(-1)^{j+1} w_{\max};\ \forall\psi\colon \sum_{m=0}^{j-1}\Delta_m < \psi < \sum_{m=0}^{j}\Delta_m; \\ &j = \overline{1,n};\ \beta = \pm 1;\ \Delta_0 = 0;\ \sum_{m=0}^{n}\Delta_m = \Psi. \end{aligned} \tag{10}$$

Переход от условных оптимальных управлений w^0 к искомым оптимальным управляющим воздействиям u^0 приводит к их параметризованной форме в виде кусочно-параболических зависимостей соответствующего аргумента

$$u^0(\psi) = \begin{cases} u^{(1)},\ при\ \psi \in \left[0, \tilde{\Delta}_1\right], n \ge 1; \\ u^{(2)},\ при\ \sum_{s=1}^{j-1}\tilde{\Delta}_s \le \psi \le \sum_{s=1}^{j}\tilde{\Delta}_s,\ j = \overline{2,n},\ n \ge 2, \end{cases} \tag{11}$$

где $u^{(1)} = \gamma_1 + \gamma_2\psi + \frac{\beta \cdot w_{\max}}{2}\psi^2$, $u^{(2)} = \gamma_1 + \gamma_2\psi +$

$+\frac{\beta w_{\max}}{2}\psi^2 + \beta w_{\max}\sum_{k=2}^{j}(-1)^{k+1}\left(\psi - \sum_{s=1}^{k-1}\tilde{\Delta}_s\right)^2$, $\beta = \pm 1$.

Тем самым, получена параметрическая форма искомых величин h, которые однозначно определяются соответствующим вектором параметров $\Delta = \left(\tilde{\Delta}, w_{max}, \gamma\right)$; $\gamma = \left(u(0), u'(0)\right)$ на замкнутом ограниченном множестве G_{n+2}.

IV. Редукция к задаче математического программирования

Математическая модель температурного поля при учете параметризованной формы идентифицируемых воздействий (11) позволяет получить выражение для температуры, которая также характеризуется вектором Δ на множестве параметров G_{n+2} в форме суммы реакций F_1, F_2 и F_3 на отдельные составляющие γ, $w_{\max}$ и $\tilde{\Delta}$ вектора Δ искомых параметров соответственно

$$\theta\left(x^*, t, \Delta\right) = \begin{cases} F_1\left(x^*, t, \gamma\right) + F_2\left(x^*, t, w_{\max}\right), \; n = 1; \\ F_1\left(x^*, t, \gamma\right) + F_2\left(x^*, t, w_{\max}\right) + \\ + F_3\left(x^*, t, w_{\max}, \Delta\right), \quad n \geq 2; \end{cases} \qquad (12,а)$$

$$\theta\left(x, t^*, \Delta\right) = \begin{cases} F_1\left(x, t^*, \gamma\right) + F_2\left(x, t^*, w_{\max}\right), \; n = 1; \\ F_1\left(x, t^*, \gamma\right) + F_2\left(x, t^*, w_{\max}\right) + \\ + F_3\left(x, t^*, w_{\max}, \Delta\right), \quad n \geq 2. \end{cases} \qquad (12,б)$$

Использование полученного параметрического представления (12) температурного поля приводит задачу (7) к специальной негладкой задаче математического программирования относительно искомого вектора параметров Δ

$$\psi = t : I_4(\Delta) = \max_t \left|\theta\left(x^*, t, \Delta\right) - \theta^*\left(x^*, t\right)\right| \to \min_\Delta;$$
$$\psi = x : I_4(\Delta) = \max_x \left|\theta\left(x, t^*, \Delta\right) - \theta^*\left(x, t^*\right)\right| \to \min_\Delta. \qquad (13)$$

Основная идея изложенного метода также может быть применена к поиску решений $h \in C^\infty$ на компактном множестве C^∞ полиномиальных функций времени, пространственной координаты или температуры. Предварительная параметризация искомого управляющего воздействия в классе C^∞ позволяет получить его описание с точностью до вектора параметров Δ, и тем самым, обеспечивает редукцию исходной проблемы к задаче математического программирования (13).

V. Альтернансный метод в обратных задачах теплопроводности

Решение задачи математического программирования (13) может быть получено по общей схеме альтернансного метода [7], основанного на специальных свойствах оптимальных решений задачи, подобных свойствам нелинейных чебышевских приближений. Альтернансные свойства позволяют сформировать замкнутую относительно параметров Δ^0 оптимального процесса систему соотношений, которая на основе физических закономерностей предметной области может быть трансформирована в замкнутую систему расчетных уравнений относительно искомых величин и неизвестного значения минимакса $I_0(\Delta_0)$

$$\theta\left(x^*, t_q^0, \Delta_0\right) - \theta^*\left(x^*, t_q^0\right) = \pm(-1)^{q+1} I_0\left(\Delta_0\right), q = \overline{1, n+3}$$
$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\theta\left(x^*, t_q^0, \Delta_0\right) - \theta^*\left(x^*, t_q^0\right)\right) = 0; \qquad (14,а)$$

$$\theta\left(x_q^0, t^*, \Delta_0\right) - \theta^*\left(x_q^0, t^*\right) = \pm(-1)^{q+1} I_0\left(\Delta_0\right), q = \overline{1, n+3}$$
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\theta\left(x_q^0, t^*, \Delta_0\right) - \theta^*\left(x_q^0, t^*\right)\right) = 0. \qquad (14,б)$$

Согласно системе расчетных соотношений (14), предельно допустимые значения $\left|\theta\left(x^*, t_q^0, \Delta_0\right) - \theta^*\left(x^*, t_q^0\right)\right|$ или $\left|\theta\left(x_q^0, t^*, \Delta_0\right) - \theta^*\left(x_q^0, t^*\right)\right|$, равные $I_0(\Delta_0)$, достигаются только в отдельных точках альтернанса ψ_q^0, что является подтверждением выполнения фазового ограничения (9) на оптимальном управлении (10) в задаче (13).

Решение системы уравнений (14) позволяет определить искомый вектор параметров Δ_0, и, тем самым, провести параметрическую идентификацию искомых характеристик $h(\psi)$ в классе кусочно-параболических функций. Выбор числа n и расчет значений вектора параметров Δ осуществляет аппроксимацию искомой функции с любой требуемой точностью в классе непрерывных и непрерывно-дифференцируемых функций на соответствующем временном $t \in [0, T]$ или пространственном $x \in [0, X]$ интервале.

Возрастающие значения $n = 1, 2, \ldots$ вплоть до $n \to \infty$ обеспечивают получение последовательности значений I_4^n минимаксного функционала (13), сходящихся к минимально возможной величине $I_4^\infty = I_4^{inf}$, стремящейся к нулю. При этом для любого значения n полученные решения принадлежат компактному множеству непрерывных и непрерывно дифференцируемых функций, и тем самым, задача (13) является условно корректной.

Изложенный подход означает принципиальную возможность решения рассматриваемого класса ОЗТ практически с любой требуемой точностью. В реальных условиях рассматривается последовательность задач

параметрической оптимизации (13) для ряда возрастающих значений $n = 1,2,...n^*$ до некоторой величины n^*, поставленной в соответствие значению минимаксного функционала $I_4^0(\Delta^0)$.

VI. Теплофизические исследования на основе параметрической оптимизации

С помощью разработанного метода минимаксной оптимизации исследованы базовые обратные задачи теплопроводности, отражающие основные проблемы теплофизических исследований. Рассмотрены ОЗТ по идентификации внутренних и внешних воздействий, теплофизических параметров и характеристик, заданные на основе линейных и нелинейных, одномерных и двумерных, аналитических и численных моделей для тел канонической формы.

Некоторые результаты решения обратных задач теплопроводности на примере решения одномерной внутренней ОЗТ по идентификации сосредоточенной функции внутреннего тепловыделения приведены в таблице 1 и на рис. 1,а.

ТАБЛИЦА I. Точность решения внутренней ОЗТ при идентификации мощности внутреннего тепловыделения

n	1	2	3	5	8
$\varepsilon_\theta^n, \%$	1.55	0.91	0.57	0.28	0.13
$\varepsilon_u^n, \%$	15.62	10.41	7.32	4.84	3.06

$\varepsilon_\theta^n, \varepsilon_u^n$ - ошибка аппроксимации температуры и искомой характеристики в классе управлений с числом n интервалов постоянства h^{-1}

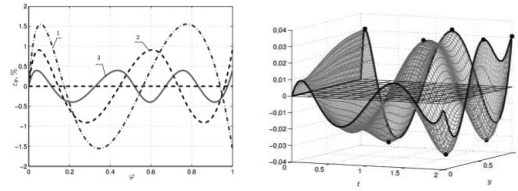
В таблице 2 и на рис.1,б приведены результаты решения граничной ОЗТ в двумерной области $x = (y,z) \in R^2$ по восстановлению плотности граничного теплового потока $h_S(y,t)$, зависящей от времени и одной координаты, которая может быть представлена в виде $h_S(y,t) = h_{S_1}(y)h_{S_2}(t)$. В качестве компактов для $h_{S_1}(y)$ и $h_{S_2}(t)$ рассматриваются множества функций $h_{S_1}(y) = \sum_{i=0}^{n_1} \Delta_{1_i} y^i$ и $h_{S_2}(t) = \sum_{i=0}^{n_2} \Delta_{2_i} t^i$, непрерывных по соответствующим аргументам вместе со своими производными. Вектор $\Delta = (\Delta_1, \Delta_2)$, содержащий $n = n_1 + n_2 + 1$ параметров, однозначно характеризует $h_S(y,t)$.

При решении всех рассмотренных задач рост числа учитываемых параметров обеспечивает сходимость к точному решению задачи, при этом во всех случаях сохраняется регулярный характер процедуры параметрической оптимизации.

ТАБЛИЦА II. Точность решения двумерной граничной ОЗТ

n	2	3	5	7
$\varepsilon_\theta^n, \%$	16.5	4.0	0.4	0.03
$\varepsilon_u^n, \%$	68.9	15.7	4.4	0.32

$\varepsilon_\theta^n, \varepsilon_u^n$ - ошибка аппроксимации температуры и искомой характеристики соответственно



а) б)

Рис. 1. Погрешность аппроксимации температурного распределения а): $\overline{D} \in R^1$, N=1 (1), N=2 (2) и N=4 (3) ; б): $\overline{D} \in R^1$, n_1=3, n_2=3

VII. Заключение

Представленный метод на основе параметрической оптимизации искомых решений обратных задач технологической теплофизики на множестве функций, непрерывных вместе со своей производной, позволяет получить конструктивные результаты для широкого спектра задач идентификации базовых характеристик процессов нестационарной теплопроводности во многих сферах промышленного производства. Метод достаточно универсален к виду математической модели объекта с распределенными параметрами, свободен от сложностей и определенных ограничений численных алгоритмов регуляризации и позволяет получить необходимую точность решения, оцениваемую по значению невязки температурного поля, достаточную для инженерных расчетов.

Список литературы

[1] Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. - М.: Машиностроение, 1988. - 280 с.

[2] Бек Дж. Некорректные обратные задачи теплопроводности: пер. с англ. / Дж. Бек, Б. Блакуэлл, Ч. Мл. Сент-Клэр. - М.: Мир, 1989. - 312 с.

[3] Ozisik M.N., Orlande H.R.B. Inverse Heat Transfer: fundamentals and applications. - New York : Taylor, Francis, 2000.

[4] Алифанов О.М. Экстремальные методы решения некорректных задач. / О.М. Алифанов, Е.А. Артюхин, С.В. Румянцев - М.: Наука, 1988. - 288 с.

[5] Васильев Ф.П. Методы решения экстремальных задач. - М.: Наука, 1981. - 400 с.

[6] Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1975 – 568 с.

[7] Рапопорт Э.Я. Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – 336 с.

[8] Рапопорт Э. Я., Плешивцева Ю. Э. Специальные методы оптимизации в обратных задачах теплопроводности // Изв. РАН. Энергетика, 2002. № 5.- с 144-155.

[9] Diligenskaya A. N., Rapoport E. Y. Analytical methods of parametric optimization in inverse heat-conduction problems with internal heat release // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2014. Т. 87, № 5. - с. 1126- 1134.

[10] Diligenskaya A. N., Rapoport E. Y. Method of minimax optimization in the coefficient inverse heat-conduction problem // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2016. Т. 89, № 4. с. 1008-1013.

[11] Diligenskaya A. N. Solution of the retrospective inverse heat conduction problem with parametric optimization // High Temperature, 2018. Т. 56, № 3. с. 382-388.

Параметрическая оптимизация процессов нестационарной теплопроводности с двумя управляющими воздействиями

Ильина Н.А.
Самарский Государственный
Технический университет
Самара, Россия
ilina.natalyaa@yandex.ru

***Abstract* — The problem of time-optimal two-channel boundary conditions control by the temperature field of an unlimited plate is proposed. The non-uniformity of the temperature distribution in the plate thickness is taken into account. The boundary control actions are the values of external heat flows directed to the side surfaces of the plate. The description of the object obtained by the method of finite integral transformations, the formulation of problem and the method of solution are proposed. The proposed method is used the procedure of preliminary parameterization of controls and the subsequent reduction to the semi-infinite optimization problem. The solution of this problem is based on the alternance properties of desired parametric characteristics and additional information about a configuration of the temperature distribution curve depending on the value of the temperature deviation at the end of the heating process. The results and their analysis for different variants of the curve of the resulting temperature distribution of the titanium alloy plate are presented. The analysis of solutions of the two-channel control problem in comparison with the single-channel problem is also given. According to results the control of the process of non-stationary heat conductivity with two boundary control actions provides a less control process time and a higher accuracy of the final temperature distribution to required one.**

Ключевые слова — оптимальное управление, процесс нестационарной теплопроводности, принцип максимума Понтрягина, альтернансный метод, полубесконечная оптимизация.

Актуальная задача оптимизации режимов нагрева металлических полуфабрикатов перед последующими операциями пластической деформации в производственных комплексах обработки металла давлением [1] требует использования методов теории управления объектами с распределенными параметрами.

I. Постановка задачи

В качестве объекта управления рассматривается процесс нагрева неограниченной пластины (рис.1), температурное поле которой $Q(x,t)$ описывается в зависимости от пространственной координаты $x \in [0,R]$ и времени $t \in [0,T]$ линейным однородным уравнением теплопроводности следующего вида [2]:

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} = a\frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial x^2},\ x \in [0,R],\ t \in [0,T], \quad (1)$$

при начальных:

$$Q(x,0) = Q_0(x) = 0, \quad (2)$$

и граничных условиях 2-го рода:

$$\begin{aligned} -\lambda\frac{\partial Q(0,t)}{\partial x} &= g_{01}(t);\\ \lambda\frac{\partial Q(R,t)}{\partial x} &= g_{11}(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где a, λ – теплофизические постоянные, $g_{01}(t)$, $g_{11}(t)$ – сосредоточенные граничные управляющие воздействия, стеснённые заранее известными пределами их изменения:

$$g_{01\min} \le g_{01}(t) \le g_{01\max};\ g_{11\min} \le g_{11}(t) \le g_{11\max} \quad (4)$$

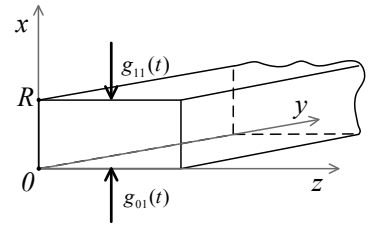


Рис. 1. Объект управления

Задача (1)-(3) описывает процесс управления температурным полем неограниченной пластины с двуканальным граничным управлением по величине внешнего теплового потока на её поверхностях.

В момент T окончания процесса управления требуется обеспечить заданную точность ε равномерного приближения конечного распределения температуры $Q(x,T)$ к заданному $Q^*(x) = Q^* = const > Q_0$:

$$\max_{x\in[0,R]} \left|Q(x,T) - Q^*\right| \le \varepsilon \quad (5)$$

В качестве критерия оптимальности рассматривается длительность процесса нагрева T в форме следующего интегрального функционала качества:

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

$$I = \int_0^T dt = T \to \min_{g_{01}(t), g_{11}(t)} \qquad (6)$$

Метод конечных интегральных преобразований [3, 4], приводит к описанию управляемой функции $Q(x,t)$ в (1) бесконечной системой дифференциальных уравнений для временных мод $\overline{Q}_n(\mu_n, t)$ разложения $Q(x,t)$ в сходящийся в среднем ряд по собственным функциям $\varphi_n(\mu_n, x)$ начально-краевой задачи (1)-(3):

$$\frac{d\overline{Q}_n(\mu_n,t)}{dt} = -\mu_n{}^2 \overline{Q}_n(\mu_n,t) + \frac{1}{\lambda E_n}\left(g_{01}(t) + g_{11}(t)\cos \pi n\right), \quad (7)$$

$$\overline{Q}_n(\mu_n,0) = \overline{Q}_0(\mu_n) = 0; \quad n = 1,2,\ldots;$$

$$Q(x,t) = \sum_{n=0}^{\infty} \overline{Q}_n(\mu_n,t)\,\varphi(\mu_n,x) \qquad (8)$$

Здесь $\varphi_n(\mu_n, x)$, собственные числа μ_n^2 и коэффициенты E_n определяются соотношениями [4]:

$$\varphi_n(\mu_n,x) = \frac{1}{E_n}\cos\left(\pi n \frac{x}{R}\right); \; \mu_n = \frac{\sqrt{a}}{R}\pi n; \; E_n = \begin{cases} \sqrt{\dfrac{R}{a}}, & n = 0; \\ \sqrt{\dfrac{R}{2a}}, & n = 1,2,\ldots \end{cases}$$

Интегрирование уравнений (7) в условиях (2) с последующей подстановкой результата в (8) приводит к следующей зависимости температурного поля от внешних воздействий по граничным условиям:

$$Q(x,t) = \frac{1}{Rc\gamma}\left[\int_0^t \left(g_{01}(\tau) + g_{11}(\tau)\right)d\tau + 2\sum_{n=1}^{\infty}\cos\left(\pi n \frac{x}{R}\right)\cdot \right.$$
$$\left. \cdot \int_0^t \left(g_{01}(\tau) + (-1)^n g_{11}(\tau)\right)\cdot e^{-\mu_n^2(t-\tau)}d\tau\right]. \qquad (9)$$

Таким образом, может быть сформулирована следующая задача оптимального по быстродействию управления.

Требуется определить такие программные управляющие воздействия $g_{01}^*(t)$, $g_{11}^*(t)$, стесненные ограничениями (4), которые переводят объект управления (7) из заданного начального состояния в требуемое конечное согласно (5), где $Q(x,T)$ определяется выражением (9) для $t = T$, при минимальном значении критерия оптимальности (6).

II. Параметризация управляющих воздействий

Предварительная параметризация управляющих воздействий позволяет получить параметрическое представление управляющих воздействий с точностью до вектора искомых параметров.

На основании необходимых условий оптимальности в форме принципа максимума Понтрягина оптимальное по быстродействию управление устанавливается в форме релейных функций времени, попеременно принимающих только свои предельно допустимые значения согласно (4) [5]:

$$g_{01}^*(t) = \frac{g_{01_{\max}} + g_{01_{\min}}}{2} + \frac{g_{01_{\max}} - g_{01_{\min}}}{2} sign M_1(t);$$
$$g_{11}^*(t) = \frac{g_{11_{\max}} + g_{11_{\min}}}{2} + \frac{g_{11_{\max}} - g_{11_{\min}}}{2} sign M_2(t), \qquad (10)$$

где $M_1(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\lambda E_n} \cos(\pi n)\cdot \psi_n^* \cdot exp(-\mu_n^2(T-t))$,

$M_2(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\lambda E_n}\cdot \psi_n^* \cdot exp(-\mu_n^2(T-t))$ и ψ_n^* - конечные значения $\psi_n(T)$ сопряженных переменных $\psi_n(t)$.

В соответствии с (10) $g_{01}^*(t)$ и $g_{11}^*(t)$ определяются в параметризованной форме $g_{01}^*(\Delta_0^{(N_0)}, t)$, $\Delta_0^{(N_0)} = \left(\Delta_{0i}^{(N_0)}\right)$, $i = \overline{1, N_0}$; $g_{11}^*(\Delta_1^{(N_1)}, t)$, $\Delta_1^{(N_1)} = \left(\Delta_{1i}^{(N_1)}\right)$, $i = \overline{1, N_1}$, с точностью до числа N_0 и N_1 и длительностей $\Delta_{0i}^{(N_0)}$ и $\Delta_{1i}^{(N_1)}$ интервалов постоянства оптимальных управлений:

$$g_{01}^*(\Delta_0^{(N_0)}, t) = \frac{g_{01_{\max}} + g_{01_{\min}}}{2} + (-1)^{j+1}\frac{g_{01_{\max}} - g_{01_{\min}}}{2},$$
$$\sum_{i=0}^{j-1}\Delta_{0i}^{(N_0)} < t < \sum_{i=0}^{j}\Delta_{0i}^{(N_0)}, \; j = \overline{1, N_0}, \; \Delta_{00} = 0;$$
$$g_{11}^*(\Delta_1^{(N_1)}, t) = \frac{g_{11_{\max}} + g_{11_{\min}}}{2} + (-1)^{j+1}\frac{g_{11_{\max}} - g_{11_{\min}}}{2}, \qquad (11)$$
$$\sum_{i=0}^{j-1}\Delta_{1i}^{(N_1)} < t < \sum_{i=0}^{j}\Delta_{1i}^{(N_{10})}, \; j = \overline{1, N_1}, \; \Delta_{10} = 0,$$

где в пределах первого интервала постоянства согласно ограничениям (4) далее принимается $g_{01}^*(t) = g_{01_{\max}}$, $g_{11}^*(t) = g_{11_{\max}}$ в рассматриваемой задаче нагрева пластины до температуры $Q^* > Q_0$.

С учетом полученного параметрического представления оптимальных по быстродействию управляющих воздействий (11) конечное температурное состояние (9) представляется в параметризованной форме $Q\left(x, \Delta_0^{(N_0)}, \Delta_1^{(N_1)}\right)$ путем подстановки управляющих воздействий вида (11) в (9) и вычислении интегралов в (9) при $t = T$. В частности, рассматривая

здесь и далее типичный случай двухинтервального управления $N_0 = N_1 = 2$, получим:

$$\begin{aligned} Q\left(x,\Delta_0^{(2)},\Delta_1^{(2)}\right) &= g_{01_{\max}}\Lambda_{01}(x,\Delta_{01}^{(2)}+\Delta_{02}^{(2)}) + \\ &+ (g_{01_{\min}} - g_{01_{\max}})\Lambda_{01}(x,\Delta_{02}^{(2)}) + \\ &+ g_{11_{\max}}\Lambda_{11}(x,\Delta_{11}^{(2)}+\Delta_{12}^{(2)}) + \\ &+ (g_{11_{\min}} - g_{11_{\max}})\cdot\Lambda_{11}(x,\Delta_{12}^{(2)}), \end{aligned} \quad (12)$$

где переходные функции объекта $\Lambda_{01}(x,t)$ и $\Lambda_{11}(x,t)$, представляющие собой реакции объекта на единичные ступенчатые воздействия по граничным управлениям $g_{01}(t)$ и $g_{11}(t)$, определяются следующими выражениями [4]:

$$\Lambda_{01}(x,t) = \frac{1}{\lambda}\left[\frac{at}{R} + \frac{1}{2}\left(\left(\frac{x}{R}\right)^2 - \frac{1}{3}\right) - 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^n}{\pi^2 n^2}\cos\left(\frac{\pi n x}{R}\right)\cdot e^{-\mu_n^2 t}\right];$$

$$\Lambda_{11}(x,t) = \frac{1}{\lambda}\left[\frac{at}{R} + \frac{1}{2}\left(\left(\frac{R-x}{R}\right)^2 - \frac{1}{3}\right) - 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^n}{\pi^2 n^2}\cos\left(\frac{\pi n(R-x)}{R}\right)\cdot e^{-\mu_n^2 t}\right].$$

Критерий оптимальности (6) с учетом (11) представляется также в виде простой суммы длительностей отдельных интервалов постоянства оптимального управления с учетом одинаковой продолжительности процесса управления для обоих управляющих воздействий (рис.2):

$$I = \Delta_{01}^{(2)} + \Delta_{02}^{(2)} = \Delta_{11}^{(2)} + \Delta_{12}^{(2)} \to min\,. \quad (13)$$

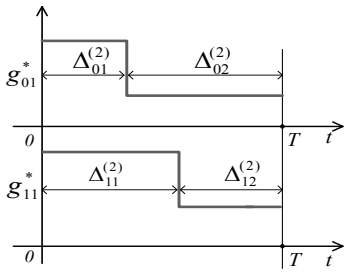


Рис. 2. Иллюстрация оптимального по быстродействию граничного управления

В соответствии с рис.2 в условиях равенства $\Delta_{01}^{(2)} + \Delta_{02}^{(2)} = \Delta_{11}^{(2)} + \Delta_{12}^{(2)} = T$ в качестве трех независимо варьируемых параметров можно рассматривать $\Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{01}^{(2)}$ или $\Delta_{01}^{(2)}, \Delta_{02}^{(2)}, \Delta_{11}^{(2)}$. Тогда в первом случае следует принять $\Delta_{02}^{(2)} = \Delta_{11}^{(2)} + \Delta_{12}^{(2)} - \Delta_{01}^{(2)}$, а во втором $\Delta_{12}^{(2)} = \Delta_{01}^{(2)} + \Delta_{02}^{(2)} - \Delta_{11}^{(2)}$.

Условие (5) оценки конечного распределения температур в параметризованной форме примет следующий вид:

$$\Phi\left(\Delta_0^{(2)},\Delta_1^{(2)}\right) = \max_{x\in[0,R]}\left|Q\left(x,\Delta_0^{(2)},\Delta_1^{(2)}\right) - Q^*\right| \le \varepsilon, \quad \varepsilon > 0, \quad (14)$$

где $Q\left(x,\Delta_0^{(2)},\Delta_1^{(2)}\right)$ определяется по формуле (12).

Таким образом, производится точная редукция исходной задачи к *задаче полубесконечной оптимизации* (ЗПО) (13)-(14) на минимум целевой функции (13) конечного числа переменных $\Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}$ с бесконечным числом ограничений (14) для всех точек $x \in [0,R]$ [5,6].

III. Решение задачи полубесконечной оптимизации

Задача (13)-(14) разрешима только для $\varepsilon \ge \varepsilon_{\min}^{(2)}$ в (17), где $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ – минимально достижимая величина ε в рассматриваемом классе граничных управлений:

$$\varepsilon_{\min}^{(2)} = \min_{\Delta_0^{(2)},\Delta_1^{(2)}}\left\{\max_{x\in[0,R]}\left|Q\left(x,\Delta_0^{(2)},\Delta_1^{(2)}\right) - Q^*\right|\right\} \quad (15)$$

Решение задачи (13)-(14) находится с помощью альтернансного метода, согласно которому это решение при достаточно малостеснительных допущениях обладает базовыми альтернансными свойствами [5, 6].

Основное свойство заключается в том, что число точек $x_j^0 \in [0,R],\ j = \overline{1,R_x}$, в которых достигаются предельно допустимые абсолютные отклонения $\left|Q\left(x,\Delta_0^{(2)},\Delta_1^{(2)}\right) - Q^*\right|$ в (14), равные ε, оказывается при оптимальных значениях $\Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}$ равным числу всех неизвестных в ЗПО (13), (14), включая длительности интервалов постоянства $\Delta_{0i}^{(2)}, \Delta_{1i}^{(2)}, i = 1,2$ и величину минимакса $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ при $\varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(2)}$ в (15).

Иначе говоря, на отрезке [0,R] найдутся R_x точек $x_j^0 \in [0,R],\ j = \overline{1,R_x}$, в которых выполняются равенства:

$$\left|Q\left(x_j^0,\Delta_0^{(2)},\Delta_1^{(2)}\right) - Q^*\right| = \varepsilon,\ j = \overline{1,R_x} \quad (16)$$

где количество точек R_x определяется из соотношений:

$$R_x = \begin{cases} s, & \varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(2)}; \\ s+1, & \varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}. \end{cases} \quad (17)$$

Здесь s – число свободно варьируемых параметров в составе $\Delta_0^{(N_0)}$, $\Delta_1^{(N_1)}$. В условиях одинаковой длительности процесса управления для обоих управляющих воздействий число s искомых параметров

принимается равным: $s = N_0 + N_1 - 1 = 2 + 2 - 1 = 3$. Следовательно, при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$:

$$R_x = s + 1 = 4, \qquad (18)$$

то есть система соотношений (16) с учетом (18) оказывается замкнутой относительно всех параметров процесса управления, включая заведомо неизвестную величину $\varepsilon_{\min}^{(2)}$.

В дальнейшем основное затруднение состоит в том, что равенствам (16) формально соответствует множество вариантов по форме кривой пространственного распределения $Q\left(x, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}\right)$. Для однозначного определения вида этой кривой нужно установить знаки разностей $Q\left(x, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}\right) - Q^*$ в каждом из уравнений в (16) и найти координаты точек x_j^0 . Для этого нужно определить конфигурацию кривой оптимального температурного распределения на отрезке $[0, R]$ э x при двухинтервальном граничном управлении, устанавливаемой на основании физических закономерностей процессов нестационарной теплопроводности в зависимости от величины ε. Анализ этих закономерностей [5, 6] приводит к двум вариантам по форме этой кривой в условиях $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ в (17) (рис.3).

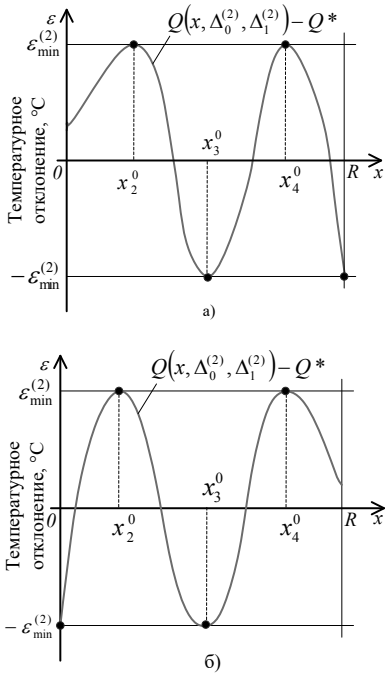


Рис. 3. Форма кривой результирующего температурного распределения при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$

На рис.2.а в качестве независимых параметров рассматриваются $\Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{01}^{(2)}$, а на рис.2.б, соответственно, $\Delta_{01}^{(2)}, \Delta_{02}^{(2)}, \Delta_{11}^{(2)}$. Представленным формам кривой результирующих температурных состояний, указанным на рис.3.а и рис.3.б отвечают соответственно системы (19) и (20), составляемые на основании равенств (16). Каждая из систем дополняется условиями существования экстремума функции $Q\left(x, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}\right) - Q^*$ во внутренних точках x_2^0, x_3^0, x_4^0 отрезка $[0, R]$ для определения их координат.

$$\begin{aligned}
&Q\left(x_2^0, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}\right) - Q^* = \varepsilon_{\min}^{(2)};\\
&Q\left(x_3^0, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}\right) - Q^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)};\\
&Q\left(x_4^0, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}\right) - Q^* = \varepsilon_{\min}^{(2)};\\
&Q\left(R, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}\right) - Q^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)};\\
&\frac{\partial Q\left(x_j^0, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}\right)}{\partial x} = 0,\ j = 2,3,4.
\end{aligned} \qquad (19)$$

$$\begin{aligned}
&Q\left(0, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}\right) - Q^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)};\\
&Q\left(x_2^0, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}\right) - Q^* = \varepsilon_{\min}^{(2)};\\
&Q\left(x_3^0, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}\right) - Q^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)};\\
&Q\left(x_4^0, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}\right) - Q^* = \varepsilon_{\min}^{(2)};\\
&\frac{\partial Q\left(x_j^0, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}\right)}{\partial x} = 0,\ j = 2,3,4.
\end{aligned} \qquad (20)$$

В итоге получаем две системы семи уравнений относительно семи неизвестных: $\Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{01}^{(2)}, \varepsilon_{\min}^{(2)}, x_2^0, x_3^0, x_4^0$ в (19) и $\Delta_{01}^{(2)}, \Delta_{02}^{(2)}, \Delta_{11}^{(2)}, \varepsilon_{\min}^{(2)}, x_2^0, x_3^0, x_4^0$ в (20). Эти системы решаются стандартными численными методами.

Исходные данные для рассматриваемого примера представлены в таблице 1. Решение систем уравнений производилось с учетом первых 10 членов бесконечного ряда в (12).

ТАБЛИЦА I. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

Обозначение	Параметр	Значение	Единица измерения
-	Материал	Титановый сплав	-
R	Толщина пластины	0.2	м
Q_0	Начальная температура	0	$^\circ C$
Q^*	Требуемая конечная температура	960	$^\circ C$
λ	Коэффициент теплопроводности	35	$Вт/м^2 \cdot ^\circ C$
a	Коэффициент температуропроводности	$4.34 \cdot 10^{-6}$	$м^2/с$
$g_{01_{\max}}$	Максимальная величина теплового потока 01	416000	$Вт/м^2$
$g_{01_{\min}}$	Минимальная величина теплового потока 01	-62400	$Вт/м^2$
$g_{11_{\max}}$	Максимальная величина теплового потока 11	208000	$Вт/м^2$
$g_{11_{\min}}$	Минимальная величина теплового потока 11	-31200	$Вт/м^2$

Для численного решения систем уравнений (19),(20) широко применялась программная среда MATLAB [7,8].

Применительно к этим исходным данным найдены решения: $\Delta_{11}^{(2)}$ = 1980 с, $\Delta_{12}^{(2)}$ = 223 с, $\Delta_{01}^{(2)}$ =1981 с, $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ = 6.8 °C, x_2^0 = 0.03 м, x_3^0 = 0.1 м, x_4^0 = 0.16 м и $\Delta_{01}^{(2)}$ = 1246 с, $\Delta_{02}^{(2)}$ = 372 с, $\Delta_{11}^{(2)}$ = 1554 с, $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ = 14.8 °C, x_2^0 = 0.039 м, x_3^0 = 0.12 м, x_4^0 = 0.19 м систем уравнений (19) и (20) соответственно. Кривые результирующего температурного распределения изображены на рис. 4.

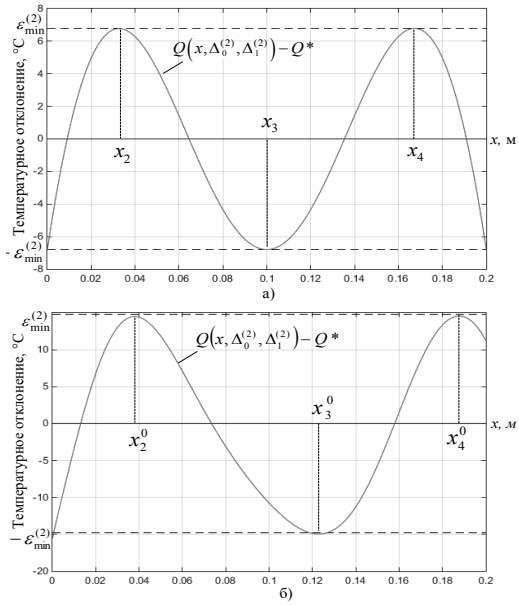


Рис. 4. Кривые температурного распределения при оптимальном по быстродействию управлении при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$

Как видно, вид кривой результирующего температурного распределения (рис.4) совпадает с кривой, представленной на рис.3. Оптимальным по критерию быстродействия следует считать решение системы уравнений (20), а по предельно достижимой точности нагрева – решение системы (19).

Теперь, когда величина $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ найдена, можно рассмотреть случай, когда $\varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(2)}$ в (17), к примеру, применительно к системе (19).

Тогда число точек R_x и, следовательно, число уравнений согласно (17) будет равным:

$$R_x = s = 3\,.$$

Можно показать, что вид кривой результирующего температурного распределения будет совпадать с кривой, представленной на рис.3.а, за тем лишь исключением, что отклонение в точке $x=R$ не достигает предельно допустимой величины $\left|\varepsilon_{\min}^{(2)}\right|$ [5, 6]. На этом основании соответствующая система уравнений вместо (19) будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
&Q\left(x_2^0, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}\right) - Q^* = \varepsilon;\\
&Q\left(x_3^0, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}\right) - Q^* = -\varepsilon;\\
&Q\left(x_4^0, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}\right) - Q^* = \varepsilon;\\
&\frac{\partial Q\left(x_j^0, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}\right)}{\partial x} = 0,\ j = 2,3,4.
\end{aligned} \qquad (21)$$

Исходя из условия $\varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(2)} = 6.8$, примем величину $\varepsilon = 20$ в (21) и найдем решение системы (21) из шести уравнений с шестью неизвестными: $\Delta_{11}^{(2)}$, $\Delta_{12}^{(2)}$, $\Delta_{01}^{(2)}$, x_2^0, x_3^0, x_4^0.

Применительно к исходным данным, указанным в таблице 1, найдены решения: $\Delta_{11}^{(2)}$ = 1977 с, $\Delta_{12}^{(2)}$ = 158 с, $\Delta_{01}^{(2)}$ =1976 с, x_2^0 = 0.02 м, x_3^0 = 0.1 м, x_4^0 = 0.179 м. Кривая результирующего температурного распределения $Q\left(x_j^0, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}\right) - Q^*$ изображена на рис.5.

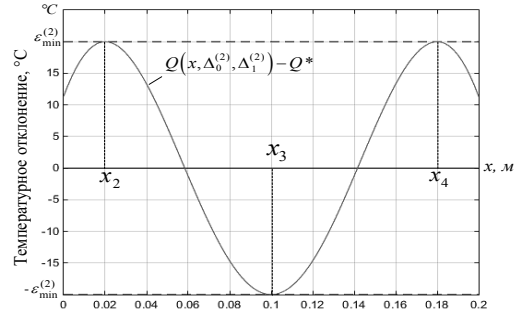


Рис. 5. Кривая температурного распределения при оптимальном по быстродействию управлении при $\varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(2)}$

Для сравнения решалась задача одноканального управления как со стороны внешнего теплового потока $g_{01}(t)$ на границе $x=0$, так и отдельно для случая, когда управляющее воздействие $g_{11}(t)$ сосредоточено на границе $x=R$. Тогда вместо систем (19) и (20) имеет место система четырех уравнений относительно четырех неизвестных: $\Delta_{01}^{(2)}$, $\Delta_{02}^{(2)}$, $\varepsilon_{\min}^{(2)}$, x_2^0 или $\Delta_{11}^{(2)}$, $\Delta_{12}^{(2)}$, $\varepsilon_{\min}^{(2)}$, x_2^0.

$$\begin{aligned}
&Q\left(0, \Delta_j^{(2)}\right) - Q^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)};\\
&Q\left(x_2^0, \Delta_j^{(2)}\right) - Q^* = \varepsilon_{\min}^{(2)};\\
&Q\left(R, \Delta_j^{(2)}\right) - Q^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)};\\
&\frac{\partial Q\left(x_2^0, \Delta_j^{(2)}\right)}{\partial x} = 0,\ j = 0,\ 1.
\end{aligned} \qquad (22)$$

Численные результаты решения для двух случаев одноканального управления: $\Delta_{11}^{(2)} = 4031$ с, $\Delta_{12}^{(2)} = 892$ с, $\varepsilon_{\min}^{(2)} = 13$ °C, $x_2^0 = 0.65$ м и $\Delta_{01}^{(2)} = 2084$ с, $\Delta_{02}^{(2)} = 886$ с, $\varepsilon_{\min}^{(2)} = 27$ °C, $x_2^0 = 0.135$ м.

На рис.6 и рис.7 приведены два варианта пространственного распределения температуры по толщине пластины в конце оптимального процесса с отклонениями $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ от заданного состояния при одноканальном управлении.

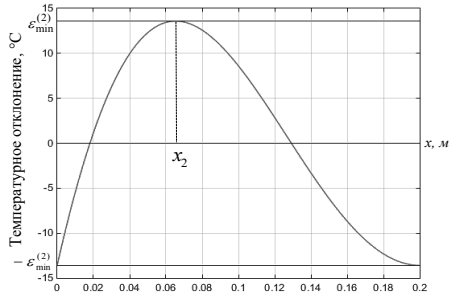


Рис. 6. Распределение температуры при действии теплового потока на границе $x=0$

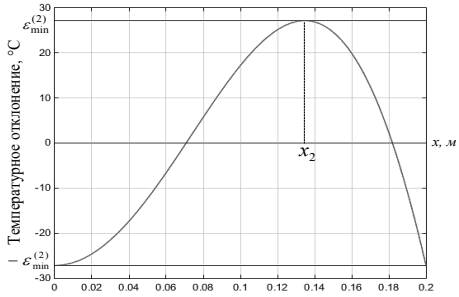


Рис. 7. Распределение температуры при действии теплового потока на границе $x=R$

Как показывает сравнительный анализ, при одноканальном управлении $g_{01}(t)$ или $g_{11}(t)$ предельно достижимая точность нагрева в классе двухинтервальных управляющих воздействий уменьшается в 1,5-2 раза, а при одинаковой точности нагрева увеличивается длительность оптимального процесса.

IV. Заключение

Главный вывод, полученный в результате решения данной задачи, заключается в том, что управление процессом нестационарной теплопроводности с двумя граничными управляющими воздействиями обеспечивает меньшее время процесса управления и более высокую точность приближения конечного распределения температуры к заданному.

Важно отметить, что представленный подход, используемый применительно к аналитической модели описания процесса нагрева, может быть распространен на широкий класс задач, описываемых нелинейными численными моделями.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю Э.Я. Рапопорту за ценные замечания и полезные рекомендации при исследовании представленной задачи.

Список литературы

[1] Плешивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я. Совместная оптимизация по системным критериями качества взаимосвязанных процессов технологической теплофизики в производственных комплексах обработки металла давлением // Автометрия, 2013. Т. 49. №6. с.3-13.

[2] Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел – М.: Высшая школа, 2001. 550с.

[3] Мартыненко Н.А., Пустыльников Л.М. Конечные инженерные преобразования и их применение к исследованию систем с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1986, 303с.

[4] Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. - М.: Высшая школа, 2003. – 299 с.

[5] Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009. – 677с.

[6] Рапопорт Э.Я. Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. 336с.

[7] Потемкин В. Г. Введение в Matlab [Электронный ресурс]. — М. : Softline Co, 2001. — Режим доступа: http://matlab.exponenta.ru/ml/book1/index.php(accessed March 02, 2019).

[8] MATLAB.Exponenta [Электронный ресурс]: Optimization Toolbox 2.2 Руководство пользователя / авт. А.Г. Трифонов. – Электрон. и текстовые данные. - Режим доступа: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_1/, свободный. – Заглавие с экрана.

Проекционный метод оптимизации динамики управления в конечномерных и функциональных пространствах

Козлов В.Н.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Санкт-Петербург, Россия
saiu@ftk.spbstu.ru

***Abstract* — The method of control synthesis based on finite-dimensional optimization projectors in the L_2 space of vector functions is formulated.**

Ключевые слова — Orthogonal projectors, optimization in spaces of vector-functions, quasi-analytical solutions.

I. Введение

Современные технологические процессы и системы управления ими характеризуются сложностью задач и ограничений в связи с расширением функциональных требований. В статье сформулированы обобщенные проекционные операторы, которые могут использоваться для оптимизации ограниченных управлений и координат динамических объектов на основе программируемых в математической форме ограничений типа линейных равенств и неравенств. Для вычисления управлений используется «погружение» обобщенных задач в базовые задачи оптимизации, сформулированные в [1–4]. Ограничения и функционалы базовых задач оптимизации используются в качестве математической программируемой среды, расширяющей возможности приложений базовых операторов для синтеза управлений.

II. Базовые задачи условной оптимизации и их операторные обобщения первого типа

Обобщения задач и операторов оптимизации рассмотрены на примере обобщения базовой задачи квадратичной условной минимизации [1, 3, 4]: вычислить вектор

$$x_* = \left(x_{k*}\,|u_{k*}\right)^T = arg\,min\left\{\varphi(x) = \|x - C\|_2^2,\right.$$
$$Q = Q^T > 0\,|Ax = b, \qquad (1)$$
$$\left.A \in \mathbb{R}^{m\times n},\ rang\,A = m,\ x^T x \le r^2\right\} \in \mathbb{R}^n.$$

Как известно, квазианалитические решения задач типа (1) с линейными или квадратичными функционалами представляется проекционными квазилинейными операторами. Обобщения задач оптимизации типа (1) и их аналогов, а также проекционных операторов далее могут быть ориентированы на задачи синтеза систем управления двух классов:

1) Системы обобщенной оптимальной «стабилизации положения равновесия» для координат управления на основе минимизациикватратичных функционалов и ограничений, которые программируются в математической форме в базовой задаче типа (1). Системы этого класса предназначены для стабилизации координат объектов в стационарных (неизменных во времени) положениях равновесия.
2) Системы стабилизации программных заданий с обобщенной оптимальной «программируемой динамикой» на основе минимизации квадратичных функционалов и ограничений общего вида. Системы данного класса должны стабилизировать отклонения координат объекта управлениями от программных вектор-функций.

Далее рассмотрены два обобщения операторов оптимальной стабилизации положения равновесия систем управления с операторами, заданными в числовых или функциональных пространствах [3 – 5]:

a. Программные числовые векторы C_k, $k \in \mathbb{N}$, координаты, управления и операторы дискретных систем времени принадлежат евклидову пространству числовых векторов $C_k \in \mathbb{R}^n_2$, устойчивость (сходимость) которых исследована в [3]. Второй пример обобщения может быть связан с пространством вектор-функций с квадратично суммируемыми координатами, в которых программный вектор $C_k \in \mathbb{R}^n\left(l^2\right)$.

b. Программные вектор-функции $C(t)$, $t \in \mathbb{R}^+$, обобщаемые на случай принадлежности координат, управлений и операторов пространству вектор-функций $C(t) \in \mathbb{R}^n\left(L^2[0, T]\right)$ или пространству непрерывных функций с равномерной нормой, например, $C(t) \in \mathbb{R}^n\left(C^s[0, T]\right)$.

Для указанных выше типов пространств могут использоваться математические модели в виде прямых и обратных операторов динамических систем, прообразы и образы которых принадлежат алгебраической структуре одного типа. Последнее соответствует «принципу сохранения алгебраических структур под действием операторов» в функциональном анализе.

Таким образом, возможные обобщения могут отличаться по классам. Обобщения первого класса

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

связаны с переходом от векторных моделей в пространствах над полем вещественных чисел к соответствующим линейным моделям в пространствах вектор-функций.

Обобщения могут также использовать «текущую линеаризацию» нелинейных моделей процессов в темпе управления. При этом линейные математические модели объектов задаются линейными многообразиями ограничений в экстремальных задачах.

Обобщения первого класса связаны с дополнительными требованиями к динамике объектов, которые можно учесть в расширении линейного многообразия задачи (1) за счет математических дополнений, реализующих технологические требования. В результате можно утверждать, что обобщения моделей или требований к объекту может быть учтено в структуре линейных многообразий, которые в «математической форме» программируются при сохранении класса задач оптимизации.

Обобщения второго типа основаны на переходе к формулировке задач в пространствах вектор-функций и к соответствующим обобщениям параметров функционалов качества и ограничений типа равенств и неравенств. Модели объектов, используемые для синтеза управлений в функции программных движений, заданных в функциональных пространствах с учетом ограничений в виде пересечения линейного многообразия и эллипсоида задач оптимизации.

Обобщение задач первого типа основано на обобщении задачи (1) в части ограничений типа неравенств в конечномерном евклидовом пространстве. Обобщенная задача имеет вид: вычислить числовой экстремальный вектор

$$x_* = arg\ min\Big\{\varphi(x) = \| x - C_k \|_2^2,$$
$$c \neq 0_n \ | Ax = b,\ A \in \mathbb{R}^{m\times n},$$
$$rang\ A = m,\ x^T Rx \le r^2,\ R = R^T > 0\Big\} \in \mathbb{R}_2^n. \qquad (2)$$

Обобщенная задача для (2) с расширенными свойствами функционала и ограничений-неравенств имеет вид: вычислить вектор

$$x_* = arg\ min\Big\{\varphi(x) = x^T Qx,$$
$$Q = Q^T > 0\ | Ax = b,\ A \in \mathbb{R}^{m\times n},$$
$$rang\ A = m,\ x^T Rx \le r^2,\ R = R^T > 0\Big\} \in \mathbb{R}_2^n, \qquad (3)$$

где функционал и ограничения в (3) определены квадратичными формами, которые обобщают базовую задачу (1).

III. Цели, ограничения и операторы для задач оптимальной стабилизации на основе обобщений второго типа

Программируемые математические модели для реализации «обобщенной управляющей среды управления» иллюстрированы для задач, в которых управления, вычисляются на основе решения обобщенных задач типа (3).

Обобщенные задачи условной оптимизации с квадратичными функционалами общего вида могут быть сведены к базовым задачам минимизации нормы на основе расширения ограничений-равенств в (3). Для этой задачи можно ввести два (или конечное число) дополнительных вектора

$$y = Q^{1/2}x,\quad v = R^{1/2}x, \qquad (4)$$

которые с учетом вектора $x \in \mathbb{R}^n$ образуют обобщенный вектор

$$z = (x,\ y,\ v)^T \in \mathbb{R}^{3n}. \qquad (5)$$

Тогда обобщенная базовая задача вычисления управлений для оптимальной стабилизации положения равновесия с учетом (3) - (5) примет вид: вычислить числовой вектор

$$z_* = arg\ min\Big\{\varphi(x) = z^T \bar{Q} z,$$
$$z = (x,\ y,\ v)^T,\ Q = Q^T > 0\ |$$
$$\bar{A}z = \begin{bmatrix} A & 0_{m\times n} & 0_{m\times n} \\ Q^{1/2} & -E_n & 0_{n\times n} \\ R^{1/2} & 0_{n\times n} & -E_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ v \end{bmatrix} = \qquad (6)$$
$$= \begin{bmatrix} \bar{b} \\ Q^{1/2}C \\ Q^{1/2} \end{bmatrix} = b,\ \bar{Q} = \begin{bmatrix} E_n & 0_{n\times n} & 0_{n\times n} \\ 0_{n\times n} & E_n & 0 \\ 0_{n\times n} & 0_{n\times n} & E_n \end{bmatrix},$$
$$z^T z = \|x\|_2^2 + \|y\|_2^2 + \|v\|_2^2 \le \bar{r}^2\Big\} \in \mathbb{R}^{3n}.$$

С учетом обобщенных переменных $z \in \mathbb{R}^{3n}$ ограничения-неравенства в базовой задаче оптимизации (6) представляются неравенствами вида

$$z^T z = \| z \|_2^2 = \| x \|_2^2 + \| y \|_2^2 + \| v \|_2^2 =$$
$$= \| x \|_2^2 + \| Q^{1/2}x \|_2^2 + \| R^{1/2}x \|_2^2 \le \qquad (7)$$
$$\le \| x \|_2^2 + \| Q \|_2 \times \| x \|_2^2 + \| R \|_2^2 \times \|x\|_2^2 = \bar{r}^2,$$

где обобщенный скалярный параметр

$$\bar{r}^2 = r^2 \left(1 + \| Q \|_2 + \| R \|_2\right)^{-1}.$$

Таким образом, «принцип математического программирования целей и ограничений», реализуемый в конечномерном пространстве, определяет обобщенные требования к системам управления при сохранении класса операторов оптимизации. При этом управления могут быть вычислены на основе базовых проекционных методов для задач с квадратичным функционалом качества. Обобщенная задача (6), (7) может быть решена оператором минимизации [2].

IV. Обобщенная задача и метод ее решения для программной стабилизации объектов управления в пространстве вектор-функций.

Пусть динамика управляемого по Р. Калману объекта при ограничениях на координаты и управления [1, 2] в пространстве вектор-функций $\mathbb{R}^n\left(L^2[0,T]\right)$ задана линейным дифференциальным оператором

$$x'(t) = Ax(t) + Bu(t),\ x(t_0) = x_0, \tag{8}$$

где класс вектор-функций задан равенствами

$$x(t) \in \mathbb{R}^n\left(L^2[0,T]\right),\ u(t) \in \mathbb{R}^m\left(L^2[0,T]\right),$$

числовые матрицы в (8) $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n\times m}$.

Требуется синтезировать вектор оптимальных управлений в заданном классе функций для оптимальной стабилизации положения равновесия данной системы в смысле минимума локального функционала

$$\varphi = \| z(t) \|^2_{L^2[0,T]} \in \mathbb{R}, \tag{9}$$

заданном на векторе

$$z(t) \triangleq \left[x(t) \,|\, u(t)\right] \in \mathbb{R}^{n+m}\left(L^2[0,T]\right),$$

включающем вектор координат состояний и управлений модели динамического объекта типа (8).

Для синтеза стабилизирующих управлений будет использован обратный оператор для (9), определяющий прогнозы координат состояний и управлений на основе решения задачи для оператора (1), как оператор Коши

$$x(t) = e^{At}x^0 + \int_0^t e^{A(t-\tau)}Bu(\tau)d\tau. \tag{10}$$

Задача синтеза формулируется на основе минимизации функционала

$$\begin{aligned}\varphi &= \| z(t) - C_z(t) \|^2_{\mathbb{R}^n\left(L^2[0,T]\right)} = \\ &= \int_0^T \left[z(t) - C_z(t)\right]^T \left[z(t) - C_z(t)\right] dt\end{aligned} \tag{11}$$

при ограничениях типа равенств и неравенств

$$Az(t) = b(t), \quad \| z(t) \|^2_{\mathbb{R}^n\left(L^2[0,T]\right)} \le r^2, \tag{12}$$

которые в $\mathbb{R}^n\left(L^2[0,T]\right)$ определяют множество в виде пересечения линейного многообразия и шара. Тогда в пространстве расширенных вектор-функций

$$z(t) = \left[x(t) \,|\, u(t)\right]^T \in \mathbb{R}^{n+m}\left(L^2[0,T]\right)$$

линейное многообразие определено равенством

$$\begin{aligned}Az(t) &\triangleq \left[E_n \,\middle|\, -\int_0^t e^{A(t-\tau)}Bd\tau\right] \times \begin{bmatrix} x(t) \\ u(\tau_*) \end{bmatrix} = \\ &= e^{At}x^0 \triangleq b(t),\end{aligned} \tag{13}$$

конечномерном пространстве вектор-функций.

Шар ограничений-неравенств, аппроксимирующий параллелепипед или эллипсоид этого пространства, определен квадратичным неравенством

$$\| z(t) \|^2_{\mathbb{R}^n\left(L^2[0,T]\right)} \triangleq \int_0^T z^T(t)z(t)d\tau \le r^2 < \infty. \tag{14}$$

Тогда квадратичный функционал качества, определенный на обобщенных векторах для задачи локально оптимальной программной стабилизации, примет вид

$$\begin{aligned}\varphi &= \left\| z(t) - C_z(t) \right\|^2_{\mathbb{R}^{n+m}\left(L^2[0,T]\right)} = \\ &= \left\| \left[x(t) \,|\, u(\tau)\right]^T - C_{xu}(t) \right\|^2_{\mathbb{R}^{n+m}\left(L^2[0,T]\right)},\end{aligned} \tag{15}$$

где $C_z(t) = C_{xu}(t) \in \mathbb{R}^n\left(L^2[0,T]\right)$-целевой стабилизируемый обобщенный вектор задачи локально оптимальной программной стабилизации. Если вектор-функция программного воздействия удовлетворяет условию

$$C_z(t) = C_{xu}(t) = 0_{n+m} \in \mathbb{R}^{n+m}\left(L^2[0,T]\right) \tag{16}$$

то задача (10) преобразуется из «задачи квадратичной программной стабилизации» в задачу «оптимальной стабилизации нулевого положения равновесия» динамического объекта (8) для системы с обратной связью.

Таким образом, на основе соотношений (9) – (16) можно формулировать две основные задачи вычисления управлений:

1) Задача синтеза управлений для локально оптимальной системы программной стабилизации, которая конструируется с помощью задачи конечномерной оптимизации.
2) Задачи вычисления управлений для локальной или интервальной оптимальной стабилизации нулевого положения или программного вектора $C_z(t)$ которые конструируются на основе (9) – (16) в бесконечномерном пространстве.

На основании целей задачи локально оптимальной стабилизации формулируется задача синтеза: вычислить оптимальный обобщенный вектор типа $z(t)$,

определенный равенством (9), заданный на траекториях объекта(10) при ограничениях (11) в форме, которые в $\mathbb{R}^{n+m}\left(L^2[0,T]\right)$ имеют вид (13), (14).

Оптимальные управления вычисляются на основе оператора объекта, который для кусочно-постоянных управлений

$$u(kh)=\sum_{s=0}^{kh}u(t_s), \tag{17}$$

и с учетом свойства аддитивности интеграла в (10) принимает вид

$$\begin{aligned} x(t_k)\triangleq x(kh)= \\ =e^{Akh}x^0+\int_0^{kh}e^{A(kh-\tau)}d\tau B\sum_{s=0}^{kh}u(t_s)= \\ =e^{At}x^0+A^{-1}\left(e^{Akh}-E_n\right)B\sum_{s=0}^{kh}u(t_s). \end{aligned} \tag{18}$$

В результате задача синтеза как задача конечномерной условной минимизации имеет вид: вычислить счетное множество управлений в виде кусочно–постоянных вектор-функций $u_*(kh)$ которые на дискретном интервале прогноза $k\in[0,\ p]\in\mathbb{N}$, обеспечивают минимум функционала

$$\begin{aligned} u_*(kh)=T_u\,arg\,min\{\varphi= \\ =\left\|z(kh)-C_z(kh)\right\|^2_{\mathbb{R}^n\left(L^2[0,T]\right)}\Big|Az(kh)= \\ =b\left(x(kh)\right)= \\ =x(kh)-A^{-1}\left(e^{Akh}-E_n\right)B\sum_{s=0}^{kh}u(t_s)= \\ =e^{Akh}x^0,\ \left\|z(kh)\right\|\le r^2\ \Big\}, \end{aligned} \tag{19}$$

где $T_u\in\mathbb{R}^{m\times(n+m)}$ «выделяет» из $z(kh)$ вектор управлений $u_*(kh)$. Задача типа (19) решена операторами (13) и (14) для задачи: вычислить вектор

$$\begin{aligned} x_*=arg\,min\Big\{\varphi\ (x)=\|x-C\|_2^2\ \big|Ax=b, \\ A\in\mathbb{R}^{m\times n},\ rang\,A=m,\ x^Tx\le r^2\Big\}\in\mathbb{R}^n, \end{aligned} \tag{20}$$

где C вектор ограничен: $0<\delta_c^2\le\|C\|_2^2\le\bar{\delta}_c^2\le r^2-r_c^2$ для разделения ресурсов программной и стабилизирующей компонент.

Утверждение. Пусть (20) – корректная задача, пересечение линейного многообразия с шаром – не пусто и выполнены условия [3,4]:

1) Решение задачи (20) в силу «принципа граничных лагранжевых экстремумов» и «сужения допустимой области» задано выпуклой линейной комбинацией образов для регуляризованных ортогональных проекторов

$$\begin{aligned} z_*=\left(1-\theta_*\right)z_3(\eta_+)+\theta_*z_3(\eta_-)= \\ =P^+b(t)+\left(1-2\theta_*\right)P^0C(t)\eta. \end{aligned} \tag{21}$$

2) Лагранжевы векторы $x_3(\eta_+)$ и $x_3(\eta_-)$ в (21) принадлежат пересечению линейного многообразия (подпространства) и сферы как границы шара в (20), и определены ортогональными проекторами [3, 4]

$$z_{3\pm}=z_3(\pm\eta)=P^+b(t)\pm P^0C(t)\rho^{-1}\alpha^{1/2}, \tag{22}$$

$$P^+=A^T\left(AA^T\right)^{-1},$$

$$P^0=E_n-P^+A,\ \eta=(\alpha/\rho)^{1/2},$$

$$\rho=\left\|P^0C(t)\right\|_{\mathbb{R}^{m\times(n+m)}\left(L^2\right)},$$

$$\alpha=r^2-\left\|P^+b(t)\right\|^2_{\mathbb{R}^{m\times(n+m)}\left(L^2\right)},$$

$$\rho=\left\|P^0C(t)\right\|^2_{\mathbb{R}^{m\times(n+m)}\left(L^2\right)}.$$

Тогда для оптимальности решения (21), (22) необходимо и достаточно, чтобы оптимальный параметр в них был задан равенством

$$\theta_*=P(\theta_0)=0{,}5\left(|\theta_0|-|\theta_0-1|+1\right)\in[0,\ 1],$$

где параметры имеют вид

$$\theta_0=0{,}5\left(1-\eta^{-1}\right),\eta^{-1}=\sigma=(p/a)^{1/2},$$

$$\alpha=r^2-b^T\left(AA^T\right)^{-1}b,\rho=C^TP^0C.$$

Для задачи локально оптимальной стабилизации равновесия функционал следует из (21) при $C(t)=0$ а вектор оптимальных управлений имеет вид $x_*=P^+b(t)$ т.к. второе слагаемое в (22) равно нулю в силу $C(t)=0$

Результаты использованы в задачах оптимизации управления частотой и мощностью энергосистем, в гидромеханике, при анализе теплопроводности в твердых многослойных объектах и др.

Список литературы

[1] Козлов В.Н. Метод нелинейных операторов в автоматизированном проектировании динамических систем. Л.: Изд-во Ленингр. гос. ун-та им. А. А. Жданова, 1986. – 166 с.

[2] Kozlov V.N. The Metod of Minimization of Linear Functionals Based on Compakt Sets. Proceedings of the international workshop on computer science and information technologies (CSIT 2010), Russia, Moskov-Saint-Petersburg, Russia, 2010. Volume 2. pp. 157–159.

[3] Козлов В.Н. Негладкие системы, операторы оптимизации и устойчивость энергообъединений. Изд-во Санкт-Петербургского политех-нического университета. СПб.: 2012. 177 с.

[4] Козлов В.Н. Проекционный метод оптимизации оптимальных ограниченных управлений динамических систем. Издательско-полиграфи-ческая ассоциация вузов. СПб.: 2018.–190 с.

[5] Козлов В.Н., Ефремов А.А. Введение в функциональный анализ. Издательско-полиграфическая ассоциация вузов. СПб.: 2018. – 79 с.

Сравнительная оценка эффективности различных вариантов отработки задающего воздействия в системах управления

Мерзликина Е.И.
кафедра АСУТП
НИУ МЭИ
Москва, Россия
MerzlikinaYI@mpei.ru

Кузищин В.Ф,
кафедра АСУТП
НИУ МЭИ
Москва, Россия
KuzishchinV@yandex.ru

***Abstract*—Improvement of control system performance is important today. Modern microprocessor hardware allows us to implement and put into practice complex control algorithms. In many cases it is necessary to know and periodically renew the control process model. The model is usually obtained during the working process, so the way of obtaining the model must not influence the process significantly. When a control system is designed, it is important in many cases to obtain a high quality transfer process when the system setpoint changes. This paper considers this problem for the control systems for thermal processes which often have transport delay in them. Their properties can also change significantly over time.This paper considers a single loop control system equipped with a auto-tuning module, which can renew the process model and tune the controller. This module is based on a fast auto-tuning algorithm, so the influence on the process is small. Several variants of the control system for the case when the setpoint changes are considered: a system with a Smith predictor and a PID-controller, a system with a command unit and a PID-controller and a hybrid system with a maximal rapid response algorithm and a PID-controller and a system with a PID-controller and a command unit. All the systems are considered taking into consideration operating limitations such as the limitations of the control action range.**

Ключевыеслова —ПИД-регулятор, командный блок, предиктор Смита, гибридная система управления, алгоритм максимального быстродействия, запаздывание.

I. Введение

В настоящее время все еще актуален вопрос повышения качества работы систем управления, в том числе – при отработке изменения задания регулятору. С подобной ситуацией при управлении тепловыми процессами можно столкнуться в электрических печах, в системах управления температурой в помещениях и т.д. Таким образом, представляется логичным рассмотреть и выполнить сравнительный анализ различных вариантов отработки изменения задания в системах управления тепловыми процессами. При этом представляется логичным придерживаться классических линейных алгоритмов управления [1], так как в настоящее время они в рассматриваемой области наиболее распространены.

Существуют различные способы отработки изменения задания регулятору, в данной работе будут рассматриваться трииз них. Первый - это система с командным блоком, обеспечивающим оптимизацию выхода на новое задание [1]; второй - этосистема с предиктором Смита [2], где повышение качества переходного процесса достигается за счет ввода в состав системы модуля предиктора, основанного на модели объекта. Третий рассматриваемый способ - гибридная система [3], в которой при изменении задания работает алгоритм максимального быстродействия, а при постоянном задании – ПИД-алгоритм.

При рассмотрении тепловых процессов и агрегатов как объектов управления необходимо принимать во внимание их две существенные характерные особенности [1] –изменение параметров с течением времени и наличие транспортного запаздывания. В связи с первой упомянутой особенностью системы управления тепловыми процессами логично делать адаптивными [1,4,5,6]. Этообеспечит возможность периодического обновления параметров модели объекта и параметров настройки алгоритма управления. При этом необходимо учитывать, что обычно обновление модели объекта и параметров настройки регулятора происходит во время нормальной эксплуатации объекта управления. Таким образом, следует строить алгоритмы адаптации так, чтобы вмешательство в работу объекта было минимальным. В данной работу в этой связи будет использоваться алгоритм ускоренной автоматической настройки АНР-1 [4], работа которого предполагает одну итерацию, поэтому время автонастройки оказывается достаточно небольшим.

Для учета запаздывания и оптимизации переходного процесса при его наличии применяются, например, упомянутые выше системы с предиктором Смита [2]. Кроме того, при использовании системы с алгоритмом максимального быстродействия для объектов с запаздыванием в состав этой системы вводится блок прогноза [3]. При отсутствии такого блока переходный процесс может иметь автоколебательный характер, что зачастую нежелательно.

II. Постановка задачи

В данной статье выполняется сравнительная оценка эффективности различных вариантов отработки задающего воздействия в системах управления с тепловыми объектами с транспортным запаздыванием. Рассматриваются три системы управления: система с ПИД-регулятором и командным блоком, система с предиктором Смита и ПИД-регулятором и гибридная система с ПИД-регулятором и алгоритмом максимального быстродействия.

Все системы оснащены модулем автонастройки, работающим по алгоритму АНР-1 [4]. Данный алгоритм выполняет расчет параметров модели объекта по

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

реакции объекта на прямоугольный импульс за одну итерацию, передаточная функция модели объекта представляет собой дробно-рациональную часть второго порядка с запаздыванием:

$$W_{mod}(s) = V_{mod}(s)e^{-\tau_{mod}s} = \frac{K_{mod}e^{-\tau_{mod}s}}{(T_{mod1}s+1)(T_{mod2}s+1)}, \quad (1)$$

где: $V_{mod}(s)$ – дробно-рациональная часть модели объекта; K_{mod} – коэффициент передачи модели объекта, T_{mod1}, T_{mod2} – постоянные времени объекта, τ_{mod} – время запаздывания объекта.

Далее АНР-1 по косвенным критериям оптимальности [2] рассчитывает параметры настройки ПИД-регулятора с фильтром второго порядка, передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид:

$$W_{PID}(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{(T_f s+1)^2}\right), \quad (2)$$

где: K_p – коэффициент передачи ПИД-регулятора, T_i – постоянная времени интегрирования, T_d – постоянная времени дифференцирования, T_f – постоянная времени фильтра. Постоянная времени фильтра в ряде современных контроллеров, например, [7], и в данной работе принимается $T_f = T_d/8$. Управляющее воздействие на объект осуществляется через широтно-импульсный модулятор (ШИМ). Примером такого объекта можно считать электрическую печь, в которой необходимо поддерживать заданную температуру или изменять заданную температуру необходимым образом. Параметры рассматриваемого объекта приведены ниже, далее для определенности будем считать, что все анализируемые системы управления рассматриваются для случая управления температурой электрической печи.

Для всех рассматриваемых случаев выполним анализ полученных переходных процессов при различных вариантах изменения задания. На управляющее воздействие накладываются ограничения ± 50 %.

Все расчеты выполним на примере объекта вида (1) с параметрами $K_{ob} = 1$℃/% , $T_{ob1} = 16$ с, $T_{ob2} = 80$ с, $\tau_{ob} = 6$ с.

Моделирование системы с ПИД-регулятором, системы с ПИД-регулятором и командным блоком и системы с предиктором Смита и ПИД-регулятором выполнялось в пакете Matlab/Simulink; моделирование гибридной системы выполнялось в пакете BorlandC++.

III. Рассматриваемые системы управления

Для объекта, параметры которого указаны выше, модель, рассчитанная блоком АНР, имеет вид

$$W_{mod}(s) = \frac{0{,}999 \cdot e^{-6{,}3s}}{(17{,}7s+1)(77{,}6s+1)}. \quad (3)$$

Передаточная функция ПИД-регулятора с параметрами, рассчитанными в модуле АНР, представлена ниже:

$$W_{PID}(s) = 7{,}6\left(1 + \frac{1}{36{,}6 \cdot s} + \frac{11{,}9 \cdot s}{\left(\frac{11{,}9}{8}s+1\right)^2}\right). \quad (4)$$

Структурная схема системы управления с ПИД-регулятором и предиктором Смита приведена на рис. 1. Объект управления здесь и далее обозначен Об. Модуль АНР в этой и других рассматриваемых системах включается по инициативе человека (при этом переключатель S_1 находится в положении 1), если нужно обновить модель объекта (и, соответственно, обновить параметры настройки регулятора). По окончании работы модуля АНР управление объектом автоматически передается ПИД-регулятору (блок Рег на рис.1), при этом S_1 находится в положении 2.

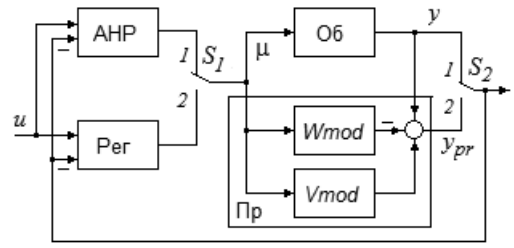


Рис. 1. Система с ПИД-регулятором и предиктором Смита.

Предиктор Смита, в состав которого входят модель объекта с запаздыванием и без запаздывания, также получает необходимые данные из блока АНР. В состав предиктора входит модель объекта с запаздыванием (W_{mod}), имеющая вид (3)и без запаздывания (V_{mod}), представляющая собой дробно-рациональную часть (3). Блок предиктора обозначен на рис.1 Пр.

Структурная схема системы управления с командным блоком представлена на рис. 2. Объект и регулятор обозначаются так же, как и на предыдущем рисунке.

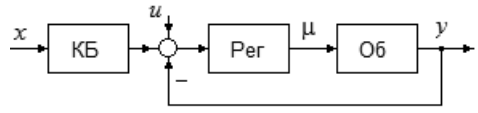


Рис. 2. Система управления с ПИД-регулятором и командным блоком.

Командный блок КБ рассчитывается по методике, изложенной в [1], его передаточная функция два последовательно соединенных реальных дифференцирующих звена, параллельно которым подключено пропорциональное звено с единичным коэффициентом передачи:

$$W_{\text{КБ}}(s) = 1 + K_{d\_\text{КБ}}\left(\frac{T_{d\_\text{КБ}}s}{T_{d\_\text{КБ}}s+1}\right)^2 = 1 + 5{,}8 \cdot \left(\frac{4{,}5s}{4{,}5s+1}\right). \quad (5)$$

Командный блок предназначен для того, чтобы оптимизировать воспроизведение задающего воздействия.

Структурная схема гибридной системы показана на рис. 3. В данном случае в системе задействованы два алгоритма: алгоритм максимального быстродействия и ПИД. При изменении задания работает модуль с алгоритмом максимального быстродействия (АМБ), работающим на основании принципа максимума Понтрягина (*S*в положении 3), по окончании отработки изменения задания управление передается ПИД-алгоритму (*S*в положении 2). Также система оснащена модулем АНР. Переключение между АМБ и ПИД осуществляется автоматически, блок АНР, как и в предыдущих случаях, включается по команде человека.

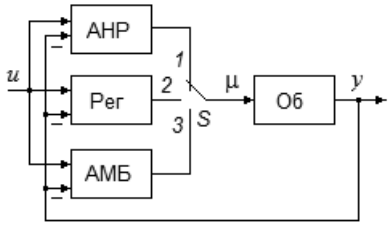


Рис. 3. Гибридная система управления с ПИД-алгоритмом и алгоритмом максимального быстродействия.

Так как в объекте есть запаздывание, то алгоритм максимального быстродействия оснащен также модулем прогнозирования, работающим по линейному алгоритму.

В данной работе рассматривается гибридная система с запретом реверса регулирующего воздействия, преимущества которой в отношении качества переходного процесса и надежности технических средств, входящих в состав системы, показаны в [3].

IV. Анализ переходных процессов при изменении задания

Выполним анализ переходных процессов при изменении задания на 5 ℃ и 10 ℃ . Для изменения задания, равного 5℃, переходные процессы для систем с командным блоком и с предиктором Смита показаны на рис. 4. Для сравнения показан также переходный процесс в одноконтурной системе с ПИД-регулятором. Переходный процесс в системе с ПИД-регулятором показан сплошной линией (1 на рис.4), в системе с командным блоком – пунктирной линией (3 на рис.4), в системе с предиктором Смита – штрих-пунктирной линией (2 на рис.4), далее эта система обозначения сохраняется.

На рис. 5показано управляющее воздействие в рассматриваемых системах при изменении задания на 5℃. Система обозначений кривых та же, что и на рис. 4.

В данном случае видно, что при применении командного блока в данном случае перерегулирование не уменьшилось, а даже немного увеличилось, время переходного процесса заметно не изменилось. При применении предиктора Смита перерегулирование снизилось на 30%, время незначительно возросло. Неэффективность командного блока в данном случае можно объяснить тем, что управляющее воздействие выходит на ограничение, что видно из рис. 5.

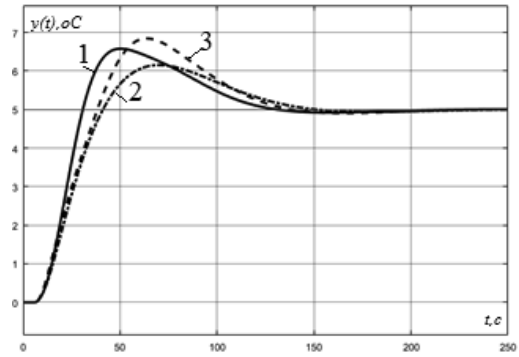


Рис. 4. Переходные процессы в системах управления при изменении задания на 5℃

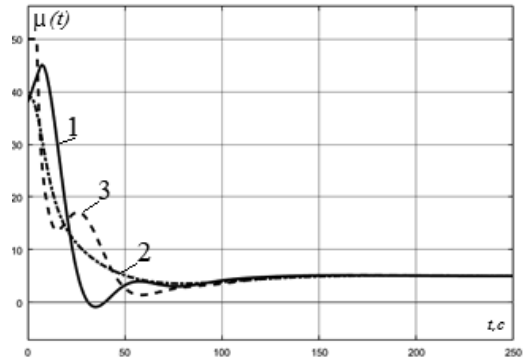


Рис. 5. Управляющее воздействие в рассматриваемых системах при изменении задания на 5℃

Для получения более полной картины рассмотрим переходные процессы в данных системах при изменении задания на 10℃. Данные процессы представлены на рис. 6.

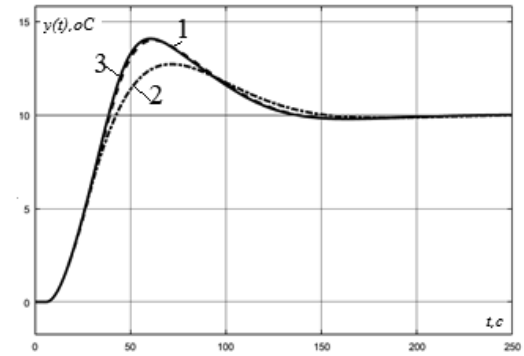


Рис. 6. Переходные процессы в системах управления при изменении задания на 10℃

Как видно из приведенных переходных процессов, в данном случае системы с командным блоком и без него практически не отличаются по эффективности, система с предиктором дает некоторый выигрыш по

перерегулированию. Графики управляющего воздействия для трех рассмотренных систем в данном случае приведены на рис. 7. Как видно из этих графиков, в системах с командным блоком и с ПИД-регулятором регулирующее воздействие сразу выходит на ограничение, таким образом, командный блок в данном случае преимуществ не дает. Система с предиктором, как и в предыдущем рассмотренном случае дает снижение перерегулирования и некоторое увеличение времени переходного процесса.

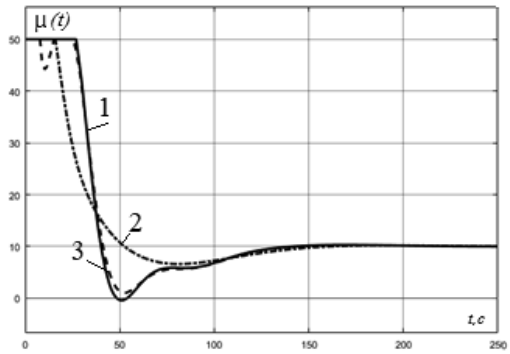


Рис. 7. Управляющее воздействие в рассматриваемых системах при изменении задания на 10℃

При бóльшем увеличении задания данная тенденция сохраняется – обычная одноконтурная система и система с командным блоком дают одинаковую эффективность, система с предиктором Смита обеспечивает небольшой выигрыш по величине перерегулирования, который постепенно падает.

Далее для сравнения рассмотрим переходные процессы в гибридной системе. На рис. 8 на интервале времени от 0 до 300 с показаны переходные процессы в гибридной системе при увеличении и уменьшении задания на 10℃, на интервале времени от 300 до 550 секунд – переходные процессы в системе с ПИД-регулятором для того же случая. Графики для управляющего воздействия показаны на рис. 9.

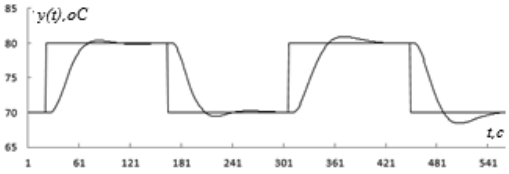


Рис. 8. Переходные процессы в гибридной системе и в системе с ПИД-регулятором при изменении задания на 10℃

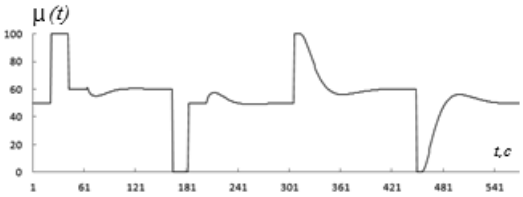


Рис. 9. .Управляющее воздействие в гибридной системе и в системе с ПИД-регулятором при изменении задания на 10℃

Из приведенных рисунков видно, что при изменении задания на 10℃ перерегулирование и время переходного процесса в гибридной системе заметно меньше, чем в системе с ПИД-регулятором.

V. Заключение

В данной работе были рассмотрены различные варианты отработки изменения задающего воздействия в системах управления тепловыми процессами (система с предиктором Смита, система с командным блоком, гибридная система), при этом учитывались неизбежные эксплуатационные ограничения на величину управляющего воздействия.Переходные процессы во всех случаях сравнивались с переходными процессами в классической одноконтурной системе с ПИД-регулятором.

Из рассмотренных выше систем можно сделать вывод, что использование командного блока дает преимущества только при очень малых изменениях задания, то есть, его применение не дает ощутимого повышения качества и приводит к ненужному усложнению системы.

Эффективность системы с ПИД-регулятором и предиктором Смита постепенно понижается с увеличением изменения задания, однако не так быстро, как в предыдущем рассмотренном случае, и при изменении задания на 10 ℃ все еще наблюдается преимущество в величине перерегулирования по сравнению с обычной системой. При этом необходимо отметить, что использование командного блока никак не влияет на устойчивость системы, в то время как предиктор влияет, так как входит в состав замкнутого контура. При этом для построения предиктора требуется только модель объекта, никаких дополнительных расчетов, в отличие от случая командного блока, не требуется.

Наиболее предпочтительной с точки зрения качества можно считать гибридную систему, которая при изменении задания на 10℃ дает заметный выигрыш и по величине перерегулирования и по длительности переходного процесса. К недостаткам данной системы можно отнести её несколько большую сложность по сравнению с обычной одноконтурной системой, а также то, что во многих современных системах программирования контроллеров в настоящее время отсутствуют стандартные алгоблоки для построения алгоритма максимального быстродействия.

Также необходимо отметить, что все показанные преимущества рассмотренных систем во многом обеспечиваются наличием в их составе модуля АНР, который позволяет оперативно обновлять модель объекта, и, соответственно, оперативно пересчитывать параметры настройки ПИД-регулятора и линию переключения алгоритма максимального быстродействия или обновлять блок предиктора. Без блока АНР в рассмотренных системах будет наблюдаться неизбежное ухудшение качества переходного процесса вследствие изменения параметров объекта с течением времени.

Список литературы

[1] Ротач В.Я. Теория автоматического управления // Учебник для ВУЗов. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 400 с.

[2] T. Shaqarin, F.E. Al-Rawajfeh, M.G. Hajaya, N. Alshabatat, B.R. Noack. Model-basedrobust *H*∞control of a granulation process using Smith predictor with Reference updating. JournalofProcessControl. Volume 7, May 2019, Pages 38-47.

[3] Кузищин В.Ф., Мерзликина Е.И., Хоанг Ван Ва. Алгоритм максимального быстродействия для тепловых объектов с запаздыванием: применение в гибридной системе с ПИД-регулятором и блоком автоматической настройки // В.Ф. Кузищин, Е.И. Мерзликина, Хоанг Ван Ва // Теплоэнергетика, 2019, №8 (в печати).

[4] Кузищин В.Ф., Царев В.С. Алгоритмы ускоренной автоматической настройки регуляторов с оценкой модели объекта по его реакции на импульсное воздействие и в режиме автоколебаний // В.Ф. Кузищин, В.С. Царев // Теплоэнергетика, 2014. №4. С. 35-44.

[5] Липа О.А., Липа Д.А., Судник Ю.А., Солдатов В.В. Активная идентификация замкнутых систем адаптивного управления // О.А. Липа, Д.А. Липа, Ю.А. Судник, В.В. Солдатов // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета, 2013. №14. С. 96-101.

[6] N. Merayo, D. Juarez, Juan C. Aguado, I. De Miguel, R.J. Duran, P. Fernandez, R.M. Lorenzo, E.J. Abril, "PID controller based on a self-adaptive neural network to ensure qos bandwidth requirements in passive optical networks," in*IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 9, no. 5, pp. 433-445, May 2017.

[7] ОфициальныйсайткомпанииОВЕН (www.owen.ru).

Структуризация данных по прогрессивности при принятии многокритериальных решений

Михайлов А.П.
Поволжский Государственный Университет
Телекоммуникаций и Информатики
Самара, Российская Федерация
mihantonius@gmail.com

***Abstract* — It is proposed to formalize the method of structuring a variety of solutions. The report describes the principle of progressive Pareto-optimal options. A block diagram of the algorithm for searching progressive options is presented. The practical significance of the algorithm is given. A method for structuring Pareto optimal progressive variants is developed and implemented. The operation of the algorithm based on the data set of the UN Development Program is demonstrated.**

Ключевые слова — принятия сложных решений, Парето-оптимальность, структуризация данных, прогрессивность.

I. Введение

Одним из основных компонентов задачи принятия сложных решений является множество вариантов решения — объектов, каждый из которых оценивается набором критериев эффективности, и задача лица, принимающего решение, состоит в том, чтобы структурировать это множество, выделив из него наиболее эффективный вариант или расположив все варианты в линейную последовательность по эффективности. Однако любой используемый для этого метод включает в той или иной форме субъективный момент (назначения числовых весовых коэффициентов сравнительной важности критериев, мысленных лотерей при попарном сравнении критериев между собой и т.п.). Эта субъективность существенно снижает доверие к результатам структуризации и является наиболее существенным фактором, препятствующим широкому применению формализованных методов принятия решений [1-2].

Единственным объективным методом структуризации этого множества является метод его расслоения с послойным использованием принципа Парето-оптимальности. В этом случае из всего множества выделяется 1-й слой Парето оптимальных вариантов, элементов (объектов), затем они изымаются из рассмотрения и уже в оставшемся подмножестве выделяется второй, третий слой и т.д. Однако при этом каждый слой может содержать достаточно большое количество объектов, т.е. разрешающая способность такого метода невелика.

Принцип Парето-оптимальности наиболее приспособлен для структуризации множества вариантов решений. Данный метод расслаивает множества на подмножества, при этом выделяя оптимальные варианты в 1-м слое. Однако в этом слое далеко не все варианты являются оптимальными между собой, поэтому выделяется 2-й слой оптимальных по Парето вариантов. Расслоение таким образом можно проводить до того момента, пока в конечном множестве не останутся только несравнимые варианты решений.

В [3] предложно усилить процесс послойного расслоения данных в задачах принятия решений, используя, наряду с понятием Парето-оптимальности, столь же объективное (не требующее сопоставления сравнительной значимости частных критериев) понятие прогрессивности вариантов решений. В этом случае после того, как выделен слой Парето оптимальных вариантов, внутри у него выделяется подслой элементов оптимальных по прогрессивности, они изымаются из рассмотрения, выделяется следующий подслой и т.д. В настоящем докладе предлагается формализовать модель параллельного расслоения данных по Парето-оптимальности и прогрессивности, использующую новые понятия «фронта оптимальности» и «веера минимальных/максимальных векторов опережения» варианта решения относительно фронта оптимальности. Разработан и реализован алгоритм структуризации данных и реализующая его компьютерная программа. Эффективность метода и алгоритма в сопоставлении с методикой и результатами программы развития ООН продемонстрирована на массиве данных, характеризующих уровень развития человеческого потенциала в различных странах мира.

II. Теоретическая часть

Алгоритм, предложенный С.А. Пиявским, позволяет усиливать процесс послойного расслоения в задачах принятия решений и выделять из множества несравнимых вариантов наиболее прогрессивные [4]. Для этого для получившегося фронта оптимальности необходимо подсчитать матрицу прогрессивности. Каждый вариант сравнивается всеми критериями с другими вариантами, тем самым образуя новую матрицу, которая раскрывает веер максимальных векторов опережения. Например, имея в конечном расслоении 11 несравнимых вариантов решения, необходимо подсчитать 11 матриц, в каждой из которых будет по 10 вариантов (вариант A сравнивается с вариантом B, вариант A сравнивается с вариантом C, вариант A сравнивается с вариантом D, и т.д.). Внутри каждой матрицы с веером опережения необходимо проверить все варианты на оптимальность по Парето. После подсчета всех матриц и выявления в каждой Парето-оптимальных вариантов, необходимо выделить оптимальные варианты из всех матриц, и отделить их, тем самым создать новую матрицу. Данная матрица отображает, какие варианты наиболее прогрессивны перед другими. Однако из этого множества вариантов можно выделить наиболее прогрессивные применив принцип Парето-оптимальности и тем самым расслоив множество прогрессивных вариантов на наиболее

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

прогрессивные и менее прогрессивные варианты

решений. Определенно нельзя сказать, что будет один вариант, который будет полностью прогрессивнее, чем другие.

На рис 1. изображена обобщенная схема структуризации массива данных. Данная схема наглядно показывает, как алгоритм отбора Парето-оптимальных вариантов расслаивает большой массив данных с последующим делением его на наиболее прогрессивные.

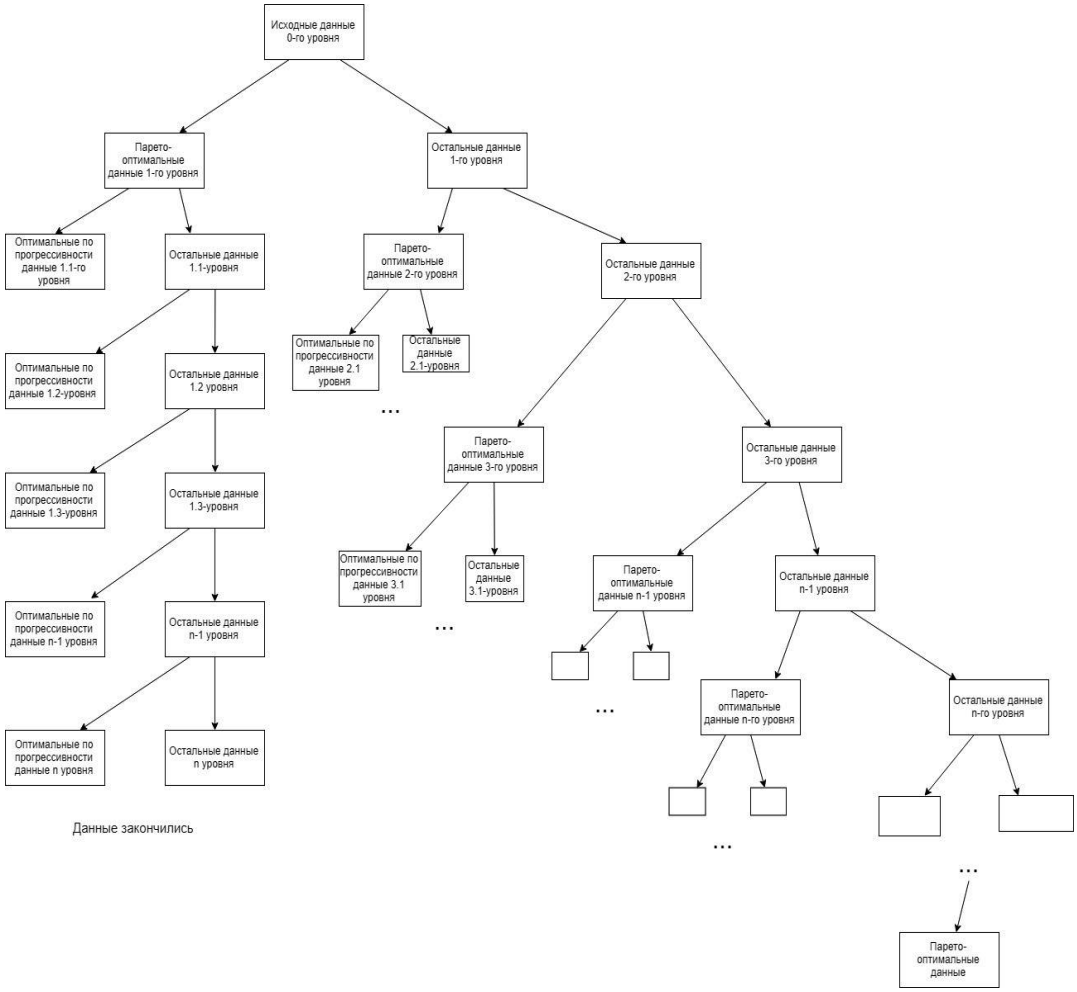


Рис. 1. Схема структуризации

Представлена блок-схема (рис. 2) разработанного алгоритма нахождения прогрессивных вариантов 1-го слоя Парето-оптимальных вариантов. На схеме показан «Блок 1», который отвечает за подсчет количества вариантов и критериев, задавая тем самым размерность будущего массива данных. После того, как определена размерность матрицы исходных данных, алгоритм переходит к «Блоку 2». В данном блоке реализуется процесс нахождения Парето-оптимальных вариантов, путем сравнения каждого варианта по всем критерием с остальными. Данный процесс алгоритма необходим для выделения слоя Парето-оптимальных вариантов, отделяя при этом варианты «двойники» и «нулевые» варианты. В «Блоке 3» происходит перенос Парето-оптимальных вариантов 1-го слоя, формируется новая матрица, которая состоит только из оптимальных по Парето вариантов, тем самым раскрывая фронт оптимальности. Помимо создания матрицы оптимальных вариантов подсчитывается размерность нового массива. «Блок 4» включает в себя подсчет вееров максимальных векторов опережения. Для этого каждый вариант представляется в векторном виде, где критерии представляют собой оси направлений варианта. Необходимо выяснить насколько вариант по каждому вектору опережает сравниваемый вариант. Другими словами необходимо просчитать, на сколько пунктов по каждому критерию вариант необходимо передвинуть, чтобы он стал не оптимальным по Парето в сравнении с другим вариантом. Таким образом, формируется множество матриц, их число соответствует числу Парето-

оптимальных вариантов 1-го слоя. После того, как сформированы все веера опережения, алгоритм переходит к «Блоку 5». Данный блок содержит в себе процесс выделения Парето-оптимальных вариантов во всех матрицах прогрессивности. Это необходимо для того, чтобы отсеять наиболее не прогрессивные варианты. «Блок 6» подразумевает перенос вариантов, которые прошли отбор, формируя тем самым новую матрицу. Согласно «Блоку 7» в данной матрице выделяются Парето-оптимальные варианты. Проведя небольшие математические вычисления и анализ полученных данных можно сделать вывод, что прогрессивными вариантами можно считать те варианты, которые после обработки конечной матрицы на выделение Парето-оптимальных вариантов наиболее часто встречаются в числе оптимальных вариантов.

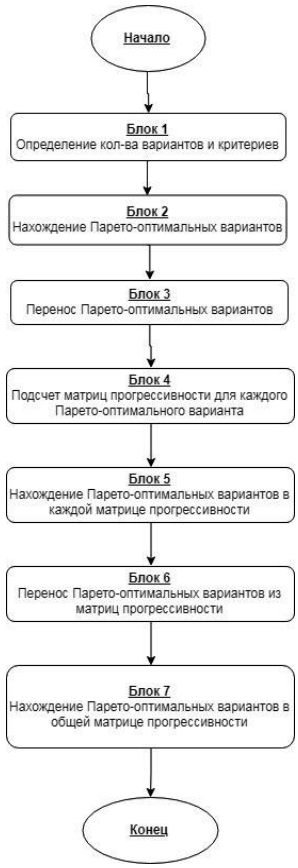


Рис. 2. Блок-схема алгоритма нахождения прогрессивных вариантов

III. Практическое применение

Разработанный алгоритм позволяет обрабатывать большие массивы данных и выделять из них наиболее прогрессивные варианты. Например, при зачислении студентов в ВУЗ у приемной комиссии стоит задача, сравнить большое количество студентов по определенным критериям. Ручное сравнение такого большого массива данных и выделения из него подходящих кандидатур будет занимать крайне много времени. Кроме того субъективный взгляд лица, которое принимает решение может пагубно сказаться на выделении кандидатов. Для подтверждения метода нахождения прогрессивных вариантов при структуризации данных в многокритериальных задачах разбирается работа алгоритма на примере массива данных программы развития ООН, уровень развития человеческого потенциала в различных странах мира. Задается исходный массив данных (рис. 3), согласно «Блоку 1» (рис. 2) определяется количество вариантов и критериев. Количества вариантов в данном массиве 189, критериев 4. Размерность критериев: «Ожидаемая продолжительность жизни при рождении» минимальный параметр 50, максимальный 90; «Ожидаемые годы обучения» минимальный параметр 25, минимальный 4; «Средние годы обучения» минимальный параметр 1, максимальный 15; «Валовой национальный доход (ВНД) на душу населения» минимальный параметр 100, максимальный 120000.

	Ожидаемая продолжительность жизни при рождении	Ожидаемые годы обучения	Средние годы обучения	Валовой национальный доход (ВНД) на душу населения
Norway	82,3	17,09	12,06	68012
Switzerland	83,5	16,02	13,04	57625
Australia	83,1	22,09	12,09	45780
Ireland	81,6	19,06	12,05	53754
Germany	81,2	17	14,01	46136
Iceland	82,9	19,03	12,04	4581
Hong Kong, China (SAR)	84,1	16,03	12	5842
Sweden	82,6	17,06	12,04	47766
Singapore	83,2	16,02	11,05	82503
Netherlands	82	18	12,02	52640
Denmark	80,9	19,01	12,06	47918
Canada	82,5	16,04	13,03	43433
United States	79,5	16,05	13,04	54941
United Kingdom	81,7	17,04	12,09	39116
Finland	81,5	17,06	12,04	41002
New Zealand	82	18,09	12,05	53560

Рис. 3. Исходный массив данных

Согласно «Блоку 2» на рис. 2 алгоритм находит и выдяляет Парето-оптимальные варианты, они помечаются цветом, для удобства распознавания. Алгоритм выделил Парето-оптимальные варианты 1-го слоя, именно с ними и будут продолжаться последующие манипуляции (рис. 4).

	Ожидаемая продолжительность жизни при рождении	Ожидаемые годы обучения	Средние годы обучения	Валовой национальный доход (ВНД) на душу населения
Norway	82,3	17,09	12,06	68012
Switzerland	83,5	16,02	13,04	57625
Australia	83,1	22,09	12,09	45780
Ireland	81,6	19,06	12,05	53754
Germany	81,2	17	14,01	46136
Iceland	82,9	19,03	12,04	4581
Hong Kong, China (SAR)	84,1	16,03	12	5842
Sweden	82,6	17,06	12,04	47766
Singapore	83,2	16,02	11,05	82503
Netherlands	82	18	12,02	52640
Denmark	80,9	19,01	12,06	47918
Canada	82,5	16,04	13,03	43433
United States	79,5	16,05	13,04	54941
United Kingdom	81,7	17,04	12,09	39116
Finland	81,5	17,06	12,04	41002
New Zealand	82	18,09	12,05	53560

Рис. 4. Нахождение Парето-оптимальны вариантов

После нахождения оптимальных по Парето вариантов 1-го слоя, алгоритм переносит их и создает фронт оптимальности. Каждый вариант фронта оптимальности необходимо представить в векторной форме, где критерии будут представлены, как оси направлений варианта. Сравнивая данные веера, алгоритм подсчитывает матрицы прогрессивности (сравниваются соответствующие вектора вариантов, если вектор выбранного варианта опережает вектор сравниваемого, то в матрицу заносится значение разницы векторов, если опережает сравниваемый вектор, то заносится «ноль») для каждого варианта фронта оптимальности (рис. 5). Данные действия являются одними из самых важных в алгоритме, именно в них раскрывается смысл алгоритма нахождения Парето-оптимальных по прогрессивности вариантов.

Norway->Switzerland	1,2	0	0,98	0
Norway->Australia	0,8	5	0,03	0
Norway->Ireland	0	1,97	0	0
Norway->Germany	0	0	1,95	0
Norway->Iceland	0,6	1,94	0	0
Norway->Hong Kong, China (SA	1,8	0	0	0
Norway->Sweden	0,3	0	0	0
Norway->Singapore	0,9	0	0	14491
Norway->Denmark	0	1,92	0	0
Norway->Canada	0,2	0	0,97	0
Norway->United States	0	0	0,98	0
Norway->United Kingdom	0	0	0,03	0
Norway->Belgium	0	1,99	0	0
Norway->Liechtenstein	0	0	0	29324
Norway->Japan	1,6	0	0,02	0
Norway->France	0,4	0	0	0
Norway->Spain	1	0	0	0
Norway->Italy	0,9	0	0	0
Norway->Qatar	0	0	0	48806
Switzerland->Norway	0	1,07	0	10387
Switzerland->Australia	0	6,07	0	0
Switzerland->Ireland	0	3,04	0	0
Switzerland->Germany	0	0,98	0,97	0
Switzerland->Iceland	0	3,01	0	0

Рис. 5. Подсчет матриц прогрессивности

После того, как алгоритм просчитал все матрицы прогрессивности, из них выделяются Парето-оптимальные веера опережения, которые переносятся, согласно «Блоку 6» (рис. 2), и формируют конечную матрицу. Из которой необходимо выделить Парето-оптимальные варианты. После того, как конечная матрица прогрессивности обработана на нахождение Парето-оптимальных вариантов, выделяются несколько вариантов (рис. 6). Именно они являются Парето-оптимальными вариантами по прогрессивности. Проведя небольшой анализ полученных данных можно сказать какие варианты наиболее прогрессивны по Парето-оптимальности, в данном случае такими вариантами стали: «Hong Kong, China (SAR)», «Spain», «Italy», «Qatar». Среди представленных вариантов нет абсолютного Парето-оптимального по прогрессивности варианта, так как ни один вариант полностью не превосходит другие по всем критериям, что еще раз подтверждает уникальность данного алгоритма метода структуризации Парето-оптимальных данных по прогрессивности путем расслоения массива данных и практическую значимость.

Norway->Switzerland	1,2	0	0,98	0
Norway->Australia	0,8	5	0,03	0
Norway->Germany	0	0	1,95	0
Norway->Hong Kong, China (SAR)	1,8	0	0	0
Norway->Singapore	0,9	0	0	14491
Norway->Japan	1,6	0	0,02	0
Norway->Qatar	0	0	0	48806
Switzerland->Norway	0	1,07	0	10387
Switzerland->Australia	0	6,07	0	0
Switzerland->Germany	0	0,98	0,97	0
Switzerland->Hong Kong, China (SAR)	0,6	0,01	0	0
Switzerland->Qatar	0	0	0	59193
Australia->Switzerland	0,4	0	0,95	11845
Australia->Germany	0	0	1,92	356
Australia->Hong Kong, China (SAR)	1	0	0	0
Australia->Singapore	0,1	0	0	36723
Australia->Qatar	0	0	0	71038
Ireland->Norway	0,7	0	0,01	14258
Ireland->Switzerland	1,9	0	0,99	3871
Ireland->Australia	1,5	3,03	0,04	0
Ireland->Germany	0	0	1,96	0
Ireland->Hong Kong, China (SAR)	2,5	0	0	0

Рис. 6. Выделение Парето-оптимальных вариантов по прогрессивности

IV. Заключение

В настоящем докладе был формализован метод структуризации множества путем его расслоения с послойным использованием принципа Парето-оптимальности, усиленный понятием прогрессивности вариантов. Разработан и реализован алгоритм структуризации данных. Приведена практическая значимость данного алгоритма и рассмотрен пример его применения на основе программы развития ООН, характеризующей уровень развития человеческого потенциала в различных странах мира.

Список литературы

[1] Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений / О.И. Ларичев. - М.: Логос, 2000. – 295 с.

[2] Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения: Пер. с англ./Под ред. И.Ф. Шахнова. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.

[3] Пиявский С.А. Два новых понятия верхнего уровня в онтологии многокритериальной оптимизации // Онтология проектирования, 2013. №1(7). - С. 65-85.

[4] Пиявский С.А. Прогрессивность многокритериальных альтернатив // Онтология проектирования, 2013. №4(10). - С. 60-71.

Метод универсальных коэффициентов в принятии многокритериальных решений

Пиявский С.А.
СФ МГПУ
Самара, Россия
spiyav@mail.ru

***Abstract* — To solve complex problems, a universal method is proposed for quantifying preferences with respect to individual performance criteria, if these criteria are expressed in ordinary scales, and linear or minimax convolutions are used to form a complex criterion. The universal tables of such coefficients for a different number of criteria and their distribution among the levels of the ordinal scale are given. A comparison is made with a widespread method of T.Saaty's Analytic Hierarchy Process.**

Ключевые слова — Принятие сложных решений, многокритериальность, комплексный критерий, универсальность, таблицы коэффициентов, Т.Саати

I. Введение

Для задач принятия сложных решений предлагается универсальный метод количественного измерения предпочтений лица, принимающего решение (ЛПР), в отношении частных критериев эффективности, если эти предпочтения выражены в порядковых шкалах, а для формирования комплексного критерия эффективности используются линейная или максиминная свертки. Разработаны точные формулы для расчета соответствующих коэффициентов сверток, а также алгоритмы и программы, позволяющие рассчитать универсальные таблицы таких коэффициентов для различного количества критериев и их распределения по уровням порядковой шкалы. В частности, разработана универсальная шкала пересчета порядковых оценок в числовые. Метод основан на единственном, представляющемся тривиальным, положении, что, в случае «равноправия» каждого числа в некоторой совокупности чисел, наименее субъективной числовой оценкой всей совокупности в целом является или среднее, или максимальное/минимальное значение входящих в нее чисел.

В практическом применении метод является наиболее простым из существующих методов принятия многокритериальных решений и позволяет ЛПР-у наиболее полно реализовать свои собственные взгляды на решаемую проблему, не используя для их формализации, требуемой другими методами, посредников или мало обоснованные приемы. Благодаря простоте метод может существенно расширить масштабы использования рациональных методов обоснования решений не только в научно-технической, но и в экономической и социальной сферах.

Проводится сопоставление предложенного метода с широко распространенным методом аналитической иерархии Т.Саати, в частности, проанализирована обоснованность используемого в методе аналитической иерархии известного ряда коэффициентов «1, 3, 5, 7, 9».

Показана некорректность и даны оценки ошибки, возникающей при последовательном объединении частных критериев в группы по сравнению с одноуровневым рассмотрением полного набора критериев.

II. Основные результаты

Рассматривая сложные, многоаспектные решения, человек прежде всего оперирует естественным для него расплывчатым понятием «важнее». Использование формализованных методов приводит к стремлению дать этому понятию объективное количественное содержание, то есть создать достаточно понятную и широко признаваемую универсальную шкалу, которая определила бы численные значения коэффициентов, отвечающие различным степеням понятия «важнее».

Работа выполнена при поддержке РФФИ, научный проект № 18-08-00858 А, 09.02.2018.

Нам представляется, что одной из первых и наиболее успешных попыток в этом направлении можно считать предложенный Т.Саати в 80-х годах прошлого века метод анализа иерархий, также называемый «аналитическое планирование» (Analytic Hierarchy Process, AHP) [1, 2], получивший широкое распространение. В его основе лежит универсальная последовательность чисел 1, 3, 5, 7, 9. Эта последовательность позволяет весьма просто рассчитать значения коэффициентов важности в свертке частных критериев в конкретной задаче принятия решений, если ЛПР попарно сравнивает между собой по важности частные критерии и сопоставляет каждой паре соответствующие значения из упомянутой последовательности. Алгоритм расчета достаточно естественен и основан на том соображении, что если коэффициент важности критерия А в K раз больше коэффициента важности критерия В, то рассчитанный по этому же алгоритму коэффициент важности критерия В должен ровно в $1/K$ раз быть больше коэффициента важности критерия А. Такой подход имеет два недостатка: не очень убедительное обоснование «волшебных чисел» 1, 3, 5, 7, 9 и использования среднего геометрического в алгоритме обработки результатов попарного сравнения, а также большое число попарных сравнений критериев ЛПР-ом (например, при 15 критериях 105 сравнений), что не только утомительно, но и неизбежно приводит к трудно устраняемой несогласованности оценок.

В [3 - 6] мы предложили вместо указанных гипотез, которые можно оспаривать, использовать единственное, представляющееся почти тривиальным, положение о том, что в случае «равноправия» каждого числа в некоторой совокупности чисел, наименее субъективной числовой оценкой всей совокупности в целом являются

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

предельные или среднее значения входящих в нее чисел. Именно такая ситуация возникает при многокритериальном сравнении объектов после нормирования частных критериев в относительной шкале, когда критерии теряют свое своеобразие и различаются лишь по их сравнительной важности. В задачах оптимизации это обосновывает использование линейной (усредняющей) или минимаксной (гарантирующей) сверток взвешенных значений частных критериев, причем весовые коэффициенты сверток следует рассчитывать с учетом всего множества возможных их значений, определяемых предпочтениями ЛПР в отношении различных критериев. Если предложить ЛПР выражать свои предпочтения в форме отнесения частных критериев к различным группам важности, это позволяет определить весовые коэффициенты чисто расчетным путем.

При таком подходе оказывается, что значения весовых коэффициентов для линейной и гарантирующей сверток, благодаря их структуре, не зависят от конкретной задачи, то есть конкретных значений частных критериев, а только от общего числа критериев и их распределения по группам важности (политики выбора). Это позволяет рассчитать универсальные таблицы для всевозможных политик выбора при определенном количестве критериев и использовать их как искомую количественную меру понятия «важнее».

В [3 - 6] получены точные формулы и алгоритмы для расчета универсальных коэффициентов важности при обоих видах сверток для любого числа частных критериев и любых политик выбора, например, таблица 1 (поясним, что в ней значения приведены в форме рациональных дробей, поскольку их удалось получить аналитическим путем).

Нами показано что таблицы универсальных коэффициентов при линейной свертке обладают интересным свойством. Его можно назвать «краевым эффектом». При фиксированном общем количестве частных критериев одинаковым крайним фрагмента политик выбора отвечают одинаковые значения соответствующих универсальных коэффициентов важности. Это свойство непосредственно можно увидеть на примере политик выбора, приведенных в таблице 1. Оно позволяет предложить последовательную процедуру расчета универсальных таблиц коэффициентов важности при линейной свертке для возрастающего общего количества частных критериев. При таком подходе непосредственно по точным формулам требуется рассчитать универсальные коэффициенты важности критериев лишь для одной «задающей» политики выбора, в которой в каждой группе важности находится лишь один критерий. Затем последовательно «с краев» заполняется шаблон таблицы. Далее рассматриваются строки таблицы, в которых осталась лишь одна незаполненная клетка. Для нее легко находится недостающее значение коэффициента важности из условия, что в этой строке сумма произведений коэффициентов важности критериев на количество критериев в соответствующих группах важности должно равняться единице. Таким образом в таблице появляются новые заполненные строки и соответственно новые «края», поле чего процесс повторяется до полного заполнения таблицы.

Для гарантирующей свертки также разработан специальный алгоритм расчета универсальных коэффициентов важности критериев.

ТАБЛИЦА I. ТАБЛИЦА 1. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ВАЖНОСТИ ЧАСТНЫХ КРИТЕРИЕВ

Число частных критериев	**Количество критериев в каждой группе важности**				**Универсальные значения коэффициентов важности критериев в линейной свертке**			
	Группа важности критериев				***Группа важности критериев***			
	B1	*B2*	*B3*	*B4*	*B1*	*B2*	*B3*	*B4*
2	2				1/2			
	1	1			1/4	3/4		
3	3				1/3			
	2	1			7/36	22/36		
	1	2			4/36	16/36		
	1	1	1		4/36	10/36	22/36	
4	4				12/48			
	3	1			8/48	25/48		
	2	2			5/48	19/48		
	1	3			3/48	15/48		
	2	1	1		5/48	13/48	25/48	
	1	2	1		3/48	10/48	25/48	
	1	1	2		3/48	7/48	19/48	
	1	1	1	1	3/48	7/48	13/48	25/48

В настоящее время рассчитаны таблицы универсальных коэффициентов важности до десяти частных критериев. Однако при большом количестве критериев размер таблиц становится таким большим, что их использование «вручную» неудобно. Поэтому были рассчитаны более компактные таблицы, использующие тот факт, что на практике ЛПР не нуждается более чем в трех – четырех группах важности. Действительно, рассматривая набор критериев какой-либо частной задачи, достаточно разделить критерии на «важные», «более важные» и «самые важные» (три группы важности), а вот выдумывать какие-то «сверхважные» и за ними еще и «суперважные» - скорее всего уже схоластика, хотя полученные формулы позволяют и в таких экзотических случаях рассчитать универсальные коэффициенты важности частных критериев. В таблице 2 в качестве примера приведена таблица универсальных коэффициентов для трех групп важности до семи критериев, которая может быть использована при решении широкого круга практических задач соответствующей размерности.

Более того, если ЛПР выбирает одно из следующих утверждений о сравнительной важности учета в решаемой им задаче гарантирующего или усредняющего подхода: адекватен один из них; один подход более адекватен, чем другой; оба подхода одинаково адекватны, - универсальная формула позволяет рассчитать комплексный критерий, учитывающие оба метода свертки.

В настоящее время рассчитаны таблицы универсальных коэффициентов важности до десяти

частных критериев. Однако при большом количестве критериев размер таблиц становится таким большим, что их использование «вручную» неудобно. Поэтому были рассчитаны более компактные таблицы, использующие тот факт, что на практике ЛПР не нуждается более чем в трех – четырех группах важности. Действительно, рассматривая набор критериев какой-либо частной задачи, достаточно разделить критерии на «важные», «более важные» и «самые важные» (три группы важности), а вот выдумывать какие-то «сверхважные» и за ними еще и «суперважные» - скорее всего уже схоластика, хотя полученные формулы позволяют и в таких экзотических случаях рассчитать универсальные коэффициенты важности частных критериев. В таблице 2 в качестве примера приведена таблица универсальных коэффициентов для трех групп важности до семи критериев, которая может быть использована при решении широкого круга практических задач соответствующей размерности.

Более того, если ЛПР выбирает одно из следующих утверждений о сравнительной важности учета в решаемой им задаче гарантирующего или усредняющего подхода: адекватен один из них; один подход более адекватен, чем другой; оба подхода одинаково адекватны, - универсальная формула позволяет рассчитать комплексный критерий, учитывающие оба метода свертки.

ТАБЛИЦА II. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ВАЖНОСТИ КРИТЕРИЕВ В ЗАДАЧАХ С ТРЕМЯ ГРУППАМИ ВАЖНОСТИ

Количество критериев	**Распределение критериев по группам важности**			**Коэффициенты важности критериев в линейной свертке**			**Коэффициенты важности критериев в гарантирующей свертке**		
n	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
3	1	1	1	0,111	0,278	0,611	0,182	0,273	0,545
4	2	1	1	0,104	0,271	0,521	0,154	0,231	0,462
4	1	2	1	0,063	0,208	0,521	0,111	0,222	0,444
4	1	1	2	0,063	0,146	0,396	0,097	0,129	0,387
5	3	1	1	0,093	0,27	0,45	0,133	0,2	0,4
5	2	2	1	0,065	0,21	0,45	0,1	0,2	0,4
5	1	3	1	0,04	0,17	0,45	0,074	0,185	0,37
5	2	1	2	0,065	0,15	0,36	0,088	0,118	0,353
5	1	2	2	0,04	0,12	0,36	0,07	0,116	0,349
5	1	1	3	0,04	0,09	0,29	0,058	0,072	0,29
6	4	1	1	0,086	0,261	0,394	0,118	0,176	0,353
6	3	2	1	0,061	0,211	0,394	0,091	0,182	0,364
6	2	3	1	0,044	0,172	0,394	0,069	0,172	0,345
6	1	4	1	0,028	0,144	0,394	0,053	0,158	0,316

ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛИЦЫ II

6	3	1	2	0,061	0,161	0,328	0,081	0,108	0,324
6	2	2	2	0,044	0,128	0,328	0,065	0,109	0,326
6	1	3	2	0,028	0,106	0,328	0,053	0,105	0,316
6	2	1	3	0,044	0,094	0,272	0,055	0,068	0,274
6	1	2	3	0,028	0,078	0,272	0,045	0,068	0,273
6	1	1	4	0,028	0,061	0,228	0,038	0,046	0,229
7	5	1	1	0,08	0,248	0,35	0,105	0,158	0,316
7	4	2	1	0,059	0,207	0,35	0,083	0,167	0,333
7	3	3	1	0,043	0,173	0,35	0,065	0,161	0,323
7	2	4	1	0,032	0,146	0,35	0,05	0,15	0,3
7	1	5	1	0,02	0,126	0,35	0,039	0,137	0,275
7	4	1	2	0,059	0,167	0,299	0,075	0,1	0,3
7	3	2	2	0,043	0,136	0,299	0,061	0,102	0,306
7	2	3	2	0,032	0,112	0,299	0,05	0,1	0,3
7	1	4	2	0,02	0,095	0,299	0,041	0,096	0,288
7	3	1	3	0,043	0,105	0,255	0,052	0,065	0,26
7	2	2	3	0,032	0,085	0,255	0,043	0,065	0,261
7	1	3	3	0,02	0,071	0,255	0,037	0,064	0,257
7	2	1	4	0,032	0,065	0,218	0,037	0,044	0,221
7	1	2	4	0,02	0,054	0,218	0,031	0,044	0,22
7	1	1	5	0,02	0,044	0,187	0,027	0,031	0,188

III. Заключение

Предложенный метод имеет определенные преимущества по сравнению с методом аналитической иерархии. Прежде всего, это связано с уменьшением трудоемкости метода для ЛПР. Действительно, попарное сравнение объектов обладает двумя недостатками. Во-первых, в реальности человек не в состоянии столь дробно оценивать отличия в относительной важности объектов, как это предполагает метод анализа иерархий. Во-вторых отнесение сравниваемых объектов к нескольким различным группам важности значительно проще, не говоря уже о том, что этот процесс при *n* объектах требует от ЛПР всего *n* решений, тогда как попарное сравнение требует *n(n-1)/2* решений, что существенно больше. Так, при шести критериях попарное сравнение потребует 15 решений ЛПР вместо шести, а при десяти критериях – уже 45 очень сомнительных решений вместо десяти вполне определенных.

Наибольшие возражения вызывает использование числового ряда 1, 3, 5, 7, 9. Этот ряд не согласуется с ключевым положением, лежащим в основе самого метода анализа иерархий. В соответствии с этим

положением, идеальная система количественной сравнительной оценки объектов должна быть такой, что если более важный объект в K раз важнее менее важного, то это менее важный объект должен быть в $1/K$ раз больше более важного. При сравнении нескольких объектов строится квадратная матрица указанных коэффициентов и затем за комплексный коэффициент важности каждого объекта принимается величина, пропорциональная среднему геометрическому их элементов соответствующей ему строки. Отсюда следует, что указанная процедура при сравнении между собой пяти элементов возрастающей важности на основе исходного ряда должна в итоге привести к такому же ряду. Однако, как показывает расчет, результирующий ряд будет иметь вид 1; 1,93; 3,94; 8,01; 15,49, то есть существенно отличаться от исходного. Если поставить оптимизационную задачу и найти числа исходного числового ряда, которые приведут к максимально близким к исходным целым числам результирующего ряда, то можно получить такой оптимальный (подчеркнем, для данной конкретной задачи) ряд: 1; 3; 9; 27; 81. Более того, можно убедиться, что такому условию согласованности будет удовлетворять любая геометрическая прогрессия, например, 1; 2; 4; 8; 16.

Отметим, что универсальные коэффициенты важности критериев, отвечающие «задающим» политикам выбора, дают универсальную, для использования в соответствующей свертке критериев, количественную шкалу пересчета значений критериев из порядковой шкалы в количественную. Например, как следует из таблицы 1 (последняя строка), для четырехуровневой порядковой шкалы количественными эквивалентами значений «нормально», «хорошо», «отлично», «превосходно» для использования в линейной свертке, будут числа 0,0625; 0,146; 0,271; 0,521 или, округленно для удобства использования, 0,1; 0,15; 0,25; 0,5.

Предлагаемый подход позволяет отрицательно ответить на вопрос, корректно ли при использовании линейной свертки усреднять нормированные значения критериев, имеющих одну и ту же группу важности. Действительно, пусть, например, в задаче принятия решения из четырех частных критериев два являются более важными, чем оставшиеся. Казалось бы, эту задачу при использовании линейной свертки можно свести к задаче с двумя критериями, в которой значение более важного критерия равно среднему арифметическому нормированных значений двух более важных исходных критериев. Однако это неверно, так как в исходной задаче коэффициент менее важного критерия относится к коэффициенту важности более важного критерия как 1 к 3,8, а в новой задаче - как 1 к 3 (таблица 1).

Список литературы

[1] Саати Т. Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Саати Т., К. Кернс. Пер.с англ – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.

[2] Саати Т. Об измерении неосязаемого. Подход к относительным измерениям на основе главного собственного вектора матрицы парных сравнений // Электронный журнал Cloud of Science. 2015. Т. 2. № 1. - http://cloudofscience.ru.

[3] Пиявский С.А. Два новых понятия верхнего уровня в онтологии многокритериальной оптимизации //Онтология проектирования. 2013. Т.3. №1(7). – С.65-85.

[4] Пиявский С.А. Как «нумеризовать» понятие «важнее» // Онтология проектирования. 2016. Т.6. №4(22). – С.414-435.

[5] Пиявский С.А. Вычислительные аспекты формирования универсальных таблиц коэффициентов важности критериев // Онтология проектирования. 2017. Т.7. №3(25). - С. 284-295.

[6] Пиявский С.А. Метод универсальных коэффициентов при принятии многокритериальных решений // Онтология проектирования. 2018. Т. 8. №3(29). – С. 449-468.

Modelling and simulation in technical systems

Моделирование и управление в технических системах

Исследование комбинированной системы виброзащиты механических объектов

Абакумов А.М.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
abakumov-am@yandex.ru

Рандин Д.Г.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
randin.dg@samgtu.ru

Абакумов О.А.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
em@samgtu.ru

***Abstract* — This paper explores the effectiveness of a single-mass active system for protection against vibration. It proposes controlling the system by an actuator that exerts extra force action upon the mass protected against vibration. A linear DC motor is considered as such an actuator. The introduction substantiates the necessity of such research and describes the state of the art. It exposes the best-studied issues and prospects for further research. Differential equations of vibrational-system dynamics are derived from a single-mass vibrational model (a second-order Lagrange equation). Transforms are used to produce transfer functions (TF) that link the output variables (displacement and vibrational acceleration of the protected object) to the disturbance action. The researchers have developed a combined vibration protection system and present herein the mathematical models of its basic functional elements. They have synthesized a communication-channel disturbance-based controller and tested the effectiveness of a system using such controller. Extra feedback on the vibrational acceleration of the protected object has been tested for feasibility. A combined system using both acceleration feedback and disturbance feedback has been tested for effectiveness. The paper ultimately presents the research findings.**

Ключевые слова — vibration protection system, additional force influence, electromechanical actuator, single-mass oscillating system, feedback on disturbance.

I. Введение

В настоящее момент возрастает интерес к электромеханическим системам виброзащиты, позволяющим снизить массогабаритные показатели и повысить качество виброзащиты. Вопросы разработки, управления и оптимизации электромеханических систем виброзащиты, к настоящему времени, изучены не в полной мере. Можно выделить два направления исследований: первый, связан с совершенствованием конструкций исполнительных устройств [1] и второй [2], связанный с изучением эффективности активных систем виброзащиты с различными алгоритмами управления. Существенное внимание уделяется отысканию оптимальных алгоритмов управления [3], исследованию робастных свойств систем виброзащиты [4], использованию фаззирегуляторов [5] и нейронных сетей [6].

В активных виброзащитных системах дополнительно используются управляемые элементы вязкого трения, в частности, магнитореологические демпферы (МРД) [7]. Существенного повышения качества виброзащиты можно достичь за счет применения исполнительных элементов, создающих дополнительные силовые воздействия на объект защиты независимо от обобщенных координат системы и ее производных. При разработке систем активной виброзащиты, особенно транспортных средств, традиционно используется схема с параллельной установкой элемента жесткости и вязкого сопротивления – схема Кельвина. Использование такой схемы позволяет эффективно управлять резонансными и зарезонасными виброзащитными свойствами системы.

В качестве исполнительных элементов наиболее часто используются пневмобалоны [8] и линейные электромеханические преобразователи [9]. Применением последних, дополнительно, создает возможность генерировать электрическую энергию [10] или выполнять альтернативные функции, например, в качестве привода компрессора пневмосистемы [11].

Системы активной виброзащиты выполняются преимущественно в виде замкнутых систем [12]. Представляет интерес оценка возможности повышения качества управления за счет введения в систему дополнительных каналов связи, в частности, связи по возмущению. Исследованию этого вопроса и посвящена настоящая статья.

II. Математическая модель системы виброзащиты

Для исследования вертикальных колебаний виброзащищаемых механических объектов используется расчетная схема двухмассовой колебательной системы с двумя степенями свободы [13]. В ряде случаев, характерных для транспортных средств и стационарного механического оборудования, возможен переход к упрощенной одномассовой расчетной схеме, приведенной на рис. 1.

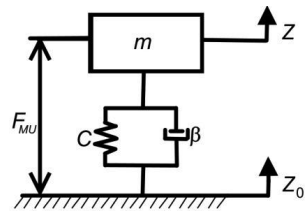


Рис. 1. Расчетная схема одномассовой колебательной системы: m – масса защищаемого объекта массой; C – жесткость упругого элемента; β – коэффициент вязкого сопротивления; F_{mu} – дополнительное силовое воздействие, Z – координата защищаемого объекта; Z_0 – координата основания.

Возможность перехода от двухмассовой колебательной системы к одномассовой обусловлена допущение о том, что жесткость упругого элемента неподрессоренной части, особенно в современных транспортных средствах с низкопрофильными шинами, значительно выше (более чем в 10 раз) жесткости упругого элемента подрессоренной части. В связи с

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

этим, при математическом моделировании системы виброзащиты, жёсткостью упругого элемента неподрессоренной части допустимо пренебречь.

Также в упрощенной расчетной схеме одномассовой колебательной системы не учитываются силы трения, поскольку они не обеспечивают эффективного демпфирования колебаний на резонансных частотах. В частности, в подвесках транспортных средств с сухим трением коэффициент затухания равен 0,05-0,1, а в подвесках с амортизаторами 0,3.[14]

В активных системах виброзащиты с помощью исполнительного элемента формируется дополнительное управляющее воздействие в виде силы F_{MU}. Оно может создаваться исполнительными элементами в виде ЛДПТ или управляемого МРД, которые устанавливаются параллельно элементам жесткости и демпфирования с коэффициентами C и β (рис.1). ЛДТП, как исполнительный элемент, позволяет создавать дополнительные силовые воздействия на виброзащищаемый объект в функции управляющего воздействия как в переходных, так и установившихся режимах. У МРД, создаваемое дополнительное усилие является нелинейной функцией управляющего воздействия и скорости взаимного перемещения элементов демпфера, что не позволяет воздействовать на статические свойства системы.

Для расчетной схемы, на основе уравнения Лагранжа второго рода, получены дифференциальные уравнения движения для малых отклонений с учетом F_{MU}, создаваемого исполнительным элементом:

$$m\frac{d^2Z}{dt^2} = \beta\left(\frac{dZ_0}{dt} - \frac{dZ}{dt}\right) + C(Z_0 - Z) + F_{MU} = 0. \quad (1)$$

Или в операторной форме:

$$mZ(p)p^2 = (\beta p + C)[Z_0(p) - Z(p)] + F_{MU}(p) = 0. \quad (2)$$

Запишем уравнение (2) в виде:

$$Z(p) = {}^{1}/_{mp^2}\{(\beta p + C)[Z_0(p) - Z(p)] + F_{MU}(p)\}. \quad (3)$$

Перейдем от перемещений Z_i к ускорениям ε_i:

$$\varepsilon_0(p) = p^2 Z_0(p);\ \varepsilon(p) = p^2 Z(p) \quad (4)$$

Преобразуем уравнение (3) к виду:

$$\varepsilon(p) = \frac{1}{m}\left\{\frac{\beta p + C}{p^2}[\varepsilon_0(p) - \varepsilon(p)] + F_{MU}(p)\right\}. \quad (5)$$

Приведенному операторному уравнению (5) соответствует структурная схема, показанная на рис. 2.

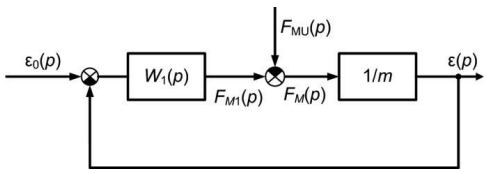


Рис. 2. Структурная схема одномассовой управляемой колебательной системы

Введем обозначения:

$$W_1(p) = \frac{\beta p + C}{p^2} = \frac{C}{p^2}(T_2 p + 1), T_2 = \frac{\beta}{C}. \quad (6)$$

На основании структурной схемы получена ПФ пассивной системы виброзащиты (без дополнительного силового воздействия) относительно возмущающего воздействия:

$$W_1^{\varepsilon\varepsilon_0}(p) = \frac{\varepsilon(p)}{\varepsilon_0(p)} = \frac{T_2 p + 1}{T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1}, \quad (7)$$

где $T_1 = \sqrt{{}^{m}/_{C}}$; $\xi_1 = {}^{\beta}/_{2T_1}$.

Рассмотрим возможность повышения качества виброзащиты за счет введения в систему виброзащиты канала связи по возмущению ε_0. Сигнал, пропорциональный ε_0, для транспортных средств может быть получен с помощью акселерометра, размещенного на элементах неподрессоренной части транспортного средства. Для стационарных механических объектов акселерометр может быть установлен на фундаменте несущих конструкций.

Структурная схема системы с каналом связи по возмущению приведена на рис. 3.

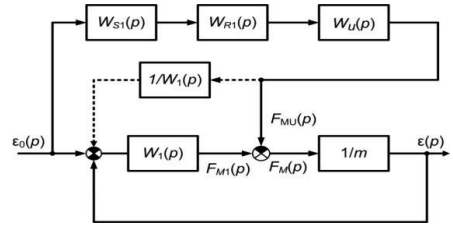


Рис. 3. Структурная схема системы со связью по возмущению

Динамические свойства звеньев канала связи по возмущению описываются ПФ: $W_{SI}(p)$ – акселерометра, $W_{RI}(p)$ - регулятора, $W_U(p)$ – исполнительного элемента.

Перенеся выходной сигнал $F_{MU}(p)$ на вход первого узла сравнения (как показано на рис. 3 пунктиром), не сложно записать условие инвариантности выходной переменной ε относительно возмущения ε_0:

$$\varepsilon_0(\mathrm{p}) - \varepsilon_0(\mathrm{p})W_S(\mathrm{p})W_{R1}(\mathrm{p})W_U(\mathrm{p})\,{}^{1}/_{\mathrm{W_1(p)}} = 0.$$

Откуда ПФ регулятора, обеспечивающего условия инвариантности

$$W_{R1}(p) = \frac{W_1(p)}{W_S(p)W_U(p)} = \frac{C(T_2 p + 1)}{p^2 W_S(p)W_U(p)}.$$

Как следует из приведенного выражения, регулятор должен осуществлять двойное интегрирование сигнала ускорения ε_0, то есть обеспечивать формирование сигнала, пропорционального перемещению основания Z_0. Технически, такая операция приводит к существенным погрешностям. Кроме того, полученный идеализированный регулятор, при использовании в качестве исполнительного элемента ЛДПТ, будет

обеспечивать также инвариантность перемещения Z относительно возмущения Z_0, что вызовет изменение статических свойств системы виброзащиты. Такие свойства системы виброзащиты могут быть полезны, например, в задачах стабилизации положения элементов прецизионного механического оборудования или положения кузова транспортного средства при непрямолинейном движении.

Для транспортных средств, представляется целесообразным, с помощью канала связи по возмущению обеспечивать снижение ординат амплитудной частотной характеристики (АЧХ) в области резонансной частоты. Можно предложить следующую методику решения этой задачи.

Зададим желаемые (требуемые) динамические свойства системы со связью по возмущению в виде желаемой передаточной функции $W_0^{\varepsilon\varepsilon 0}(p)$. Указанную передаточную функцию целесообразно выбрать в форме ПФ (7), но с бóльшим коэффициентом демпфирования ξ_0, чем у пассивной системы:

$$W_0^{\varepsilon\varepsilon 0}(\mathrm{p}) = \frac{\varepsilon(\mathrm{p})}{\varepsilon_0(\mathrm{p})} = \frac{\mathrm{T_2 p+1}}{\mathrm{T_1^2 p^2+2\xi_0 T_1 p+1}},$$

Выбор значения ξ_0 носит компромиссный характер: увеличение коэффициента демпфирования позволяет снизить максимальное значение АЧХ, но возрастает требуемое значение усилия, создаваемого исполнительным элементом.

Запишем условия, при которых ПФ системы со связью по возмущению будет равна желаемой. Преобразовав структурную схему системы (пунктир на рис. 3), можно записать:

$$\varepsilon_0(\mathrm{p})\left[1 - W_{S1}(p)W_{R1}(p)W_U(p)\,{}^{1}\!/_{W_1(p)}\right]W_1^{\varepsilon\varepsilon 0}(\mathrm{p}) = \varepsilon_0(\mathrm{p})W_0^{\varepsilon\varepsilon 0}(p).$$

Откуда, после преобразований найдем ПФ регулятора

$$W_{R1}(p) = \frac{2T_1(\xi_0-\xi_1)C(T_2 p+1)}{pW_{S1}(p)W_U(p)(T_1^2 p^2+2\xi_0 T_1 p+1)}. \quad (8)$$

Или, пренебрегая инерционностью датчика и исполнительного элемента, то есть, принимая $W_{S1}(p)=k_{s1}$, $W_U(p)=k_U$ можно записать:

$$W_{R1}(p) = \frac{(T_2 p+1)}{T_{R1}p(T_1^2 p^2+2\xi_0 T_1 p+1)}, \quad (9)$$

где $T_{R1} = \frac{k_{S1}k_U}{2T_1(\xi_0-\xi_1)C}$.

Исследование динамических характеристик разработанной системы проведено с использованием стандартных программ моделирования для следующих исходных данных [15]: m=80кг; С=15кН/м; β=455Па·с·м; T_1=0,073с; T_2=0,03с; ξ_1=0,21; ξ_0=0,4.

Анализировались АЧХ различных вариантов систем для выходной переменной ε и входной ε_0:

$$A_i(\omega) = \frac{A_{\varepsilon i}(\omega)}{A_{\varepsilon 0 i}(\omega)}$$

где $A_{\varepsilon i}(\omega)$ – АЧХ виброускорений защищаемого объекта;

$A_{\varepsilon 0 i}(\omega)$ – АЧХ виброускорений основания.

На рис.4 показаны АЧХ пассивной системы - $A_1(\omega)$ и системы со связью по возмущению с синтезированным регулятором - $A_2(\omega)$.

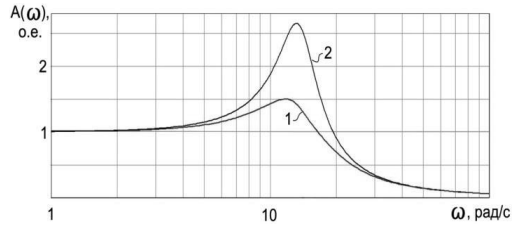


Рис. 4. АЧХ: 1 - система со связью по возмущению, 2 – пассивная система виброзащиты

Как следует из приведенных результатов, введение связи по возмущению позволяет снизить значение максимума АЧХ с 2,7 до 1,5.

На рис.5 представлены переходные характеристики рассматриваемых систем. Показатели качества переходной характеристики для пассивной системы: время регулирования t_p=0,98с, перерегулирование σ=56%; для системы со связью по возмущению t_p=0,56с, σ=28%.

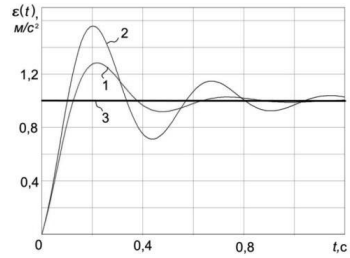


Рис. 5. Переходные характеристики: 1 - система со связью по возмущению, 2 – пассивная (разомкнутая) система; 3 – единичное ступенчатое воздействие

Расчет параметров канала связи по возмущению ведется для номинальных значений параметров объекта. В реальных условиях эти параметры могут существенно изменяться, что приводит к отклонению характеристик системы от желаемых. Как показал анализ, рассматриваемая система наиболее чувствительна к изменению параметров жесткости и демпфирования.

Для снижения чувствительности системы к возможным вариациям параметров в систему целесообразно ввести канал отрицательной обратной связи по выходной переменной – ускорению ε виброзащищаемого объекта, то есть использовать комбинированную систему (рис.6). Канал обратной связи в комбинированной системе создается с помощью датчика ускорения ε виброзащищаемого объекта с передаточной функцией $W_{S2}(\mathrm{p})$ и регулятора с ПФ $W_{R2}(p)$.

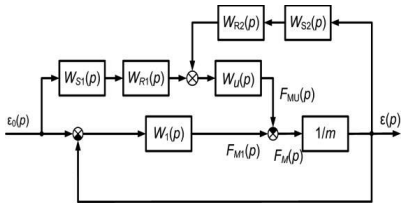


Рис. 6. Структурная схема комбинированной системы

В [16] рассмотрена методика синтеза регулятора в замкнутой системе виброзащиты, получена его ПФ в виде

$$W_{R2}(p) = \frac{T_{R21}p + 1}{T_{R22}p},$$

и определены его параметры.

АЧХ комбинированной системы виброзащиты (кривая 1), содержащей канал связи по возмущения и канал отрицательной обратной связи с выбранными регуляторами, приведена на рис.7. Здесь же, для сравнения, показана АЧХ (кривая 2) системы со связью по возмущению.

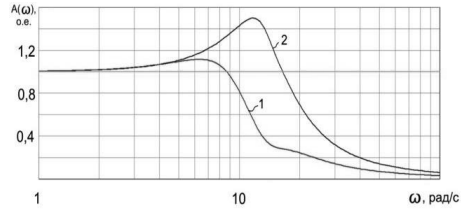


Рис. 7. АЧХ: 1 – комбинированной системы, 2 - в системе со связью по возмущению

Из рис.7 следует, что введение канала отрицательной обратной связи позволяет дополнительно снизить значение максимума АЧХ до 1,15.

III. Заключение

На основе разработанной математической модели активной системы виброзащиты с исполнительным элементом, создающим дополнительное силовое воздействие на объект, проведен выбор регулятора в канале связи по возмущению, а также рассмотрена комбинированная система, содержащая дополнительно канал отрицательной обратной связи, и показана возможность существенного повышения эффективности виброзащиты.

Список литературы

[1] Kazakov, Yu.B. Development of models of the magnetorheological fluid damper / Yu.B. Kazakov, N.A. Morozov, S.A. Nesterov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2017. — Vol. 431. — P. 269—272.

[2] A. M. Abakumov; V. E. Antropov; D. G. Randin Electrotechnical vibration isolation system with a magnetorheological damper // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017, pp. 1 – 4.

[3] R.S. Prabakar, C. Sujatha, S. Narayanan Optimal semi-active preview control response of a half car vehicle model with magnetorheological damper // Journal of Sound and Vibration Volume 326, Issues 3–5, 9 October 2009, Pages 400–420.

[4] K. El Majdoub, F. Giri. , F.Z. Chaoui Backstepping adaptive control of quarter-vehicle semi-active suspension with Dahl MR damper model // IFAC Proceedings Volumes Volume 46, Issue 11, 2013, Pages 558-563.

[5] Banna Kasemi, Asan G.A. Muthalif, M. Mahbubur Rashid Fuzzy-PID Controller for Semi-Active Vibration Control Using Magnetorheological Fluid Damper // Procedia Engineering Volume 41, 2012, Pages 1221-1227.

[6] K.C. Schurter ; P.N. Roschke Neuro-fuzzy control of structures using magnetorheological dampers // Proceedings of the 2001 American Control Conference. 2001 , Issue 2, pp.1097 – 1102.

[7] A.M. Abakumov ; D.G. Randin Studying an Active Vibration-Protection System with a Linear DC Actuators // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2018, pp. 1 – 4.

[8] Abakumov A.M.. Miatov G.N. Control algoritms for active vibration isolation systems subject to randoms disturbances // Journal of Sound and Vibration. 2006. Т. 289. № 4-5. С. 889-907.

[9] Seok-Jun Moon, Tae-Young Chung, Chae-Wook Lim, Doo-Hoon Kim A linear motor damper for vibration control of steel structures // Mechatronics, Volume 14, Issue 10, 2004, pp. 1157-1181.

[10] Grachev, P.Y., Bazarov, A.A., Tabachinskiy, A.S. Variable cross-section windings for efficiency improvement of electric machines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018.

[11] Yalu Pei, Yilun Liu, Lei Zuo Multi-resonant electromagnetic shunt in base isolation for vibration damping and energy harvesting // Journal of Sound and Vibration, 2018, Volume 423, pp. 1-17.

[12] Hanying Jiang, Kun Liang, Zhaohua Li Characteristics of a novel moving magnet linear motor for linear compressor // Mechanical Systems and Signal Processing, Issue 121, 2019, pp. 828-840.

[13] Pacejka H. Tire and Vehicle Dynamics. 3rd Edition. — Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2012. 629 p. — ISBN: 978-0-08-097016-5.

[14] ARotenberg R. V. Suspension system of a car. Weave and smoothness of movement. - Moscow. : Mashinostroenie, 1972. – 392 p.

[15] Abakumov A.M. Research of the effectiveness of the active vibration isolation system with a magnetorheological damper / Abakumov A.M., Randin D.G.// Scientific and Technical Journal “Russian Electromechanics”, Issue 6, 2016, pp. 68-71.

[16] A. M. Abakumov Electrotechnical vibration isolation system with a magnetorheological damper / A. M. Abakumov ; V. E. Antropov ; D. G. Randin // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017.

Построение компьютерной модели неустановившейся фильтрации газа для двумерного случая методом конечных объёмов

Абрамкин С.Е.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
abrsergey@yandex.ru

Душин С.Е.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
dushins@yandex.ru

Сирота Д.Д.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
sdd.spb@outlook.com

***Abstract* — Reservoir modeling is a powerful tool for obtaining information about the processes associated with the development of a field. This paper presents models of gas filtration processes in the form of partial differential equations, a numerical model that represents an implicit finite difference scheme, and uses the finite volume method. Using the obtained models, software was developed, that allows modeling for the two-dimensional case of non-stationary gas filtration.**

Ключевые слова — математическое моделирование, фильтрация газа в пласте, метод конечных объёмов

I. Введение

Текущая разработка ведется с целью получения компьютерной модели неустановившейся фильтрации газа в пласте, в рамках создания математической модели единого управляемого газодобывающего комплекса. Использование моделей, основанных на физически содержательных математических законах, позволяет управлять разработкой месторождений, подбирая такие режимы эксплуатации, при которых снижаются риски возникновения и развития осложнений, а также повышаются коэффициенты извлечения углеводородов. При создании динамических моделей можно исследовать пласт более детально за счет разбиения его на блоки и применения к каждому из них уравнений фильтрации, что позволяет моделировать нестационарные процессы в пласте. Имеющиеся для этой цели пакеты программ (Eclipse, Tempest, tNavigator и др.) имеют высокую стоимость, требуют ежегодного обновления лицензии, и главное, выполнены в виде «черного ящика». В результате чего отсутствует возможность корректировать программное обеспечение с целью создания моделей управляемых (и даже неуправляемых) процессов и разработки систем, базирующихся, в том числе, на современных методах и технологиях управления. Таким образом, возникает необходимость разработки математических и компьютерных моделей процессов фильтрации в пласте, а также программного обеспечения численного моделирования. Современная теория управления предлагает множество высокоэффективных методов, не ограничиваясь только простейшими регуляторами. Поэтому важной характеристикой программного обеспечения является возможность работы в режиме реального времени. Основные задачи данной работы:

- построение численной модели неустановившейся фильтрации методом конечных объёмов;
- разработка программы моделирования фильтрационных процессов (симулятор);
- анализ возможностей быстродействия компьютерной модели.

II. Построение численной модели фильтрации

Основной формой пластовой энергии, обеспечивающей приток газа к скважинам, является энергия упругой деформации газа и твердого скелета пласта. Математическая модель неустановившейся фильтрации газа в деформируемой пористой среде, при допущениях, что проницаемость и вязкость постоянны, формируется путем подстановки закона сохранения импульса (в виде закона фильтрации Дарси) в уравнение неразрывности потока [1]. Тогда уравнение неразрывности потока и закон Дарси, соответственно:

$$-\left(\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}\right)=\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z},$$

$$w=-\frac{k}{\mu}\left(\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial p}{\partial z}\right),$$

где p – давление, t – время, ϕ – пористость, k – проницаемость, μ − вязкость, ρ – плотность газа, w – скорость фильтрации.

В результате математическая модель неустановившейся фильтрации газа имеет вид [2]:

$$\frac{\partial p}{\partial t}=\kappa\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial z^2}\right),\quad \kappa=\frac{k}{\mu(\beta_{\text{п}}+\phi\beta_{\text{г}})},$$
$$\beta_{\text{п}}=-\frac{1}{V}\frac{\partial V}{\partial p}=\frac{\partial \phi}{\partial p},\quad \beta_{\text{г}}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial p},\qquad (1)$$

где κ – коэффициент пьезопроводности, $\beta_{\text{п}}$, $\beta_{\text{г}}$ – коэффициенты сжимаемости породы и газа соответственно.

Уравнение (1) – основное уравнение теории упругого режима фильтрации. Коэффициент κ характеризует скорость перераспределения пластового давления при неустановившейся фильтрации упругого флюида в упругой пористой среде.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

A. Дискретизация уравнения неустановившейся фильтрации для одномерного случая

Преобразуем уравнение фильтрации конечными разностями, используя неявную схему, так как неявные схемы обладают повышенными свойствами устойчивости по сравнению с явными, хотя и уступают им в быстродействии. Рассмотрим одномерный пласт длиной L, разделенный на N пространственных блоков – конечных объемов, с использованием блочно-центрированной схемы (узлы сетки располагаются в центрах блоков). В результате аппроксимации частных производных соответствующими конечными разностями получается следующая система линейных алгебраических уравнений [3]:

$$\frac{p_i^{n+1}-p_i^n}{\Delta t}=\kappa\frac{p_{i-1}^{n+1}-2p_i^{n+1}+p_{i+1}^{n+1}}{\left(\Delta x^2\right)}$$

Вынесем временную и пространственную составляющие в виде отдельного множителя:

$$\eta=\frac{\kappa\Delta t}{(\Delta x)^2}.$$

Тогда уравнение одномерной фильтрации примет вид:

$$-\eta p_{i-1}^{n+1}+(1+2\eta)p_i^{n+1}-\eta p_{i+1}^{n+1}=p_i^n.$$

Система уравнений для блоков в матричной форме:

$$(\mathbf{I}+\eta\mathbf{A})\mathbf{p}^{n+1}=\mathbf{p}^n. \qquad (2)$$

Конечно-разностные соотношения частных производных компонентов закона фильтрации, представленные выше, имеют размерность давления. Однако, в случаях моделирования пласта с учетом скважин, более предпочтительной является запись в единицах расхода. Чтобы преобразовать к данному виду уравнение фильтрации, добавим следующее соотношение:

$$\frac{A\Delta x\phi c_t}{B_w\Delta t}=\frac{V\phi c_t}{B_w\Delta t},$$

где A, V – площадь и объем блока соответственно, B_w – объемный коэффициент флюида, c_t – сжимаемость.

Для удобства, введем соответствующие переменные для блоков:

$$B_i=\frac{V\phi c_t}{B_w},\quad T_i=\frac{kA}{\mu B_w\Delta x}.$$

T и B обладают физическим смыслом. Коэффициент B отражает емкостные свойства блока, а T (проводимость) – фильтрационные. Для системы уравнений одномерной фильтрации матрица проводимости является трёхдиагональной. Система уравнений (2), приведенная к единицам расхода, с учетом граничных условий [4]:

$$\left[\underbrace{\frac{1}{\Delta t}\begin{pmatrix}B_1 & & & \\ & B_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & B_N\end{pmatrix}}_{\mathbf{B}}+\underbrace{\begin{pmatrix}T(1+2\omega_1) & -T & 0 & 0\\ -T & 2T & -T & 0\\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots\\ 0 & 0 & -T & T(1+2\omega_2)\end{pmatrix}}_{\mathbf{T}}\right]$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix}p_1\\ p_2\\ \vdots\\ p_N\end{pmatrix}^{n+1}}_{\mathbf{p}^{n+1}}=\frac{1}{\Delta t}\underbrace{\begin{pmatrix}B_1 & & & \\ & B_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & B_N\end{pmatrix}}_{\mathbf{B}}\underbrace{\begin{pmatrix}p_1\\ p_2\\ \vdots\\ p_N\end{pmatrix}^{n}}_{\mathbf{p}^{n}}+\underbrace{\begin{pmatrix}2\omega_1 T p_{B1}\\ 0\\ \vdots\\ 2\omega_2 T p_{B2}\end{pmatrix}}_{\mathbf{Q}},$$

$$\omega=\begin{cases}0, & \text{если граничные условия Неймана (2 рода)}\\ 1, & \text{если граничные условия Дирихле (1 рода)}\end{cases}$$

где p_{B1}, p_{B2} – давления для соответствующих граничных условий.

Или кратко:

$$\left(\mathbf{T}+\frac{\mathbf{B}}{\Delta t}\right)\mathbf{p}^{n+1}=\frac{\mathbf{B}}{\Delta t}\mathbf{p}^n+\mathbf{Q}, \qquad (3)$$

где Q – расход флюида в блоке в результате действия источников/стоков (скважин).

B. Дискретизация уравнения неустановившейся фильтрации для двумерного случая

Рассмотрим двумерный пласт длиной L и шириной W (рис. 1). Дискретизация по пространству выполняется путем разбиения моделируемой области на NX и NY узлов. Суммарное число блоков составляет $N = NX \times NY$. Каждый конечный объем обозначается индексами i и j. Вместе с тем, возможна нумерация блоков одним целочисленным индексом, что является удобным при разработке алгоритмов для компьютерной модели. В данной работе принята нумерация пространственных блоков, в соответствии с соотношением: $l=(j-1)NX+i$ [4].

j=NY=3	9	10	11	12
j=2	5	6	7	8
j=1	1	2	3	4
	i=1	i=2	i=3	i=NX=4

Рис. 1. Продуктивный пласт, дискретизированный по пространству с использованием l – нумерации

В случае двумерной фильтрации, каждый блок взаимодействует с двумя, тремя или четырьмя соседними блоками, что определяет вид матрицы проводимостей. В качестве примера, рассмотрим вид **T** для системы из рис. 1, при непроницаемых границах пласта (граничные условия 2 рода) и отсутствии скважин:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix}
2T & -T & & & -T & & & & & & & \\
-T & 3T & -T & & & -T & & & & & & \\
 & -T & 3T & -T & & & -T & & & & & \\
 & & -T & 2T & & & & -T & & & & \\
-T & & & & 3T & -T & & & -T & & & \\
 & -T & & & -T & 4T & -T & & & -T & & \\
 & & -T & & & -T & 4T & -T & & & -T & \\
 & & & -T & & & -T & 3T & & & & -T \\
 & & & & -T & & & & 2T & -T & & \\
 & & & & & -T & & & -T & 3T & -T & \\
 & & & & & & -T & & & -T & 3T & -T \\
 & & & & & & & -T & & & -T & 2T
\end{pmatrix}$$

Таким образом, при использовании *l*-нумерации, матрица проводимостей является пятидиагональной. В остальном, система уравнений для двумерного случая аналогична системе (3).

III. Разработка компьютерной модели

A. Интерпретация скважин

В рамках данной работы рассматривается случай однофазной фильтрации газа, при допущениях, что продуктивный пласт, вскрывается совершенными скважинами с вертикальным окончанием, которые интерпретируются как внутренние границы пласта. Моделируемые скважины располагаются в центре блока. В пластовых симуляторах наиболее распространены два типа граничных условий (не считая смешанных): в виде заданного давления на забое (граничные условия 1 рода) или в виде заданного дебита скважины (граничные условия 2 рода). При такой постановке возможен расчет забойного давления, при заданном дебите и наоборот – расчет дебита, при заданном забойном давлении в зависимости от времени. Существует несколько связывающих соотношений для расчета неизвестных: модель Ван-Полена, модель Писмана и модель Абу-Кассема и Азиза. В настоящее время модель Ван-Полена почти не используется [4], а модель Абу-Кассема и Азиза удобна для расчетов при расположении скважин не в центре блоков. Поэтому, для учета скважин в данной работе используется модель Писмана, которая хорошо подходит для расчетов в блочно-центрированных сетках. Согласно данной модели радиус, при котором давление в блоке со скважиной соответствует средневзвешенному давлению в пласте (эквивалентный радиус) для случая квадратной сетки, задается следующим соотношением:

$$r_{eq} = 0,2\Delta x.$$

Чтобы перейти к расчету забойного давления добывающей скважины, работающей в режиме постоянного расхода, используется следующее соотношение [4]:

$$P_{\text{заб}} = P_l - \frac{q_{\text{скв}}\mu B}{2\pi kh} ln\left(\frac{0.2\Delta x}{r_{\text{скв}}}\right) = P_l - \frac{q_{\text{скв}}}{J_l^{\text{скв}}}$$

где J – коэффициент продуктивности скважины, $r_{\text{скв}}$ – радиус скважины, P_l – средневзвешенное давление в блоке.

B. Компьютерная модель

Компьютерная модель может быть реализована различными способами. В данной разработке был выбран язык программирования Python, за счет имеющихся в наличии эффективных расширений для работы с массивами и матрицами и отсутствия необходимости в приобретении лицензии. Тем не менее, компьютерная модель может быть успешно реализована и, например, средствами Matlab, C++ и др.

Решаемая симулятором задача математически сводится к аппроксимации дифференциальных уравнений двумерной неустановившейся фильтрации газа в пласте (трёхмерность реальных месторождений учитывается введением мощности пласта). Координаты и расходы скважин, начальные и граничные условия, пластовые свойства и параметры флюида задаются в исходных данных. Затем рассчитывается коэффициенты **T** и **B**. Вычисляются номера блоков, содержащих скважины. Далее полученные матрицы, совместно с вектором расхода **Q**, преобразуются из плотных матриц в разреженные.

Выходными данными являются вычисленные значения давления в блоках с первым порядком точности по времени и вторым порядком точности по пространственной координате. Модель учитывает скважины, их взаимное влияние и рассчитывает давления на забое в зависимости от времени.

Для оценки возможностей быстродействия, решение задачи моделирования в симуляторе реализовано различными методами. В качестве исходных данных по части параметров флюида и породы-коллектора для вычислительного эксперимента использовались осредненные промысловые данные одного из объектов разработки существующего газового месторождения.

ТАБЛИЦА I. Исходные данные для моделирования

Параметр	Значение
Длина пласта (м)	3000
Ширина пласта (м)	3000
Высота пласта (м)	20
Пористость (д. ед.)	0,2
Проницаемость коллектора (м^2)	$12{,}9\cdot10^{-15}$
Начальное давление (Па)	$7\cdot10^{6}$
Вязкость газа (Па·с)	$2\cdot10^{-5}$
Координаты (x ; y) добывающей скважины №1 (м)	(1000; 1500)
Координаты (x ; y) добывающей скважины №2 (м)	(2000; 1500)
Расход газа в добывающей скважине №1 (м^3/сут)	$360\cdot10^{3}$
Расход газа в добывающей скважине №2 (м^3/сут)	$480\cdot10^{3}$

Скважины вскрывают пласт полностью и пускаются в работу одновременно, при этом пласт считается однородным. Пласт дискретизирован по пространственной координате на 90601 блоков (301 х 301 узел). Конечное время моделирования – 30 сут с шагом в 1 сут. Полученные результаты моделирования процессов представлены на рис. 2-3.

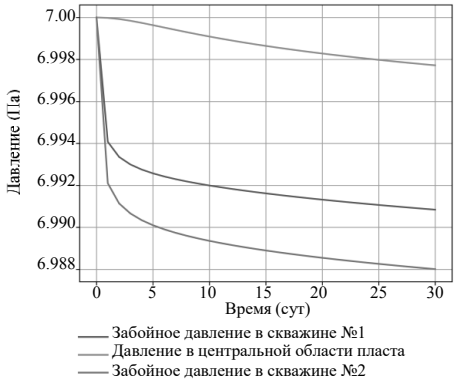


Рис. 2. Давление на забоях скважин и центральной точке пласта в зависимости от времени

Результаты моделирования показали, что в заданном пласте, при пуске в эксплуатацию двух добывающих скважин с соответствующими дебитами 360 и 480 тыс. $м^3$/сут, значение давления в центральной области пласта на конечное время расчета составило 6997720 Па, в отличие от скважин №1 и №2, где давление на забое равно 6990840 и 6988011 Па соответственно. Темпы снижения давления особенно высоки в первые дни после запуска скважин.

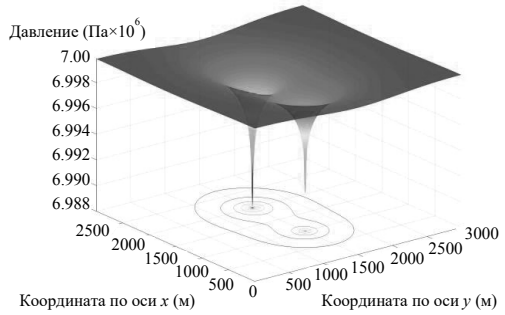


Рис. 3. Распределение давления в пласте на конечное время моделирования

С течением времени, характер и скорость снижения давления выравнивается по всей площади дренирования. Это связано со свойствами пласта, в частности, с коэффициентом пьезопроводности, который характеризует темпы распределения пластового давления.

В таблице 2 представлено сравнение быстродействия реализованных методов расчета для заданного случая, а также расхождения между полученными решениями в точке забоя скважины №2 на конечное время моделирования. Моделирование производилось на процессоре Intel Core i5-6500 (3200MHz) и 16 Gb ОЗУ.

ТАБЛИЦА II. БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ МЕТОДОВ

Метод	Время расчета (с)	Полученное решение (Па)
LU – разложение	31.32	6988011.54
Метод сопряженных градиентов (CG)	4.29	6988011.56
Метод минимальных невязок (MinRes)	24.83	6988011.59
Обобщенный метод минимальных невязок (GMRes)	11.68	6988011.59
Стабилизированный метод бисопряженных градиентов (biCGStab)	7.14	6988011.61
Сдвоенный метод сопряженных градиентов (CGS)	12.86	6988011.51

Среди использованных итерационных алгоритмов, метод сопряженных градиентов, оказался наиболее близким к ответу, полученному прямым методом, при этом более, чем в 7 раз эффективнее по затратам времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При управлении разработкой месторождений газа, в качестве управляющих воздействий можно рассматривать расходы добывающих скважин. Полученная компьютерная программа-симулятор, при заданных значениях параметров пласта, флюида и расхода газа на выходе из скважин, рассчитывает распределение поля давления в однородном двумерном пласте в зависимости от времени, учитывая изменения забойных давлений скважин. Реализованные в симуляторе алгоритмы расчета показали высокую эффективность метода сопряженных градиентов, что делает возможным применение данной модели для целей синтеза системы управления газодобывающим комплексом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 416 с.

[2] Куштанова, Г.Г. Подземная гидромеханика. Казань: Изд-во Казан. (Приволж.) федер. ун-та, 2010. – 67 с.

[3] Алишаев М.Г. Моделирование и расчёт в прикладной механике и добыче нефти. Махачкала: Изд-во АЛЕФ, 2015. – 288 с.

[4] Эртекин Т., Абу-Кассем Дж., Кинг Г. Основы прикладного моделирования пластов. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. – 1060 с.6

Применение квазиоптимального корреляционного алгоритма для моделирования текстуры микрорельефа в оптико-электронных измерительных системах

Абрамов А.Д.
Самарский государственный технический университет
г.Самара, Россия
abraleks@bk.ru

***Abstract* — The article discusses the use of a quasi-optimal correlation algorithm for constructing a two-dimensional autocorrelation function for a binary image of the studied microrelief texture of precision machined surfaces. The binary image was formed using an optical-electronic system and computer processing of halftone microrelief images. It has been established that the most informative characteristic of the microrelief of the surfaces of the investigated parts that are significantly different from each other with a given probability is the average amplitude of the variable component of the autocorrelation function**

Ключевые слова — texture, microrelief, precision surface image digital processing, autocorrelation, quasioptimal algorithm, identification.

I. ВВЕДЕНИЕ

Многочисленными исследованиями установлено существенное, а в некоторых случаях и определяющее воздействие текстуры рабочих поверхностей различных деталей машин и механизмов на надёжность и долговечность при их эксплуатации [1,2]. Соответственно, разработка новых методов и средства для оценки текстуры поверхности рабочих поверхностей прецизионных деталей является актуальнейшей задачей современного машиностроения. Использование оптико-электронных средств и компьютерной обработки полученной информации о параметрах исследуемой текстуры поверхности в настоящее время находит всё более широкое применение в машиностроении [3-5]. Однако, известные оптико-электронные методы, такие как метод светового сечения и теневой проекции, растровый и интерференционный метод, рефлектометрические методы требуют применения специализированных микроскопов и повышенных требований к стабильности светового потока, падающего на исследуемую поверхность. В связи с этим они используются, как правило, только в лабораториях и их применение непосредственно в производственных условиях практически невозможно.

II. АНАЛИЗ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

В работе [5] предложен оптико-электронный метод для анализа текстуры микрорельефа, который позволил математическими методами устранить негативное воздействие функции влияния $f_{вл}(\Delta\Phi,\Delta\alpha)$, где $\Delta\Phi$ и $\Delta\alpha$ отклонения мощности светового потока и угла его падения на исследуемый микрорельеф от номинальных значений. Метод основан на сравнительной корреляционной обработке полутоновых изображений исследуемого и эталонного микрорельефов с использованием для вычисления двухмерной корреляционной функции выражения

$$r_{x,u}=\frac{\sum_{n_1=0}^{N_1-1}\sum_{n_2=0}^{N_2-1}(u(n_1,n_2)-m_u)(x(n_1-k_1,n_2-k_2)-m_x)}{\sigma_1\sigma_2}, \quad (1)$$

где через $u(n_1,n_2)$ обозначен фрагмент изображения (эталон), который расположен внутри зоны поиска $x(n_1,n_2)$, то есть изображения текстуры исследуемого микрорельефа формата $K_1\times K_1$ пикселей, а σ_1 и σ_2 − средние квадратичные отклонения величин $u(n_1,n_2)$ и $x(n_1,n_2)$ от их математических ожиданий m_u и m_x соответственно. При этом параметр текстуры микрорельефа − среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии Ra мкм, широко используемый в машиностроении, определялся для заданной вероятности из экспериментальной зависимости $Ra=f(U_{CP})$ мкм, где U_{CP} − случайное среднее значение переменной составляющей двухмерной автокорреляционной функции [5].

Однако, применение выражения (1) требует значительного объёма вычислительных операций и, следовательно, существенно может снизить возможности предложенного метода для оперативного контроля параметров микрорельефа в реальном масштабе времени. Например, время, затрачиваемое на обработку изображения исследуемой текстуры микрорельефа размером 320×240 пикселей с использованием выражения (1) при формате эталона 16×16 пикселя, составляет 447484мс для ПЭВМ с процессором *Intel(R) Core(TM)2CPU* 4300 @ 1.80*GHz*.

Для существенного повышения быстродействия метода, предложенного в работе [5], были рассмотрены квазиоптимальные корреляционные алгоритмы. Данные алгоритмы нашли широкое применение в корреляционных экстремальных системах навигации (КЭСН) по цифровым картам местности беспилотных летательных аппаратов. В КЭСН предварительно полученная эталонная информация о характеристиках заданного участка трассы полета, сравнивается с текущим изображением, формируемым соответствующими бортовыми устройствами. При этом эталонное изображение ЭИ меньшего формата

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

последовательно сравнивается со всеми участками анализируемого текущего изображения ТИ большего формата. В результате сравнения определяются истинное местоположение летательного аппарата над трассой полёта. Сравнение ТИ и ЭИ в КЭСН – это сравнение посредством функционала, который принимает экстремальное значение при совпадении определённого фрагмента ТИ и ЭИ. Из источников [6 - 10] известно, что при некоторых ограничениях таким функционалом является взаимная корреляционная функция – критериальная функция. При совпадении фрагмента ТИ и ЭИ она достигает максимального значения, а её производная минимального.

Существующие квазиоптимальные корреляционные алгоритмы были разработаны эвристически. Это существенно затрудняет аналитическое исследование для проведения сравнительного анализа при их выборе. Обобщение сведений о квазиоптимальных алгоритмах позволило выделить для их синтеза следующие этапы:

1) выбор вида предварительной обработки изображения;
2) определение критериальной функции;
3) определение способа поиска экстремума критериальной функции.

Синтез квазиоптимального алгоритма для оценки параметров микрорельефа основан на предположении, что обрабатываемые изображения содержат избыточную информацию, устранение которой не снизит вероятность достоверной оценки и уменьшит объём необходимых вычислений. Выделены пять групп критериальных функций со сходными свойствами: корреляционные, спектральные, разностные, парные и ранговые. На основе анализа этих групп для построения корреляционных функций по изображениям микрорельефов в работе были выбраны парные критериальные функции, которые получили наибольшее распространение в системах и алгоритмах, использующих бинарные изображения. При этом наиболее употребляемые функции это: функции Рао, Джекарда, Дейка, Соукала и Снита, Кулзинского, Роджерса и Танимото №1 и №2, Соукала и Мишнера, Юла, Хаммана. С помощью парных критериальных функций может быть получено несколько корреляционно – экстремальных алгоритмов. В работе предложен алгоритм с наименьшим числом вычислительных операций, построенный с использованием парной критериальной функции, в виде

$$r_{x,y}(k_1 k_2) = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{2^{n-1}} F_{ii}(\Delta), \qquad (2)$$

где $F_{ii}(\Delta)$ - парная критериальная функция приобретает единичное значение при совпадении i - того пикселя в ЭИ и фрагменте бинарного ТИ микрорельефа, N– количество сравниваемых элементов в ЭИ и фрагменте ТИ анализируемого микрорельефа. Выражение (2) является коэффициентом корреляции и представляет нормализованную сумму совпавших пикселей в ТИ и ЭИ.

Бинаризация исходного полутонового изображения проводилась по адаптивному методу. Всё исходное изображение исследуемой поверхности разбивалось на независимые квадратные фрагменты (окна) формата 16×16 пикселей и в каждом окне подсчитывался средний уровень яркости видеосигнала $B_{\text{Т}}(x,y)$. Этот уровень и являлся скользящим порогом бинарного преобразования [11]. В результате сравнения каждого пикселя (байта) $B_i(x,y)$ с пороговым значением $B_{\text{Т}}(x,y)$. ему придавалось новое значение по правилу: $B_i(x,y)$ = 0FFH, если $B_i(x,y) \geq B_{\text{Т}}(x,y)$ и $B_i(x,y)$ = 00H, если $B_i(x,y) < B_{\text{Т}}(x,y)$.

Схема формирования и перемещения выделенного ЭИ (эталона) по бинарному изображению исследуемого микрорельефа для вычисления $r_{x,y}(k_1,k_2)$ согласно выражению (2) приведена на рис. 1

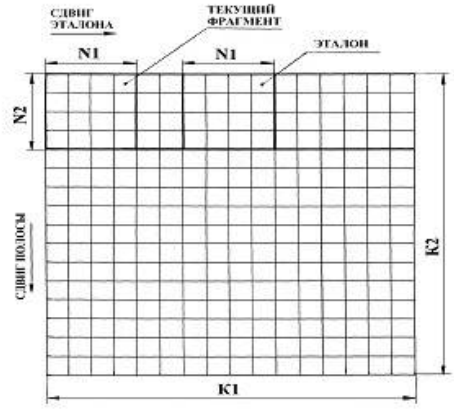


Рис. 1. Схема формирования и перемещения эталона

В бинарном изображении с первой строки выделяется полоса шириной N_2 пикселей и по центру этой полосы задаётся эталон размером $N_1 \times N_2$ пикселей. Затем эталон, начиная с крайней левой позиции, перемещается по выделенной полосе с шагом в 1 пиксель. При каждом совмещении эталона и фрагмента ТИ подсчитывается $r_{x,y}(k_1,k_2)$ по формуле (2). Закончив вычисление $r_{x,y}(k_1,k_2)$ в первой полосе, задаётся следующая полоса того же формата в исходном изображении, что и предыдущая, но смещённая вниз на один пиксель. В этой полосе по центру задаётся новый эталон, но с теми же размерами что и предыдущий, и выполняются те же самые действия для вычисления $r_{x,y}(k_1,k_2)$ и.т.д. Так как эталон формируется в самом анализируемом ТИ микрорельефа, коэффициенты $r_{x,y}(k_1,k_2)$ являются коэффициентами автокорреляции. Обработав всё изображение по рассмотренному методу, получим матрицу коэффициентов автокорреляции или двухмерную автокорреляционную функцию. При использовании данного метода также компенсируется и дополнительная погрешность оценки параметров микрорельефа, возникающая в результате воздействия функции влияния $f_{\text{вл}}(\Delta\Phi,\Delta\alpha)$:

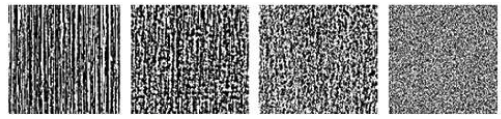
$$\Delta B = B_{\text{Т}} f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) - B_{\text{Э}} f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) =$$
$$= f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)(B_{\text{Т}} - B_{\text{Э}}) = f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) \cdot 0 = 0$$

при $B_{\text{Т}} = B_{\text{Э}}$. Кроме того, согласно (2) только в этой точке и наращивается сумма совпавших по значению пикселей эталона $B_{\text{Э}}$ и фрагмента ТИ - $B_{\text{Т}}$.

Для проведения исследований о состоянии микрогеометрии поверхности (часто используется термин шероховатость) механических изделий был использован современный цифровой измерительный микроскоп серии *Smart Vision* [12]. Классические информационно измерительные системы (ИИС), использующие цифровые измерительные микроскопы серии *Smart Vision* и компьютерную обработку визуальной информации, предназначены для бесконтактного контроля геометрии, размеров и качества поверхности различных деталей в режиме 2*D*. Микроскоп комплектовался персональным компьютером, для которого в процессе исследования разрабатывались специальные алгоритмы и программы. В качестве видеокамеры использовалась камера *DIGITAL CAMERA Computar ZC-F11CH3*, на выходе которой формировались чёрно-белые изображения исследуемых поверхностей заданного формата.

Методом шлифования и полирования были изготовлены образы эталонных поверхностей с различной микрогеометрией из жаропрочного сплава ЖС6ФУ. Для этих же образцов на профилографе модели *SJ* - 201*P* были записаны профилограммы и определены стандартные параметры шероховатости: образец №1 имел $Ra = 0{,}13$ мкм, образец №2 – $Ra = 0{,}084$ мкм, образец №3 – $Ra = 0{,}048$ мкм и образец №4 – $Ra = 0{,}025$ мкм. Найденные значения среднего арифметического отклонения профиля представляют собой средние значения, вычисленные по 10 измерениям для каждого образца, согласно [13, 14].

Оптико-электронная система измерительного комплекса была настроена таким образом, что анализируемая поверхность эталонных образцов имела размер 3×2,5мм, а формат исследуемого изображения микрорельефа поверхности составлял $K_1 \times K_2 =$ $=320 \times 240$ пикселей. Световой поток мощностью $600 \cdot 10^{-3}$ лм падал на исследуемую поверхность под углом 45°. Отметим, что в полученных видеоизображениях исследуемых поверхностей на каждый пиксель отводилось 3 байта. Следовательно, при использовании черно-белой видеокамеры *Computar ZC-F11CH3* полученная информация является избыточной. В связи с этим было выполнено преобразование исходного полутонового изображения поверхности в формат 1 пиксель – 1 байт. Таким образом, диапазон изменения видеосигнала по яркости в полученном полутоновом изображении составил 0 – 255 относительных единиц. Характерные бинарные изображения исследуемых эталонных поверхностей с различной шероховатостью при окне бинаризации 16×16 пикселей приведены на рис.2. Анализ полученных изображений исследуемых поверхностей показал существенное отличие их друг от друга по внешнему виду. При этом для образца №1 с наибольшей шероховатостью $Ra = 0{,}13$ мкм наблюдается ориентированная в вертикальном текстура в виде чередования черных и белых полос, что свидетельствует о доминирующем влиянии на формирование микрорельефа регулярной компоненты. Для образца №2 с $Ra = 0{,}084$ мкм ориентация текстуры носит более размытый характер чередования вытянутых в вертикальном направлении белых и чёрных пятен. Для образцов №3 с $Ra = 0{,}048$ мкм и №4 с $Ra = 0{,}025$ мкм текстура микрорельефа поверхности приобретает ярко выраженный случайный характер, неориентированный в каком либо направлении, что свидетельствует о доминирующем влиянии случайной компоненты при формировании поверхности методом полирования. При этом с уменьшением шероховатости поверхности дисперсность структуры возрастает.



$Ra = 0{,}13$ мкм $Ra = 0{,}084$ мкм $Ra = 0{,}048$ мкм $Ra = 0{,}025$ мкм

Рис. 2. Бинарные изображения текстуры микрорельефа исследуемых образцов

На поверхности каждого эталонного образца исследовалось 30 изображений. Бинаризация полутонового изображения занимала 16 мс, а вычисление автокорреляционной функции по квазиоптимальному алгоритму (2) - 480 мс, что на несколько порядков меньше времени (447484 мс), затрачиваемого при использовании выражения (1). Анализ полученных двухмерных автокорреляционных функций показал, что по средней случайной амплитуде $U_{\text{СР}}$ переменной составляющей функции $r_{x,y}(k_1, k_2)$ исследуемые микрорельефы существенно отличаются друг от друга. Для зависимости $Ra = (U_{\text{СР}})$ методом наименьших квадратов было определено аналитическое выражение в виде

$$Ra = (0{,}0065 U_{CP} - 0{,}25)\,\text{мкм}, \qquad (3)$$

а для доверительного интервала I_β, куда попадает случайная величина $U_{\text{СР}}$, получено выражение

$$I_\beta = (3{,}4 U_{\text{СР}}^2 + 14{,}4 U_{\text{СР}} + 1) \times 10^{-3}. \qquad (4)$$

Задавая вероятность распознавания шероховатости исследуемого микрорельефа P=0,99 и t_β = 2,576, для исследуемых образцов получим средние квадратичные отклонения, доверительные интервалы и амплитуды переменной составляющей автокорреляционной функции.

Квазиоптимальный корреляционный алгоритм и метод определения шероховатости анализируемого микрорельефа на основе вычисления $U_{\text{СР}}$ был применен для исследования шероховатости поверхности пера лопаток 1-й ступени ГТД. Внешний вид поверхностей спинки и корыта лопатки приведен на рис. 3.

Рис. 3. Внешний видповерхностей спинки и корыта лопаток ГТД

В производственных условиях обработка спинки и корыта лопаток выполнялась на виброконтактном станке ЛВП-4. Для анализа были взяты участки поверхности лопатки после операции полирования. На рис. 4 приведены полутоновое и бинарное изображения поверхности выбранного участка, корреляционная поверхность и график изменения коэффициента корреляции для этого участка.

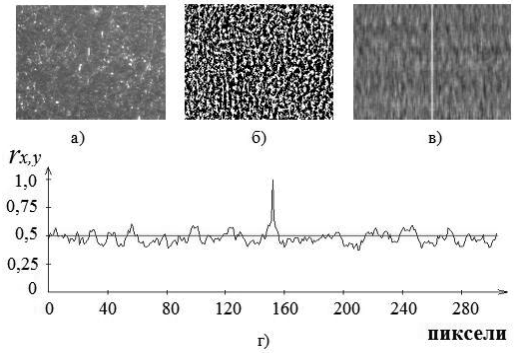


Рис. 4. Полутоновое (а) и бинарное (б) изображения текстуры поверхности выбранного участка, автокорреляционная поверхность (в) и график изменения коэффициента автокореляции для этого участка (г)

Формат изображения участка поверхности, записываемого в память компьютера, составлял 320×240 пикселей. Обработка результатов эксперимента показала, что среднее значение переменной составляющей автокорреляционной функции, вычисленное по 30 изображениям, составило $U_{СР} = 22{,}1$ отн. ед. Подстановка найденного значения $U_{СР}$ в формулу (4) определила, что в этом случае $I_{\beta} = 0{,}21$ отн.ед. Следовательно, $U_{СРmin} = 21{,}89$ отн.ед., и $U_{СРmax} = 22{,}32$отн.ед. Использование выражения (3) для определения среднего арифметического отклонения профиля поверхностей лопатки, дало следующие результаты: $Ra = 0{,}124$мкм, $Ra_{min} = 0{,}122$мкм и $Ra_{max} = 0{,}125$мкм. При этом шероховатость на выпуклой части лопатки на 15% выше, чем шероховатость на её внутренней поверхности. Полученные результаты измерения *Ra* оптико-электронным методом вполне согласуются с результатами, полученными в производственных условиях контактными методами для выборочных экземпляров лопаток. На рассмотренный оптико-электронный метод получен патент Российской Федерации [15].

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение квазиоптимального корреляционного алгоритма для обработки бинарного изображения текстуры микрорельефа исследуемой поверхности позволило на несколько порядков сократить время вычисления амплитуды переменной составляющей автокорреляционной функции, по которой осуществляется идентификация текстуры микрорельефа анализируемой поверхности промышленных изделий и, следовательно, определение её параметров. Отмеченное обстоятельство позволяет применить рассмотренный метод и оптико-электронную измерительную аппаратуру непосредственно в ходе технологического процесса механической обработки рабочих поверхностей отдельных изделий для 100% контроля их микрогеометрических параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Петрешин Д. И., Суслов А. Г., Федонин О. Н. Управление параметрами качества поверхностного слоя деталей машин в условиях неопределенности // Прогрессивные технологии и системы машиностроения, 2016. № 4(55). - С. 57-61.

[2] Суслов А. Г. Автоматизированное обеспечение комплексного параметра качества поверхностного слоя Сх при механической обработке // Наукоемкие технологии в машиностроении, 2011. № 2. - С. 34-39.

[3] Петрешин Д. И. Применение лазерного оптического датчика для измерения высотных параметров шероховатости поверхности деталей машин в самообучающейся адаптивной технологической системе // Контроль. Диагностика, 2009. № 11. - С. 53 – 57.

[4] Макеев А.В. Об оптических методах контроля шероховатости поверхности // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. 2016. Том 5, №1. - С.147-151.

[5] Abramov A D, Grishin R G , Nosov N V. Journal of Physics: The IV International Conference on Information Technology and Nanotechnology. IOP Conf. Series: 2018. Vol. 1096, conf.1. pp.168-175.

[6] Наумов А.И. Бортовой комплекс высокоточной навигации с корреляционно – экстремальной навигационной системой и цифровой картой рельефа местности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013.Том 5, №6-1. - С. 51-55.

[7] Плужников А.Н., Потапов Н.Н. Корреляционно-экстремальная обработка навигационной информации: цифровые алгоритмы и аппаратная реализация // Датчики и системы, 2013. №11(174). - С. 22-27.

[8] Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные системы навигации и наведения. Тверь: ТО Книжный клуб, 2009. -360 с.

[9] Series 232, Advances in Navigation Sensors and Integration Technology, October 2003, pp. 6-1 6-18.

[10] Schmidt, G. and Phillips, R., INS/GPS Integration Architecture Performance Comparisons / Schmidt, G. and Phillips, R.,, Draper Laboratory Report P-4105, Cambridge, MA, February 2003. Also in NATO RTO Lecture

[11] Вдовин В.А., Муравьёв А.В., Певзнер А.А. Метод адаптивной бинаризации растрового изображения // Ярославский педагогический вестник, 2012. Том III. № 4. - С. 65 – 69.

[12] http:// www.promcontrol.ru/katalog/opticheskie-izmeritelnye-pribory-i-mikroskopy

[13] ГОСТ 8.009-84. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. Взамен ГОСТ 8.009 - 71; введ. 01.01.86. М.: Стандартинформ, 2006.- 27 с.

[14] Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник. М.: КНОРУС, 2010. - 664 с.

[15] Пат. 2413179 РФ, МПК G01B 11/30. Способ контроля шероховатости поверхности изделия / Абрамов А.Д., Никонов А.И., Носов Н.В.; Заявл. 16.03.2009; Опубл. 27.09.2010. Бюл. №6.

Моделирование параметров текстуры прецизионных поверхностей с помощью корреляционного алгоритма

Абрамов А.Д.
Самарский государственный технический университет
г.Самара, Россия
abraleks@bk.ru

Носов Н.В.
Самарский государственный технический университет
г.Самара, Россия
nosov.nv@samgtu.ru

Якубович Е.А.
Самарский государственный технический университет
г.Самара, Россия
eyakubovich@mail.ru

***Abstract* — The article describes a new method for texture analysis of precision machined surfaces, which is based on the use of computer optics and an autocorrelation method for processing the obtained images of the textures of the studied microreliefs. The method is based on a probabilistic comparative estimate of the unknown texture of the investigated surfaces with known reference micro-reliefs, for which the parameters are predefined according to GOST R ISO 25178-2-2014.**

Ключевые слова — текстура, прецизионная поверхность, микрорельеф, изображение, функция влияния, мультипликативные компоненты, цифровая обработка, свертка, автокорреляция, идентификация

I. Введение

Текстурный анализ занимает важное место при компьютерной обработке изображений различной природы. Широкое применение компьютерные методы текстурного анализа нашли в материаловедении, медицине, криминалистике, при обработке изображений земной поверхности, полученных из космоса и аэрофотосъёмкой, а также в ряде других областей человеческой деятельности. К основным задачам текстурного анализа относятся: выбор и формирование признаков, описывающих текстурные различия; выделение и сегментация текстур; классификация текстур; идентификация текстур. В настоящее время не существует чёткого математического определения понятия текстура и в связи с тем методы её описания, как правило, разрабатываются эвристически отдельно для каждого конкретного случая [1-4].

Одной из нерешённых задач оперативного текстурного анализа, имеющего важное научное и прикладное значение, является идентификация в реальном масштабе времени текстуры механически обработанных прецизионных поверхностей, полученных технологическими операциями шлифования и полирования непосредственно в производственных условиях. Многочисленными исследованиями установлено существенное, а в некоторых случаях и определяющее воздействие текстуры рабочих поверхностей различных деталей машин и механизмов на надёжность и долговечность при их эксплуатации [5-7]. При этом исследование высотных характеристик текстуры микрогеометрии исследуемой поверхности, как правило, осуществляется контактными методами .

Исследование выполнено и финансируется за счет средств гранта РФФИ (проекты №17-08-00593, 19-08-00232).

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

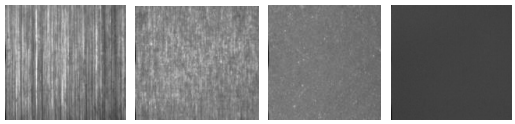
II. Методология и результаты исследований

В рассматриваемой работе предлагается оптико-электронный метод и компьютерная обработка изображения исследуемой прецизионной поверхности, который возможно применять непосредственно в производственных условиях, в том числе в местах недоступных для применения известных методов и измерительных устройств.

Для проведения исследований был применён цифровой измерительный микроскоп серии *Smart Vision* в режиме 2*D* [8,9] и компьютерная обработка полученных изображений микрорельефа исследуемых поверхностей. При использовании видеокамеры *DIGITAL CAMERA Computer ZC-F11CH3* на выходе формировались чёрно-белые изображения заданного формата. Мощность светового потока, падающего на исследуемую поверхность, в проведённых исследованиях изменялась варьированием напряжения питания лампы накаливания мощностью *P*=60Вт и U=36В. Питание подавалось от стабилизированного источника постоянного напряжения. Измерение освещённости исследуемой поверхности производилось люксметром марки 1016М, который располагался перпендикулярно падающему световому потоку.

Исследование структуры поверхности проводилось на образцах, поверхность которых обработана методом шлифования и полирования из жаропрочного сплава ЖС6ФУ. Первоначально микрогеометрия поверхности исследовалась на профилографе модели *SJ - 201P* и определены стандартные параметры шероховатости: образец № 1 имел *Ra* = 0,13 мкм, образец № 2 – *Ra* = 0,084 мкм, образец № 3 – *Ra* = 0,048мкм и образец № 4 – *Ra* = 0,025мкм. Найденные значения среднего арифметического отклонения профиля представляют собой средние значения, вычисленные по 10 измерениям для каждого образца. Оптическая система микроскопа была настроена на анализируемый участок поверхность эталонных образцов с размером 3×2,5 мм. Световой поток мощностью $600 \cdot 10^{-3}$ лм падал на поверхность под углом 45°. Формат видеокадра, записываемого в память компьютера, составлял 320×240 пикселей. Чёрно-белые изображения исследуемых поверхностей приведены на рис.1.

Как видно из приведенных рисунков, изготовленные образцы для исследования существенно отличаются друг от друга по текстуре. При этом для образца № 1 с наибольшей шероховатостью после шлифования наблюдается однонаправленная ориентированная поверхность в виде чередования полос разной степени яркости.



1) 2) 3) 4)

Рис. 1. Видеоизображения исследуемых образцов

Ориентация полос в текстуре поверхности образца № 2 выражена более слабо. Наличие относительно четко выраженных полос в изображении может свидетельствовать о доминирующем влиянии регулярной компоненты в формировании текстуры. Для образцов № 3 и № 4 с полированными поверхностями, имеющими наименьшую шероховатость из исследуемых образцов, отсутствует ориентированная текстура, что свидетельствует о доминирующем влиянии стохастической компоненты в её формировании.

В полученных видеоизображениях исследуемых поверхностей на каждый пиксель отводилось 3 байта при использовании черно-белой видеокамеры *Computer ZC-F11CH3*. В связи с этим было выполнено преобразование исходного полутонового изображения поверхности в формат 1 пиксель – 1 байт. Таким образом, диапазон изменения видеосигнала по яркости *B* в полученном изображении составил 0 – 255 относительных единиц. При этом вычислялись такие характеристики изображения исследуемой поверхности, как среднее значение видеосигнала по всему кадру полутонового изображения поверхности – B_{CP}, средняя амплитуда переменной составляющей в видеосигнале – U_{cp} и средний период колебания видеосигнала – T_{cp} на уровне B_{cp} в таких же относительных единицах.

Анализ полученных видеосигналов показал, что наиболее существенное влияние на структуру поверхностей оказывает переменная составляющая видеосигнала сигнала U_{cp}, по которой можно наиболее достоверно с заданной вероятностью идентифицировать различные параметры поверхности. Для подтверждения этого вывода в работе были выполнены исследования влияния мощности опорного светового потока, падающего на исследуемую поверхность под углом $\alpha = 45^0$ на U_{CP} видеосигналов для поверхностей с различными значениями среднего арифметического отклонения профиля *Ra*,мкм, Результаты исследований представлены на рис. 2. Анализ показывает, что наиболее существенно U_{CP} видеосигнала изменяется при изменении светового потока Φ_0 от 100x10 $^{-3}$ лм до 300x10 $^{-3}$ лм, особенно для поверхности с *Ra* = 0,13мкм. Для поверхности с меньшей шероховатостью U_{CP} изменяются менее резко. При дальнейшем увеличении светового потока Φ_0 от 300x10 $^{-3}$ лм до 1100x10 $^{-3}$ лм происходит более медленное возрастание U_{CP} для всех исследуемых поверхностей.

Отметим, что в данном случае функция преобразования светового потока Φ_0 в выходную величину U_{CP} зависит как от мощности светового потока, так и от параметров исследуемого микрорельефа поверхности, то есть $U_{CP} = f(\Phi_0, Ra)$.

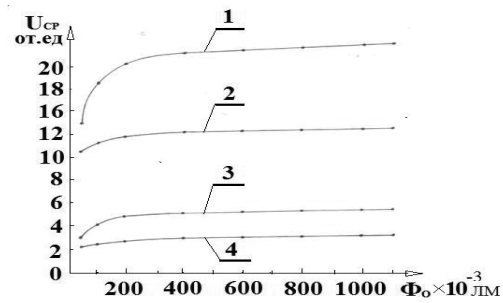


Рис. 2. Зависимость средней амплитуды переменной составляющей видеосигнала от мощности опорного светового потока Φ_0 для поверхностей с различной шероховатостью: 1 – *Ra* = 0,13мкм, 2 – *Ra* = 0,084мкм, 3 – *Ra* = 0,048мкм, 4 – *Ra* = 0,025мкм.

Примем за номинальное значение опорного светового потока величину $\Phi_0 = 600 \cdot 10^{-3}$ лм, а для величин Φ_{0min} , Φ_{0max} – значения $200 \cdot 10^{-3}$ лм и $1000 \cdot 10^{-3}$ лм соответственно. Выбранный диапазон значений вполне соответствует рабочим значениям светового потока, встречающихся в производственных условиях. Отмеченные изменения светового потока могут происходить по разным причинам, например, вследствие колебаний напряжения питания источников света, изменения прозрачности атмосферы на рабочем месте при выполнении технологического процесса изготовления изделия, неконтролируемых бликов на исследуемой поверхности от посторонних источников света и т.п. Эти непредусмотренные воздействия на освещённость исследуемой поверхности можно охарактеризовать с помощью функции влияния. Согласно [7] функция влияния – это зависимость изменений метрологической характеристики средств измерений от колебаний влияющих величин или неинформативных параметров входного сигнала в пределах рабочих условий эксплуатации.

Для определения характера функции влияния были вычислены отношения величин U_{cp} для разных значений *Ra* при значениях светового потока Φ_{0min}, $\Phi_{0н}$ и Φ_{0max}. Обозначив эти отношения как

$$K_{1,2} = U_{CP\,(Ra=0{,}13мкм)} / U_{CP\,(Ra=0{,}084мкм)},$$
$$K_{1,3} = U_{CP\,(Ra=0{,}13мкм)} / U_{CP\,(Ra=0{,}048мкм)},$$
$$K_{1,4} = U_{CP\,(Ra=0{,}13мкм)} / U_{CP\,(Ra=0{,}025мкм)},$$
$$K_{2,3} = U_{CP\,(Ra=0{,}084мкм)} / U_{CP\,(Ra=0{,}048мкм)},$$
$$K_{2,4} = U_{CP\,(Ra=0{,}048мкм)} / U_{CP\,(Ra=0{,}025мкм)},$$
$$K_{3,4} = U_{CP\,(Ra=0{,}048мкм)}\, U_{CP\,(Ra=0{,}025мкм)},$$

получим их соответствующие значения: при световом потоке Φ_{0min} $K_{1,2}$= 1,54, $K_{1,3}$= 3,81, $K_{1,4}$= 6,65, $K_{2,3}$= 2,44, $K_{2,4}$= 4,32, $K_{3,4}$= 1,72; при световом потоке $\Phi_{0н}$ $K_{1,2}$= 1,59, $K_{1,3}$= 3,82, $K_{1,4}$= 6,59, $K_{2,3}$= 2,41, $K_{2,4}$= 4,1 и $K_{3,4}$= 1,7 при световом потоке Φ_{0max} $K_{1,2}$= 1,61, $K_{1,3}$= 3,85, $K_{1,4}$ = 6,24, $K_{2,3}$ = 2,38, $K_{3,4}$ = 3,95, и $K_{3,4}$ = 1,68. Полученные значения указанных отношений позволяют обоснованно утверждать, что функция влияния $f_{вл}$ нестабильности опорного светового потока и соответственно дополнительная погрешность,

вызываемая действием данного оптического фактора, имеют мультипликативный характер. При этом ошибки в определении высотных параметров исследуемой текстуры могут достигать ~ 50% при изменении мощности светового поток в рабочих пределах. Аналогичные результаты были получены и при исследовании влияния угла падения α светового потока на исследуемую поверхность при его изменении от 10^0 до 80^0 градусов. Ошибка в определении высот микрорельефа текстуры достигала ~ 150%. Таким образом, было установлено, что функция влияния носит двухмерный характер, то есть имеет вид $f_{вл}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)$, где $\Delta\Phi$ и $\Delta\alpha$ отклонения мощности светового потока и угла его падения на исследуемый микрорельеф от номинальных значений.

Для устранения выявленных ошибок в измерении высотных параметров текстур был выполнен системный анализ имеющихся структурных методов, используемых для компенсации вышеотмеченных погрешностей. Этот анализ показал перспективность использования логометрического метода. Однако применение логометрирования предусматривает введение в состав информационно измерительной системы (ИИС) дополнительного осветительного канала, второй ПЗС-матрицы и поверхности с эталонным микрорельефом, что существенно усложняет ИИС.

В работе предложен новый метод коррекции дополнительной погрешности, заключающийся в использовании отношения двух функционалов

$$G_1(U_{эi}(X_{\mu i}))/\ G_2(U_{эi}(X_{\mu i})),\quad i=1,\ldots\ldots,r, \qquad (1)$$

в котором одинаковые мультипликативные компоненты числителя и знаменателя $f_{вл}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)$ сокращаются. Сами функционалы G_1 и G_2 однозначно связываются с набором определяемых и влияющих величин произведениями вида $q_x(X_\mu)f_{вл}(\eta_\phi)$, где $q_x(X_\mu)$ – функциональная зависимость, отвечающая неравенству – $q_1(X_\mu) \neq q_0 \cdot q_2(X_\mu)$, q_0=*const*,. $\eta_\phi = (\Delta\Phi/\Phi_{0н}$,а X_μ - нормируемый компонент *i*-измеряемой величины, например высотного параметра микрорельефа. Реализация отношения (1) не ведёт к увеличению габаритов ИИС, так как в функционалах будет использован один и тот же набор величин $U_{эi}$.

Сущность разработанного нового метода заключается в сравнении изображения текстуры анализируемой поверхности с изображениями текстур образцовых поверхностей, для которых заранее определены параметры шероховатости по стандартным методикам, например с помощью образцового профилографа. В результате сравнения определяется (с заданной вероятностью) соответствие изображения текстуры образцовой поверхности изображению текстуры исследуемой поверхности. Для определения критерия сравнения и, следовательно, идентификации шероховатости исследуемого микрорельефа был выполнен системный анализ известных цифровых методов обработки изображений. На основе этого анализа было установлено, что поставленная задача может быть решена с использованием метода согласованной фильтрации [10]. В этом случае задача идентификации двумерного сигнала определённой формы решается с помощью согласованного с сигналом двумерного пространственного фильтра, отклик которого описывается выражением

$$y(n_1, n_2) = \sum_{k_1=-\infty}^{\infty}\sum_{k_2=-\infty}^{\infty} u(k_1, k_2) \times \\ \times [k_1 - (n_1 - n_{01}), k_2 - (n_2 - n_{02})]. \qquad (2)$$

Данное выражение представляет собой двумерную свёртку сигнала $u(k_1, k_2)$ и импульсной характеристики фильтра $[k_1 - (n_1 - n_{01}), k_2 - (n_2 - n_{02})]$. При этом импульсная характеристика фильтра получается из ожидаемого двумерного сигнала путём его зеркального отражения относительно координатных осей n_1 и n_2 , и смещения отражённого сигнала в сторону исходного на n_{01} , n_{02} отсчётов. Выходной сигнал $y(n_1, n_2)$ будет пропорционален автокорреляционной функции двумерного входного сигнала и будет достигнуто максимальное отношение сигнала к помехе на выходе фильтра.

В исходном полутоновом кадре формата первичной поверхности $K_1 \times K_2$ пикселей, начиная с первой строки, выделяется полоса шириной в N_2 пикселей. По центру этой полосы задаётся эталон размером $N_1 \times N_2$ пикселей. Затем эталон, начиная с крайней левой позиции, перемещается по выделенной полосе с шагом в 1 пиксель. При каждом совмещении эталона $u(n_1, n_2)$ и текущего фрагмента полутонового изображения $x(n_1, n_2)$ подсчитывается коэффициент корреляции по известной формуле [10,11]

$$r_{x,y}(k_1, k_2) = [\sum_{n_1=0}^{N_1-1}\sum_{n_2=0}^{N_2-1} u(n_1, n_2) \times \\ \times (x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) - m_x)]/\sigma_1\sigma_2 \ , \qquad (3)$$

где (n_1, n_2) индексы элементов в окне эталона, (k_1, k_2)– координаты эталона внутри зоны поиска формата $K_1 \times K_2$, а σ_1 и σ_2– средние квадратические отклонения величин $u(n_1, n_2)$ и $x(n_1, n_2)$ от их математических ожиданий m_u и m_x соответственно. Закончив вычисление коэффициентов корреляции в первой полосе, задаётся следующая полоса того же формата, что и предыдущая, но смещённая вниз на один пиксель. В этой полосе по центру задаётся новый эталон с теми же размерами, что и предыдущий, и выполняются те же самые действия и т.д. После обработки всего изображения в запоминающем устройстве будет сформирована матрица $M_1 \times M_2$ коэффициентов корреляции или двумерная автокорреляционная функция. Анализируя выражение (3), можно отметить, что его числитель и знаменатель представляют из себя суммы произведений сигналов $x(n_1, n_2)$ и $u(n_1, n_2)$. Следовательно, эти сигналы будут подвержены мультипликативному воздействию функции влияния $f_{вл}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)$.

Коэффициент корреляции (3) может быть записан

$$r_{x,y}(k_1, k_2) = [\sum_{n_1=0}^{N_1-1}\sum_{n_2=0}^{N_2-1} u(n_1, n_2) f_{вл}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) \times \\ \times (x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) - m_x) f_{вл}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)]/ \\ /\sigma_1 f_{вл}(\Delta\Phi, \Delta\alpha).\sigma_2 f_{вл}(\Delta\Phi, \Delta\alpha). \qquad (4)$$

Как видно из приведённого выражения, его структура соответствует структуре выражения (1) и функции влияния сокращаются. Следовательно, функцию (4) можно рассматривать как частный случай отношения (1) и утверждать, что она обладает искомым компенсационным свойством для устранения дополнительной погрешности, возникающей при оценке параметров микрорельефа непосредственно по видеосигналу, не требуя при этом введения дополнительной аппаратуры. Для экспериментального подтверждения полученного теоретического положения о компенсации функции влияния математическими методами были выполнены исследований влияния мощности светового потока и угла его падения на переменную составляющую автокорреляционной функции *U*ср. Результаты исследований приведены на рис. 3 и на рис.4.

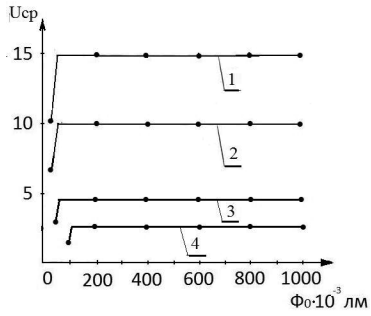


Рис. 3. Зависимость средней амплитуды *U*ср переменной составляющей автокорреляционной функции от мощности опорного светового потока Φ_0 для поверхностей с различной текстурой: 1 – *Ra* = 0,13мкм, 2 – *Ra* = 0,084 мкм, 3 – *Ra* = 0,048 мкм, 4 – *Ra* = 0,025 мкм.

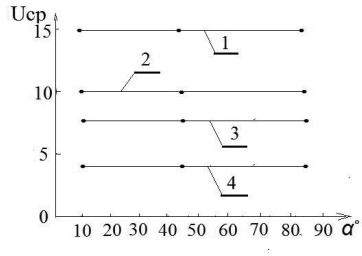


Рис. 4. Зависимость средней амплитуды *U*ср переменной составляющей автокорреляционной функции от угла падения опорного светового потока Φ_0 для поверхностей с различной текстурой: 1 – *Ra* = 0,13 мкм, 2 – *Ra* = 0,084 мкм, 3 – *Ra* = 0,048 мкм, 4 – *Ra* = 0,025 мкм.

Как видно из приведенных графиков, амплитуда автокорреляционной функции *U*ср остаётся постоянной при изменении параметров светового потока в широких пределах, характерных для производственных условий.

III. Заключение

Применение оптико-электронного метода для анализа параметров текстуры микрорельефа, основанного на использованием классического корреляционного алгоритма для обработки его полутоновых изображений, позволило устранить негативное воздействие влияющих факторов на стабильность светового потока, падающего на исследуемую поверхность и тем самым повысить точность оценки параметров микрорельефа.

На основе проведённых исследований предложен следующий алгоритм оценки параметров текстуры микрорельефа прецизионных поверхностей.

1) Для заданного технологического процесса изготавливаются эталонные образцы микрорельефа.
2) Для этих образцов измеряются все необходимые параметры микрорельефа образцовыми измерительными средствами, например профилографом.
3) Оптико-электронными средствами получают изображения эталонных микрорельефов и вычисляют для них автокорреляционные функции по рассмотренному алгоритму.
4) Строится аналитическая зависимость *Ra*=*f*(*U*ср) и доверительный интервал *I* = *f*(*U*ср), в который попадает случайная величина *U*ср.
5) Для изображения исследуемого микрорельефа с неизвестными характеристиками вычисляется *U*ср автокорреляционной функции.
6) Используя полученные зависимости *Ra* = *f*(*U*ср) и *I* = *f*(*U*ср) с заданной вероятностью определяются параметр *Ra* для исследуемого микрорельефа и, следовательно, все остальные заранее вычисленные параметры для него.

Список литературы

[1] Сойфер, В.А. Анализ и распознавание наномасштабных изображений: традиционные подходы и новые постановки задач / В.А.Сойфер, А.В.Куприянов // Компьютерная оптика. – 2011. №2. – С.132- 143.

[2] Баврина, А.Е. Исследование фотограмитрических изображений с помощью матриц вероятностного распределения яркости / А.Е. Баврина, Н.Ю.Ильясова, А.В.Куприянов, А.Г.Храмов //Компьтерная оптика. – 2002. - № 23. – С.62-65.

[3] Пластинин, А.И. Разработка методов формирования цветотекстурных признаков для анализа биомедицинских изображений /А.И. Пластинин, А.В. Куприянов, Н.Ю. Ильясова // Комьютерная оптика. – 2007.- №2. – С.82-85.

[4] Ojala, T. A comparative study of texture measures with classification based on feature distributions / T. Ojala, M. Pietikainen, D. Hardwood // Pattern Recognition. – 1996. Vol. 29, Issue 1, pp. 51-59.

[5] Уайтхаус Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. – М.: Изд.дом «ИНТЕЛЛЕКТ», 2009. – 472с.

[6] Дунин-Барковский И. В., Карташова А.Н. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.

[7] Суслов А.Г., Корсакова И.М. Назначение, обозначение и контроль параметров шероховатости поверхностей деталей машин.– М.: МГИУ, 2010. – 111с.

[8] http:// www.promcontrol.ru/katalog

[9] http://www.all-pribors.ru/opisanie/59383-14-galileo-standart-63566

[10] Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. – М.: Мир, 1988. – 488с.

[11] Pratt W.K. Correlation Techniques of Image Registration, *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems,* AES-10, 3, pp. 353 – 358, (May 1974).

Температурное состояние аэродинамического тормозного устройства малых космических аппаратов

Абрамова Е.Н.
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия
abramova_en@bmstu.ru

Резник С.В.
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия
sreznik@bmstu.ru

***Abstract* - The space debris is a growing concern that becomes more urgent with increase of space application. This is the reason for equipping spacecraft with disposal systems. One of the methods for space debris removal is deorbiting a small spacecraft re-entry by using a decelerator. This paper presents issue analysis related to a selection of design, technology solutions and temperature analyze for inflatable aerodynamic decelerator (IAD) of small spacecraft.**

Ключевые слова: малые космические аппараты, аэродинамика разреженных сред, температурное состояние, моделирование

I. Введение

Проблема космического мусора на международном уровне была впервые обозначена в 1993 году, при принятии генеральной ассамблеей ООН резолюции «Международное сотрудничество в использовании космического пространства в мирных целях». Количество космических аппаратов (КА) и объектов космического мусора на орбитах Земли увеличивается с каждым годом (рис.1). Принимаются меры, направленные на снижение загрязненности околоземного космоса, формулируются требования к космическим средствам ограничивающие техногенное засорения [1].

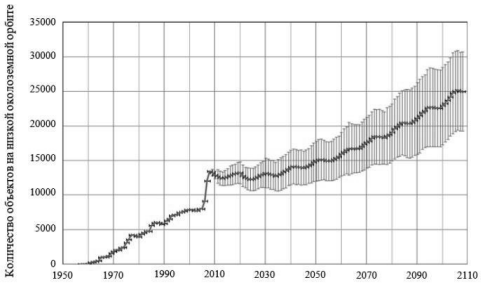


Рис. 1. Прогноз увеличения количества космического мусора (NASA)

Малые КА используются для выполнения различных задач [2]. Например, Quake Sat (Stanford University), прогнозирующий землетрясения или КА стандарта CubeSat [3], которые создаются в рамках образовательных программ и позволяют создавать кластеры из нескольких спутников. К преимуществам малых КА относится сниженная стоимость создания и выведения на орбиту, а также возможность более быстрого изготовления. При их эксплуатации оперативно применяются новейшие технологии и уменьшается время окупаемости космических систем. Но малые КА имеют ограниченный ресурс и, выработав его, превращаются в космический мусор [4].

Существуют различные варианты утилизации космического мусора. Возможен увод с орбиты с помощью двигательных установок, например, D3 Decommissioning Device [5], но из-за ограничения по массе они ограниченно подходят для утилизации малых объектов. Другой активно исследуемый способ – использование буксиров. Например, Kounotori 6, разработанный японским агентством JAXA, использовался для доставки груза на МКС, а после выполнения миссии должен был отправить в плотные слои атмосферы груз массой 20 кг, имитирующий космический мусор. В European Space Agency разрабатывается проект e.deOrbit [6], представляющий собой КА, оснащенный захватами для выполнения различных задач: дозаправки, вращения, ремонта КА и утилизации космического мусора.

Решить проблему загрязнения околоземной орбиты позволит оснащение КА системой торможения. Согласно [7] для орбит ниже 800 км рациональным является увод в плотные слои атмосферы Земли для последующего сгорания. В [8] приводятся сведения о том, что до 500 км преобладающим силовым фактором является воздействие верхней атмосферы, выше 1000 км – воздействие солнечного излучения. В промежутке от 500 км до 1000 км необходимо учитывать оба фактора.

В космосе опробовано использование надувных конструкций, таких как рефлекторы антенн, спутники, шлюзы [9-10]. Увод отработавшего аппарата в плотные слои атмосферы возможен с помощью надувного аэродинамического тормозного устройства (НАТУ), которое представляет собой тонкостенную оболочку, компактно упакованную в контейнер, развёртываемую в момент, когда спутник заканчивает свою работу на орбите (рис. 2).

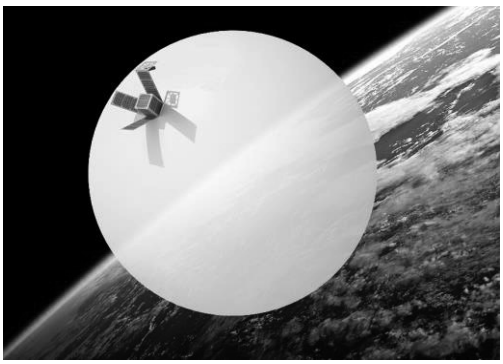


Рис. 2. КА с НАТУ

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

II. Постановка задачи.

Несмотря на простоту идеи, проектирование НАТУ является сложной междисциплинарной задачей, охватывающей вопросы аэродинамики разреженных сред, радиационно-кондуктивного теплообмена, механики мягких оболочек, материаловедения. В зарубежных и отечественных статьях рассматривались аспекты применения НАТУ [11-15], их использование на различных орбитах и для разных целей.

Эффективность НАТУ зависит от формы и площади поверхности устройства, аэродинамическое сопротивление которого вызывает торможение. Основные параметры конструкции оболочки – это геометрические характеристики (толщина, радиус), характеристики материала, внутреннее давление. Вариация этих параметров приводит к созданию проекта оболочки приемлемой массы, позволяющей спустить КА в плотные слои атмосферы в заданный срок.

III. Анализ геометрических характеристик оболочки

Толщина оболочки ограничивается массой, которую возможно выделить на КА для тормозного устройства и размерами контейнера, в который она будет упакована. Но при этом толщина должна быть достаточной, чтобы оболочка сохраняла свою целостность в течение времени, необходимого для достаточного снижения КА.

Радиус также ограничен массой и размерами контейнера, но при этом он является характеристикой, задающей площадь поперечного сечения. В свою очередь, от площади поперечного сечения зависит сила лобового сопротивления, вызывающая торможение.

$$F = C_x \frac{\rho \upsilon^2}{2} S, \qquad (1)$$

где F – сила лобового сопротивления, C_x – коэффициент лобового сопротивления, ρ – плотность воздуха, υ – скорость движения аппарата, S – площадь миделевого сечения.

Зависимость этой силы от радиуса для высоты 200 км изображена на рис. 3.

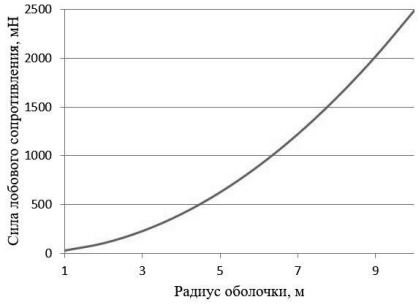


Рис. 3. Зависимость значения силы лобового сопротивления от радиуса оболочки на высоте 200 км.

При исследовании зависимости массы НАТУ от его параметров, принимались во внимание не только геометрические характеристики, но и возможность использования различных материалов. В таблице 1 представлены характеристики полимерных плёнок, применяемых для космических конструкций [16-17].

ТАБЛИЦА I. Характеристики полимерных плёнок

Характеристики	Полиэтилен -терефталат	Полиимид	Полиарилат
Плотность, кг/м^3	1380	1420	1300
Прочность на разрыв, МПа	160-180	120-160	60-120
Относительное удлинение при разрыве, %	50	10-40	10-25
Морозостойкость,°С	-155	-270	-60
Температура размягчения,°С	140	200	210

Из рис.4 видно, что выбор плотности материала имеет второстепенное значение по сравнению с выбором толщины и радиуса оболочки.

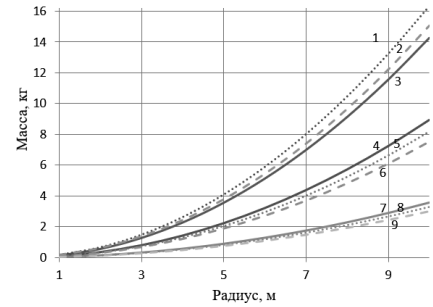


Рис. 4. Зависимость массы от радиуса оболочки для разных материалов и толщин: 1 – 8 мкм, полиимид, 2 – 8 мкм, ПЭТФ, 3 – 8 мкм, полиарилат, 4 – 5 мкм, полиимид, 5 – 5 мкм, ПЭТФ, 6 – 5 мкм, полиарилат, 7 – 2 мкм, полиимид, 8 – 2 мкм, ПЭТФ, 9 – 2 мкм, полиарилат.

Одним из важных параметров, которые необходимо учитывать при определении характеристик оболочки, является длина контейнера. Его основание принимается размером 0,1х0,1 м, поскольку такой размер основания имеет малый КА стандарта CubeSat. В расчетах используется коэффициент k, который характеризует плотность укладки оболочки. При этом k =1 – абсолютно плотная укладка, предельный случай, достигнуть которого в реальных условиях не представляется возможным (рис.5).

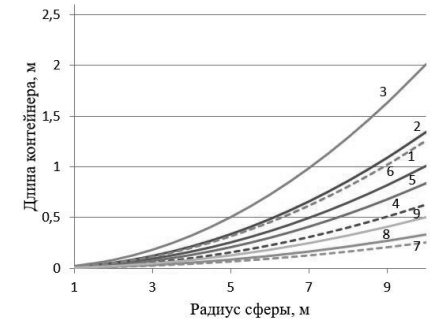


Рис. 5. Зависимость длины контейнера от радиуса оболочки: 1 -δ=10 мкм, к=1; 2 -δ=10 мкм, к=0.75; 3 -δ=10 мкм, к=0.5; 4 -δ=5 мкм, к=1; 5 -δ=5 мкм, к=0.75; 6 -δ=5 мкм, к=0.5; 7 -δ=2 мкм, к=1; 8 -δ=2 мкм, к=0.75; 9 -δ=2 мкм, к=0.5.

IV. Анализ температурных режимов

На высотах выше 150 км, несмотря на разреженность воздуха, необходимо учитывать как нагрев потоками излучения, исходящими от Земли и Солнца, так и аэродинамический нагрев оболочки. При большой разреженности газа теория сплошной среды становится неприменима. На высотах более 100 км используется свободномолекулярная теория.

В свободномолекулярной теории газ рассматривается как отдельные молекулы, для моделирования обтекания тела свободномолекулярным потоком подходит метод Монте-Карло. Одним из примеров реализации этого метода является программа Direct Simulation of Monte Carlo (DSMC). Условия обтекания задаются критериями Маха и Кнудсена. В программе возможен выбор числа Маха до 10, критерия Кнудсена до 1000.

Поскольку в рассматриваемом примере скорость полёта соответствует числам Маха более 10, использование DSMC для точного анализа не представляется возможным. Но простота задания условий и получения результатов позволяет использовать программу для верификации более сложных моделей. Для расчёта аэродинамического нагрева необходима возможность использования среды со свободномолекулярным течением газа. Это позволяет модуль Free Molecular Flow программного комплекса COMSOL Multiphysics.

Геометрическая модель представляет собой подобие аэродинамической трубы с оболочкой внутри. Свободномолекулярный поток задаётся компонентами Diffuse flux (определяет поток молекул на входе в «трубу») и Reservoir (определяет давление на выходе). Мультифизичность COMSOL проявляется в возможности сочетания различных физических процессов, каждый из которых отдельно задаётся.

Помимо модуля для моделирования свободномолекулярного потока, необходим модуль Heat Transfer of Solid and Fluids для передачи тепла по поверхности оболочки, внутри оболочки, и Surface-to-Surface Radiation для теплопередачи излучением внутри оболочки. В результате получено распределение теплового потока при движении оболочки на высоте 200 км (рис.6).

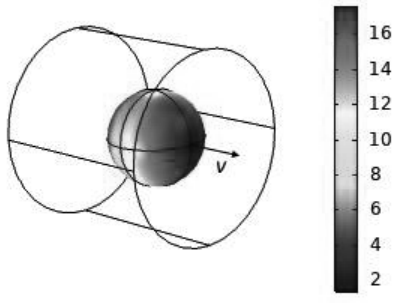


Рис. 6. Распределение теплового потока (V – направление вектора скорости), Вт/м^2

Моделирование теплового режима НАТУ в орбитальном полёте, учитывающего потоки излучения, исходящие от Солнца и Земли, и аэродинамический нагрев, проводилось с помощью модуля NX Space System Thermal программного комплекса Siemens NX. Предполагалось, что материал оболочки непрозрачен из-за металлизации поверхности, коэффициент отражения 0,85, поглощения 0,15. Считалось, что ориентация оболочки в пространстве выполняется с использованием устройства одноосной гравитационной ориентации, представляющего собой длинный стержень с грузом на конце. Он крепится к оболочке в сложенном состоянии, а после развёртывания ориентирует её. Поэтому при моделировании теплообмена оболочки вращение не учитывалось.

Результаты моделирования, представленные на рис. 7,8 определены при плотности потока прямого солнечного излучения 1377 Вт/м^2, при движении оболочки по круговой орбите высотой 200 км, наклонение орбиты составляло 95º. Диаметр оболочки принимался равным 6 м, толщина 8 мкм. Зависимость температуры от времени представлена в таб. 2 отдельно для нескольких точек оболочки (рис.7).

ТАБЛИЦА II. Температура в точках оболочки

Время, с	Температура, ºС			
	1	2	3	4
1000	-73	-54	-51	-75
1500	-5	2	35	5
2000	5	19	38	36
2500	7	21	22	69
3000	25	19	13	56
3500	51	13	8	20
4000	12	-5	-7	-3

В результате моделирования получен диапазон изменения температуры оболочки от минус 84 до +72ºС. При этом, оболочка нагревается неравномерно (рис.7). Это связано с комбинированным характером нагрева, включающий в себя потоки излучения от Солнца (I), Земли (III) и поток, возникающий за счёт аэродинамического нагрева (II).

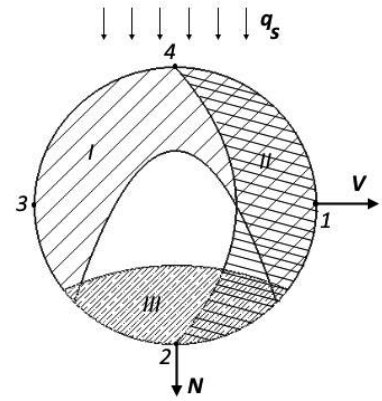


Рис. 7. Области нагрева при орбитальном полёте.

Интерес для дальнейших исследований представляет моделирование процесса спуска в плотные слои атмосферы, при котором, помимо анализа температурного состояния, важным является исследование деформации, которая влечет за собой изменение аэродинамических свойств.

Заключение

1) Разработана методика моделирования нагрева поверхности оболочки на высотах от 120 до 300 км, учитывающая аэродинамический нагрев и нагрев потоками излучения от Солнца и Земли.

2) Определен диапазон температур оболочки, который свидетельствует о её целостности в процессе орбитального полёта на высоте 200 км.

Список литературы

[1] ГОСТ Р 52925-2008. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства / Изделия космической техники. М.: Стандартин-форм, 2008.

[2] Алифанов О.М., А.А. Медведев, В.П. Соколов Малые космические аппараты как эволюционная ступень перехода к микро и наноспутникам // Электронный журнал «Труды МАИ». 2011. №49. С. 1-8.

[3] CubeSat (http://www.cubesat.org/missions)

[4] Hall L. The history of space debris // Space Traffic Management Conference (Daytona Beach, Florida, US, November 4-6, 2014).

[5] D-Orbit Products - A solution matching your spacecraft requirements (https://www.deorbitaldevices.com/products/)

[6] e.deorbit. The Clean Space blog (http://blogs.esa.int/cleanspace/category/e-deorbit/)

[7] Финченко В.С., Иванков А.А., Шматов С.И. Проект КА, оснащенного системой удаления космического мусора (аэродинамика, габаритно-массовые характеристики и траектории спуска КА с околоземных орбит) // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2018. №1. С. 10-18.

[8] Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований. В 3т. Т. 2. / Под ред. В.В. Хартова, В.В. Ефанова. М.: Изд-во МАИ-Принт, 2014. 544 с.

[9] Inflatable antenna for CubeSat: fabrication, deployment and results of experimental tests / A. Babuscia, M. Van de Loo, Q. J. Wei, S. Pan // IEEE Aerospace Conference (Big Sky, Montana, March 1-8, 2014).

[10] Wilson A. A history of ballon satellites // J. of Brit. Interplanet. Soc. 1981. Vol. 34, No. 1. P. 10-22.

[11] Иванков А.А. Пичхадзе К.М., Финченко В.С. Аэротермодинамика спускаемого контейнера надувной конструкции для доставки грузов с Международной космической станции // Тепловые процессы в технике. 2009. Т.1, №5. С. 204-207.

[12] Алпатов А.П., Палий А.С., Скорик А.Д. Аэродинамические системы увода космических объектов // Техническая механика, 2015. №4. С. 126-138.

[13] Gossamer Orbit Lowering Device (GOLD) for Safe and Efficient De-Orbit / Nock K, Gates K., Aaron K. // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference (Toronto, Ontario, Canada, August 2-5, 2010).

[14] Предложение по созданию устройства для схода наноспутников CubeSat с низких околоземных орбит / И.М. Нестерин, В.С. Финченко, К.П. Пичхадзе, С.О. Фирсюк и др. // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. №3. С. 20-26.

[15] Santerre B., Bonnefond T., Dupuy C. The innovative deorbiting aerobrake system “IDEAS”: The use of gossamer technology for a cleaner space // Proceedings of the 4S Symposium, Small Satellites, Systems and Services (Rhodes, Greece, 26-30 May, 2008).

[16] Технические свойства полимерных материалов / В.К Крыжановский, В.В Бурлов, А.Д. Паниматченко, Ю.В. Крыжановская. С-Пб: Профессия, 2005. 248 с.

[17] Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных аэрокосмических конструкций композиционных материалов. М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 516 с.

Прогнозирование роста числа пользователей, устройств и эпидемий компьютерных вирусов в сети интернет на основе анализа статистических данных с выявлением почти-периодических функций роста

Алёшкин А.С.
кафедра КБ-8
«Информационное противоборство»
МИРЭА – Российский
технологический университет
г. Москва, Российская Федерация
Antony@testor.ru

Лесько С.А.
кафедра КБ-3
«Управление и моделирование систем»
МИРЭА – Российский
технологический университет
г. Москва, Российская Федерация
Sergey@testor.ru

***Abstract* — This article attempts to predict new epidemics of computer threats based on statistical analysis and the detection of likeness through near-periodic functions. As main data, the authors use data on the growing number of Internet users, the increasing number of devices connected to the global network and data on computer viruses activity statistics over the years (detected epidemics of computer viruses activity, such as computer worm attacks, Trojan viruses, and other activities of this kind). Analysis of the data shows that the increasing the number of users and various devices is well described by the model of limited growth of Gompertz with logistical dependence. Analysis of data on computer viruses' epidemics shows the presence of trend and oscillatory components. To obtain accurate predictions of anticipated future epidemics of computer viruses, a method is needed to divide the trend component and the oscillatory component without significantly losing information about the observed process. The work attempts to build such almost periodic functions and to compare simulated data with real-life data. Based on the processed data, the authors estimate the limit of the current growth in the number of Internet users in 5.4 billion users (while maintaining the current level of technology), as well as highlight the main almost-period lasting 7-9 years and the main almost-period at 16 years. The maximum appearance of next-generation malware can occur in 2020, which shows the existence of mechanisms for their functioning already at present time.**

Ключевые слова — прогнозирование сбоев; почти–периодические функции; инциденты в сети интернет; модель Гомперца.

I. Введение

Прогнозирование динамики распространения угроз является одной из важных задач обеспечения информационной безопасности, в широком смысле: включая, как уровень технических средств (компьютеры, мобильные устройства, интернет вещей (IoT), сетевое оборудование и т.д.), так и поведение пользователей.

Развитие возможностей вычислительной техники и масштаба сетей с одной стороны предоставляет новые инструменты и методы защиты, а с другой стороны увеличивает возможности вредоносного программного обеспечения. Зачастую злоумышленники наделяют его искусственным интеллектом и возможностями коллективного согласованного поведения. Учитывая, что киберпространство уже давно стало, как минимум, полем соперничества крупных корпораций и информационно развитых государств, не далек тот день, когда между участниками начнутся активные кибервойны для получения экономических, политических и иных преимуществ.

С целью обеспечения безопасности работы в сети интернет, в данной статье мы ставим задачу проанализировать возникавшие ранее крупные эпидемии нарушений информационной безопасности (в первую очередь крупные заражения компьютерными вирусами) и, на основе имеющихся данных, построить модель предсказания наиболее вероятного срока появления новой угрозы безопасности.

На текущий момент разнообразие существующих компьютерных угроз и моделей поведения вновь появляющихся вирусов, определяет возрастающий интерес к теме создания эффективных моделей возникновения и анализа распространения их эпидемий.

В связи с этим, методы прогнозирования появления вредоносных программ нового поколения, а так же посторонние моделей распространения таких объектов и борьбы с ними представляют большой научный интерес.

Следует отметить, что существует большое число работ и обзоров (см. например, [1,2]) посвященных анализу распространения эпидемий компьютерных вирусов. Однако в большинстве этих работ рассматриваются, в основном, вопросы классификации вредоносного ПО, разработки алгоритмов поиска уязвимостей, обнаружения атак на ранних этапах их развития, ликвидации последствий, созданию методов и инструментов обнаружения скрытых атак новых вирусов. Для предсказания действий и обнаружения вредоносного ПО наиболее часто используются модели и методы машинного обучения и интеллектуального анализа данных, например, такие как K-Nearest; деревья решений; классификаторы на основе машин опорных векторов (SVM); майнинг правила; наивный Байесовский классификатор; нечеткие алгоритмы и другие. С помощью подобных подходов удается

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

определить распространение червей и вирусов, наличие троянов, бэкдоров и ботнет образований.

В статье [3] предлагается использовать методы машинного обучения, для обнаружения, встроенного в документы Office, вредоносного ПО. В этой статье была представлена основанная на XML (∗.docx, ∗.xlsx, ∗.pptx, ∗.odt, ∗.ods и т. д.) и использовании структурных особенностей, новая методология извлечения (SFEM) для документов Office. SFEM извлекает дискриминационные признаки из документов, основанных на их структуре. Для оценки SFEM с помощью классификаторов машинного обучения, была использована коллекция из 16 938 (*.docx документов), содержащая 94.9% вредоносных и 5.1% доброкачественных документов. Было исследовано 1600 уникальных конфигураций, основанных на различных комбинациях извлечения, выбора и представления функций. Результаты машинного обучения показывают, что самых высоких показателей обнаружения достигает классификатор случайного леса с AUC 99,12%, истинно положительным показателем (TPR) 97% и ложно положительным показателем (FPR) 4,9%. В сравнении, с полученными результатами лучшие антивирусные программы достигают TPR, который на 25% ниже. Следует также указать и другие исследования, посвященные использованию методов машинного обучения для изучения обнаружения вирусной активности [4,5].

В работе [6] разработана методология анализа DNS трафика, позволяющая идентифицировать устройства, относящиеся к ботнет. Разработанный метод пассивно фиксирует весь DNS-трафик от шлюза контролируемой сети, а затем извлекает ключевые функции для идентификации PDN. На основании изучения и анализа большого количества законных доменов, а также PDN, сгенерированных ботнетами, было обнаружено, что существует заметное отклонение в правилах их построения. Для оценки эффективности предложенного подхода были использованы различные алгоритмы машинного обучения. Экспериментальные результаты показывают, что предложенный метод достигает наибольшей эффективности обнаружения для алгоритма дерева решений со средней точностью до 92,3% и ошибочным положительным результатом 4,8%.

В исследовании [7] предлагается система обнаружения вредоносных программ для ОС Android. В качестве метода для обнаружения вредоносного ПО используется подход на основе машинного обучения. Авторы проводят анализ, чтобы извлечь функции на уровни API, связанные с потоками данных, и осуществить классификацию на основе метода k-ближайших соседей. Список API, связанный с потоком данных, дополнительно оптимизируется с помощью машинного обучения. Предлагаемая схема обнаружения вредоносного ПО была оценена с использованием 1160 доброкачественных и 1050 вредоносных образцов. Результаты показывают, что система может достичь степени точности до 97,66% в обнаружении неизвестных вредоносных программ для ОС Android.

В статье [8] предлагается гибридная инфраструктура для обнаружения вредоносных программ с использованием гибридов эвристики Filter Vector Machines Wrapper, MaximumRelevance – Minimum-Redundancy Filter, где в качестве функций вредоносных программ используется статистика вызовов интерфейса прикладных программ (API). Новинка предлагаемого гибридного фреймворка заключается в том, что он внедряет фильтр ранжирование в процессе выбора оболочки и объединяет свойства как оболочки, так и фильтров с учетом статистики вызовов API, которая может обнаруживать вредоносные программы на основе характера инфекционных действий, а не сигнатур.

В статье [9] рассматривается проблема обнаружения запутанного вредоносного ПО на основе использования гибридного нейро-нечеткого классификатора (EHNFC). Часто авторы вредоносных программ создают их новые версии путем реализации обфускации кода предыдущих программ. Потенциально запутанное вредоносное ПО может иметь экспоненциальное увеличение числа генерируемых вариантов, и его обнаружение является большой проблемой, потому что оно может легко обойти сигнатурные и поведенческие детекторы вредоносных программ. В работе [9] предлагается основанный на концепциях нечеткой логики гибридный нейро-нечеткий классификатор (EHNFC) для обнаружения вредоносных программ для ОС Android. Предлагаемый EHNFC имеет возможность обнаружения запутанного вредоносного ПО с использованием нечетких правил, и может развиваться путем изучения новых нечетких правил обнаружения вредоносных программ. С этой целью можно использовать метод на основе кластеризации развития и адаптации вредоносных программ.

В статье [10] экспериментально оценены два метода обнаружения вредоносных программ для ОС Android. Первый основан на скрытой Марковской модели (HMM), а второй использует структурную энтропию. Скрытая Марковская модель (HMM) - это алгоритм статистического анализа паттернов. HMM представляет на вход данные обучения. Модель обучения включает в себя цепочку уникальных символов и их позиции, наблюдаемые во входных данных. HMM может быть применена для обнаружения метаморфического вируса, способного изменять свой код с использованием различных методов обфускации. Кроме того, для оценки сходства может быть применен метод статического анализа файлов с использованием структурной энтропии. Предполагается, что различные образцы вредоносного ПО у одной семьи вирусов имеют одинаковый порядок кодов и областей данных. Метод состоит из двух этапов: сегментация файла и сравнение последовательности. Для сегментации файлов на сегменты можно использовать дискретное вейвлет-преобразование (DWT), а различные уровни энтропии и расстояния между сегментами последовательности могут быть применены для определения сходства файлов. Эти два метода были успешно применены для обнаружения вирусов ПК и вредоносных программ для ОС Android. Была получена точность 0,96 для распознавания вредоносного приложения и точность 0,98 для идентификации семейства вредоносных программ.

Представленный обзор показывает всю сложность обнаружения и прогнозирования развития вредоносных программ, поэтому, учитывая взаимосвязь социальных и технических факторов, в представленной статье мы хотим рассмотреть и построить взаимосвязь между

двумя процессами: один – это увеличение числа пользователей и устройств в глобальной сети, второй – динамика изменения компьютерных инцидентов противоправного характера. На наш взгляд, это может позволить получить прогнозы о росте зловредной активности в компьютерных сетях и на их основе предпринимать проактивные меры защиты. В частности, возможно, это в некоторой степени поможет решить проблему “нулевого дня”.

II. Динамика роста числа пользователей сети интернет

Учитывая взаимосвязь социальных и технических факторов в росте информационных инцидентов зловредного характера, для начала, рассмотрим динамику пользователей сети интернет. На рисунке 1 представлена динамика [11] изменения числа пользователей сети интернет в обычном и полулогарифмическом масштабе.

Анализ данных в полулогарифмическом масштабе показывает, что увеличение числа пользователей и устройств их выхода в интернет идёт с падающими темпами, а угол наклона меняется в районе 2001 года.

Проверим соответствие динамики пользователей сети интернет модели ограниченного роста Гомперца, у которой имеется предел, к которому стремятся данные, а развитие на длительных интервалах характеризуется падающими темпами.

Для этого построим исходные данные в функциональных спрямляющих координатах (анаморфозы) для модели Гомперца (1).

$$\ln\left(\ln\left(\frac{N_\infty}{N}\right)\right) = \ln C - k\cdot t \qquad (1)$$

Варьирование величины N_∞ позволяет добиться спрямления. Для более детальной оценки положения значения N_∞ необходимо построить зависимость величины достоверности (R^2) от параметра N_∞.

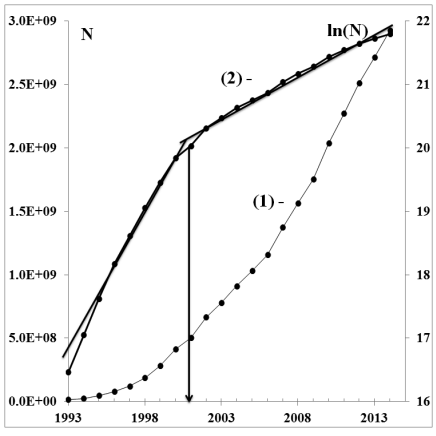


Рис. 1. Динамика пользователей сети интернет с 1993 по 2014 год. (1) – в обыкновенном масштабе, (2) - в полулогарифмическом масштабе

При построении зависимости величины достоверности наглядно видно, что максимальное значение этого параметра достигается при величине N_∞= *5.4* млрд. пользователей. Используем это значение при построении анаморфозы (1) (см. рисунок 2).

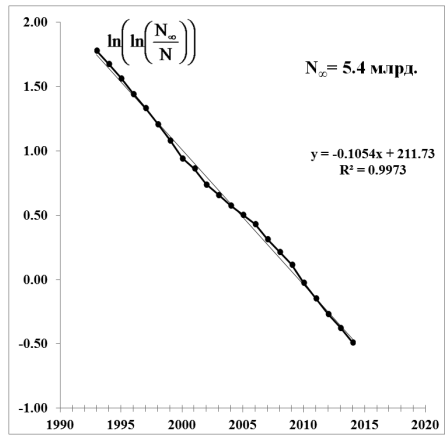


Рис. 2. Данные о динамике пользователей сети интернет в анаморфозе для модели Гомперца.

Из рисунка 2 видно, что динамика пользователей сети интернет соответствует модели Гомперца.

Из свойств модели Гомперца известно, что максимум скорости и точки перегиба находятся в определенных отношениях от параметра N_∞ на интегральной кривой

$$y_1 = y_\infty \cdot e^{-1/\Phi^2},\ y_1 = y_\infty \cdot e^{-\Phi^2},\ y_1 = y_\infty \cdot e^{-1}.$$

Применение данной модели к росту числа пользователей в сети Интернет показывает предел (в рамках реализуемой системы технологий), который составляет 5,4 млрд. пользователей, что в 1,4 раз больше значения настоящего времени. Точка перегиба на кривой скорости приходится на 2019 год с числом пользователей около 3,8 млрд [6,7]. В таких точках часто начинают доминировать принципиально новые технологии: например в настоящее время ожидается рост и развитие сетей следующего поколения, 5G, а также наблюдается активизация развития технологий интернета вещей (IoT).

III. Динамика роста числа зловредных инцидентов в сети интернет

На рисунке 3 представлены данные о количестве различных видов «популярных» обнаруженных компьютерных вирусов, компьютерных червей, троянских коней и т.д. по годам [11], которые имеют трендовую и колебательную составляющие [12]. Для эффективного анализа таких данных необходимо разделить тренд и колебания без потери существенной информации о процессе. Тренд может быть связан с общим увеличением количества новых устройств и пользователей в сетях с течением времени, которое мы обсуждали выше.

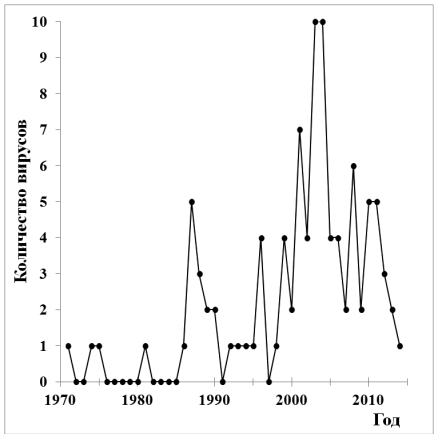


Рис. 3. Данные о количестве обнаруженных вредоносных программ по годам

В работах [13, 14] было показано, что эффективное исключение тренда и определение периодических компонент достигается преобразованием исходного ряда в новый ряд по формуле:

$$\chi(t_k) = \ln \frac{y(t_k - \Delta t_m) \cdot y(t_k + \Delta t_m)}{y(t_k)^2} \qquad (2)$$

где $y(t_k - \Delta t_m)$, $y(t_k)$, $y(t_k + \Delta t_m)$ - значения в соответствующие моменты времени, t_k - моменты регистрации измеряемой характеристики, Δt_k - фиксированный пробный временной интервал. Результатом преобразования является ряд $\chi(t_k)$ с близким к нулю значением математического ожидания.

Для определения наиболее близких к периодам значений параметров колебаний воспользуемся методом сдвиговых функций, предложенном в работах [13, 14]. Применение сдвиговых функций, основанных на метриках функционального анализа и теории почти-периодических функций, позволяет эффективно определять значения близких к периодам (почти-периодам). Частным случаем является:

$$a(\tau_k) = \frac{1}{n-k} \sum_{k=1}^{n-k} \left| \chi(t_j + \tau_k) - \chi(t_j) \right| \qquad (3)$$

где n- количество точек исходного ряда, τ_k – пробная сдвижка.

Система почти-периодов τ функции $\chi(t)$ может быть определена как совокупность локальных минимумов сдвиговой функции: τ=arg min a(τ) с условием: τmin≤τ≤τmax, где τmin и τmax - естественные пределы поиска периода, выбираемые таким образом, чтобы отбросить τ < τmin (при которых функция a(τ) может принимать малые значения из-за инерционности функции χ(*t*)), и отбросить τ > τmax (при которых определение средней a(τ) становится ненадежным из-за малого числа членов суммирования в выражении (3)).

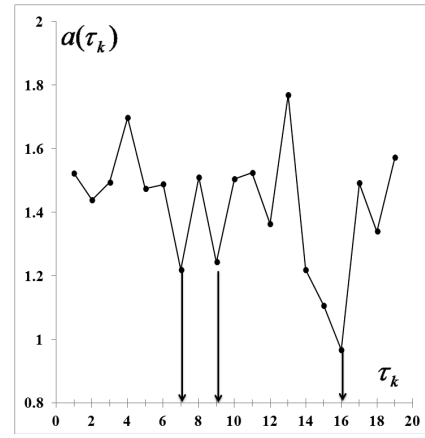


Рис. 4. Сдвиговая функция для исходных данных о количестве различных видов обнаруженных компьютерных вирусов

На рисунке 4 представлена сдвиговая функция (3) для исходных данных о количестве различных видов «популярных» обнаруженных компьютерных вирусов. Представленные на рисунке 4 результаты позволяют выделить основной почти-период длительностью 7-9 лет и основной почти-период в 16 лет.

IV. Сопоставление динамики роста числа зловредных инцидентов в сети интернет и количества пользователей и устройств

Для сопоставления динамики роста числа зловредных инцидентов в сети интернет и количества пользователей и устройств, рассмотрим трендовые составляющие исследуемых данных. Для этого сгладим исходные данные методом скользящего среднего с величиной окна осреднения длительностью равной почти-периоду 8 лет (см. рис. 5).

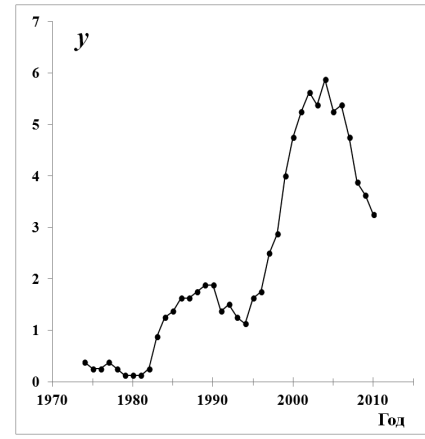


Рис. 5. Исходные данные, сглаженные по периоду длительностью 8 лет

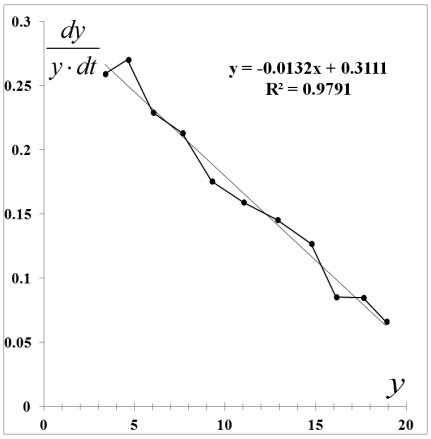


Рис. 6. Анаморфоза для участка исходных данных с 1983 года

Сглаженные данные имеют два отчетливо выраженных максимума (пика) приходящихся на 1988 и 2004 годы. Проверим соответствие этих вершин логистической модели, разработанной для анализа почти-периодических процессов с множеством периодов в работе [15]:

$$\frac{dy(t)}{dt} = ky(t)\cdot\{y_\infty - y(t)\} \qquad (4)$$

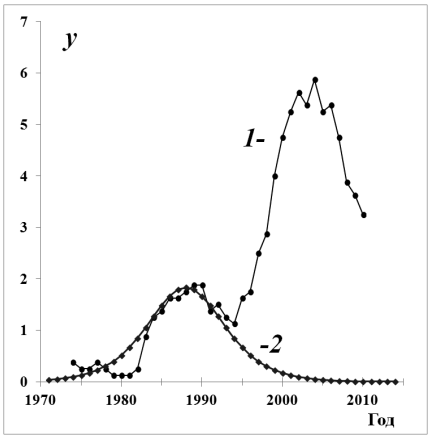


Рис. 7. Сопоставление исходных (1) и модельных данных (2)

Для этого возьмем исходные данные и построим в спрямляющих функциональных координатах (анаморфозы) $dy(t)/(y(t)\cdot dt)$ от $k\{y_\infty - y(t)\}$ для логистической модели [15] (см. рис. 6). Результат сопоставления модели и исходных данных представлен на рис. 7.

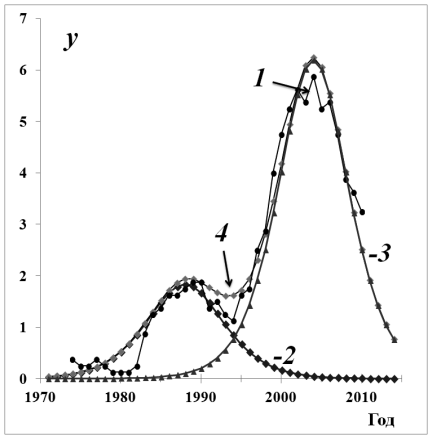


Рис. 8. Результат моделирования последовательности пиков.
1 – исходные данные, 2 – модель 1-го пика, 3 – модель 2-го пика,
4 – результирующая модель (сумма 2 и 4)

Далее можно графически оценить разницу между теоретической зависимостью и исходными данными. Для идентификации второй вершины мы так же воспользуемся анаморфозой для логистической модели.

Итоговый результат сопоставления моделей и исходных данных представлен на рисунке 8: Мы видим здесь общий вид последовательности пиков почти-периодов, соответствующих длительности 7-9 лет и 16 лет, также здесь отражена результирующая функция обобщенной модели.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что максимум появления вредоносных программ основанных на традиционных принципах пройден. Этот максимум выявлен по результатам анализа отклонения от тренда.

Если обобщить все проанализированные данные, то исходная точка появления вирусов приходится на начало 1970-х годов, через 16 лет был реализован максимум числа новых вирусов первого поколения, тогда как аналогичный максимум для вирусов второго поколения был достигнут через следующие 16 лет. Максимум появления вредоносных программ следующего поколения придётся на 2020 год, что показывает существование вирусных механизмов их функционирование уже в настоящее время.

V. Заключение и выводы

1) Анализ роста числа пользователей интернет и устройств выхода, показывает что динамика этих процессов может быть описана моделью ограниченного роста Гомперца, у которой имеется предел, к которому стремятся данные, а развитие на длительных интервалах – характеризуется падающими темпами. Оценка предела в рамках реализуемой системы технологий составляет 5,4 млрд. пользователей, что в 1,6 раза больше значения текущего времени. Точка перегиба на кривой скорости приходится в район 2019 года при числе пользователей около 3,7 млрд. В таких точках

часто начинают доминировать принципиально новые технологии.

2) Анализ динамики инцидентов зловредного характера в сети интернет с помощью метода почти-периодических функций позволяет выделить основной почти-период длительностью 7-9 лет и основной почти-период в 16 лет. Исходная точка появления компьютерных вирусов приходится на начало 1970-х годов, через 16 лет был реализован максимум числа новых вирусов первого поколения, тогда как аналогичный максимум для вирусов второго поколения был достигнут через следующие 16 лет. Максимум появления вредоносных программ следующего поколения может прийтись на 2020 год, что показывает существование механизмов их функционирования уже в настоящее время.

Список литературы

[1] Mahrin, M.N., Chuprat, S., Subbarao, A., Ariffin, A.F.M., Talib, M.Z.A., Darus, M.Z.A., Aziz, F.A.A. Malware prediction algorithm: Systematic review. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2018. Vol.96. No 14, pp. 4660-4676.

[2] Souri, A., Hosseini, R. A state-of-the-art survey of malware detection approaches using data mining techniques. Human-Centric Computing and Information Sciences, 2018, 8(1), pp. 1-22.

[3] Cohen, A., Nissim, N., Rokach, L., Elovici, Y. SFEM: Structural feature extraction methodology for the detection of malicious office documents using machine learning methods. Expert Systems with Applications, 2016, 63, pp. 324-343.

[4] Vatamanu, C., Gavriluţ, D., Benchea, R. M. Building a practical and reliable classifier for malware detection. Journal of Computer Virology and Hacking Techniques, 2013, 9(4), pp. 205-214.

[5] Bai, J., & Wang, J. (2016). Improving malware detection using multiview ensemble learning. Security and Communication Networks, 2016, 9(17), pp. 4227-4241.

[6] Truong, D.-T., Cheng, G. Detecting domain-flux botnet based on DNS traffic features in managed network. Security and Communication Networks, 2016, 9(14), pp. 2338–2347.

[7] Wu, S., Wang, P., Li, X., Zhang, Y. Effective detection of android malware based on the usage of data flow APIs and machine learning. Information and Software Technology, 2016, 75, pp. 17–25.

[8] Huda, S., Abawajy, J., Alazab, M., Abdollalihian, M., Islam, R., Yearwood, J. Hybrids of support vector machine wrapper and filter based framework for malware detection. Future Generation Computer Systems, 2016, 55, pp. 376–390

[9] Altaher, A. An improved Android malware detection scheme based on an evolving hybrid neuro-fuzzy classifier (EHNFC) and permission-based features. Neural Computing and Applications, 2016, 28(12), pp. 4147–4157.

[10] Canfora, G., Mercaldo, F., Visaggio, C. A. An HMM and structural entropy based detector for Android malware: An empirical study. Computers & Security, 2016, 61, pp. 1–18.

[11] Internet Live Stats (www.internetlivestats.com, дата последнего обращения 06 июля 2019 года).

[12] Лесько С.А., Гадзаов А.Ф., Жуков Д.О. Прогнозирование эпидемий компьютерных вирусов на основе метода почти-периодических функций. Нелинейный мир. 2016. Т. 14. № 6. С. 65-70.

[13] Б. М. Левитан. Почти - периодические функции, М., 1953.

[14] Cooke, R. L. ‘Almost-Periodic Functions’. The American Mathematical Monthly, Vol. 88, No. 7, 1981, pp. 515-526.

[15] Кузьмин В.И., Самохин А.Б., Гадзаов А.Ф., Чердынцев В.В. Модели и алгоритмы анализа нелинейных колебаний с трендом. М.: МИРЭА, 2015. – 94 с., ISBN 978-5-7339-1109-9.

Экологичные плоские нагревательные системы для обогрева помещений

Алиферов А.И.
Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия
aliferov@corp.nstu.ru

Аньшаков А.С.
Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН
Новосибирск, Россия
anshakov@itp.nsc.ru

Вдовин В.А.
Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия
aliferov@corp.nstu.ru

Чередниченко В.С.
Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия
aliferov@corp.nstu.ru

***Abstract* —The advantage of flat heating systems for environmental, energy and thermal parameters is shown. The dependences of the specific surface power and temperature distribution across the width of the heater on the coefficient of thermal conductivity and the geometric parameters of its basis are presented. The experimental electrical and temperature characteristics of a flat plasma-sprayed heater are presented.**

Ключевые слова — электроотопительные приборы; плазменно-напыленные плоские электронагреватели; удельная поверхностная мощность; распределение температуры в нагревателе; вольт-амперная зависимость нагревателя

I. Введение

Гигиенические рекомендации комфортного теплового режима жилых и производственных помещений при их конвективно-радиационном обогреве зимой определяют оптимальную температуру воздуха в диапазоне 16...26 °С в зависимости от назначения помещений и рода деятельности, находящихся в них людей. При включении некоторых нагревательных приборов в помещении появляется неприятный запах, причиной которого является возгонка и сжигание пылевой взвеси, оседающей на поверхности нагревательного элемента. При этом понижается процентное содержание кислорода и увеличивается содержание вредных окислов (CO_2 и др.) в воздухе отапливаемого помещения. Газы, образующиеся при возгонке пыли, раздражают слизистую оболочку дыхательных путей, вызывает ощущение сухости в горле и головную боль. Пригорания пыли не происходит, если температура поверхности отопительных приборов не превышает 70-85 °С [1].

II. Экологичные электронагреватели

Анализ тепловых и аэродинамических режимов работы электроотопительных приборов указывает на то, что наиболее экологичными являются обогреватели, не создающие принудительной циркуляции воздуха в отапливаемом помещении и имеющие температуру на поверхностях, контактирующих с воздушной атмосферой, не более 85 °С. К ним относятся масляные электрорадиаторы, пластиковые настенные обогреваемые панели, пленочные нагреватели, конвекторы и т.п. Подобные нагревательные приборы не создают интенсивных циркулирующих воздушно-пылевых потоков, как тепловентиляторы, не выжигают кислород воздуха и не разлагают пыль на вредные фракции, как радиационные нагревательные приборы, имеющие температуру контактирующих с воздухом нагревательных элементов от 300 до 500 °С.

Одним из альтернативных вариантов нагревателей, обеспечивающих как высокие экологические, так и улучшенные энергетические показатели, являются плазменно-напыленные плоские нагревательные элементы, разработанные в Институте Теплофизики СО РАН совместно с кафедрой автоматизированных электротехнологических установок Новосибирского государственного технического университета. Описание оборудования и технологии, применяемых при создании плазменно-напыленных нагревательных элементов, приведено в [2 - 7].

III. Конструкция плазменно-напыленных плоских электронагревателей

Конструктивно такие нагреватели (рис. 1) выполнены в виде стальной пластины, на одну из поверхностей которой нанесены последовательно три слоя порошковых материалов: электроизоляционный, резистивный и снова электроизоляционный. Стальная пластина изготовлена из стали Ст. 3 и имеет размеры 150×900 мм и толщину 2 мм. Электроизоляционные слои формировались из порошка Al_2O_3 толщиной 0,15...0,20 мм. Омический слой, имеющий толщину 0,15 мм, наносился из порошка, включающего 80 % никеля и 20 % хрома.

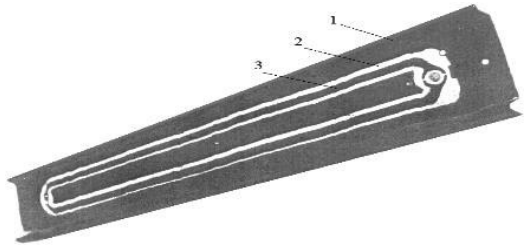


Рис. 1. Фотография плоского плазменно-напыленного нагревателя: 1 - стальная подложка; 2 - напыленный электроизоляционный слой нагревателя; 3 - резистивный слой нагревателя; внешний электроизоляционный слой, покрывающий резистивный слой, не показан.

IV. Параметры плазменно-напыленных плоских электронагревателей

Экспериментальные исследования параметров данного нагревателя, представленные в [5, 6], показали значительную зависимость удельного электрического сопротивления напыленного резистивного хромоникелевого слоя от его толщины, показанную на рисунке 2. С увеличением толщины напыленного резистивного слоя оно уменьшается. В диапазоне изменения толщины этого слоя в пределах 50…150 мкм величина удельного электросопротивления изменяется в

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

4.5 раза. После достижения 150 мкм удельное электросопротивление изменяется слабо. Поэтому при изготовлении завершающего образца нагревателя толщина была выбрана 150 мкм.

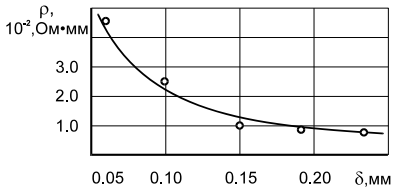


Рис. 2. Экспериментальная зависимость удельного электрического сопротивления напыленного хромоникелевого резистивного слоя от его толщины.

На рисунке 3 изображена вольт-амперная характеристика плоского нагревателя размером 150 х 900 мм^2 с двумя параллельными резистивными дорожками шириной 10 мм и длиной 750 мм каждая. Из рисунка видно, что точки, соответствующие постоянному току и переменному току промышленной частоты хорошо согласуются. Это значит, что один и тот же нагреватель будет одинаково эффективен как на переменном, так и на постоянном токе.

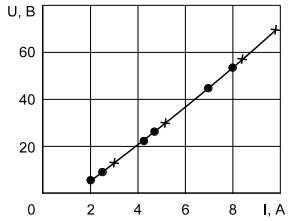


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика плоского плазменно-напыленного нагревателя на переменном (х) и постоянном (•) токе

На рисунке 4 показана экспериментальная зависимость температуры поверхности нагревателя на оси резистивного слоя от тока, проходящего через него. Измерения проводились на воздухе при температуре окружающей среды 18 °С.

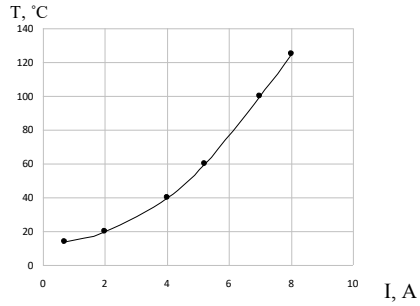


Рис. 4. Экспериментальная зависимость температуры поверхности нагревателя на оси резистивного слоя от тока, проходящего через него

На рисунке 5 дана зависимость средней удельной поверхностной мощности плоского плазменно-напыленного (1) и настенного панельного (2) нагревателей от максимальной температуры их поверхности.

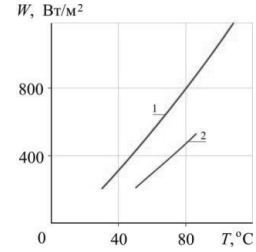


Рис. 5. Зависимость удельной поверхностной мощности от температуры нагревателя: 1 - плоский плазменно-напыленный; 2 - пластиковый панельный настенный

Сравнение этих характеристик указывает, что в диапазоне максимальных температур поверхностей нагревателя 50...85 °С удельная поверхностная мощность плоского плазменно-напыленного нагревателя в 1,8...2,1 раз больше, чем у пластикового панельного настенного.

На рисунке 6 изображены зависимости удельной поверхностной мощности плоского плазменно-напыленного нагревателя от толщины подложки и ее коэффициента теплопроводности. Исследовались параметры нагревателя, имеющего ширину подложки 150 мм, и на его поверхности располагалась одна дорожка резистивного слоя шириной 10 мм, а также многодорожечный нагреватель, имеющий несколько параллельных резистивных дорожек той же ширины. На отношение a/b – отношение расстояния между напыленными резистивными дорожками многодорожечного нагревателя к ширине резистивной дорожки (слоя).

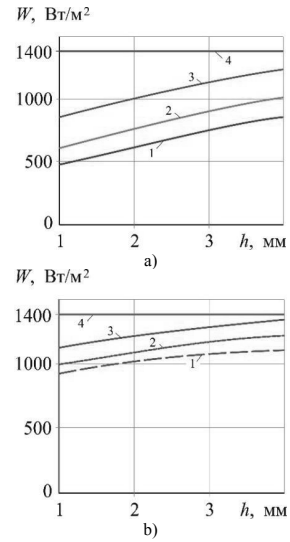


Рис. 6. . Зависимость удельной поверхностной мощности плоского плазменно-напыленного нагревателя: а) однодорожечного от толщины подложки *h*, коэффициента ее теплопроводности λ при максимальной температуре подложки $T_{макс}$ = 85 °С: 1 - λ = 30 Вт/(м·К); 2 - λ = 60 Вт/(м·К); 3 - λ = 120 Вт/(м·К); 4 - λ = ∞, соответствующий параметрам «идеального» плоского нагревателя; б) многодорожечного от толщины подложки и отношения расстояния между резистивными дорожками к ширине резистивной дорожки, при: λ = 30 Вт/(м·К): 1- a/b = 3; 2- a/b = 2; 3- a/b = 1; 4 - λ = ∞, при любом соотношении *a*/*b*.

При расчете приведенных характеристик применялась математическая модель, устанавливающая распределение температурного поля, получаемого по сечению многослойной структуры нагревателя, от геометрических и теплофизических параметров четырех слоев нагревателя. В основу модели положен конечно-разностный метод решения системы дифференциальных уравнений теплопроводности, описывающих процесс теплопередачи во всех слоях нагревателя. На плоских и торцевых поверхностях реализовывалось граничное условие третьего рода при конвективно-радиационном процессе теплоотдачи, на границах раздела слоев - граничное условие сопряжения. В модели учитывалась зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности подложки (стальной пластины). Так как теплообмен нагревателя со средой окружающего его помещения излучением и конвекцией осуществляется в воздушной среде, то для расчета эффективного коэффициента теплоотдачи была использована следующая формула

$$\alpha_{эфф} = \alpha_{изл} + \alpha_{конв} = \frac{5,67 \cdot \varepsilon \left[\left(\frac{T_н}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_ж}{100} \right)^4 \right]}{t_н - t_ж} + 0,54 \left(\mathrm{Gr} \cdot \mathrm{Pr} \right)_m^{0,25}$$

где $\alpha_{изл}$ - коэффициент теплоотдачи излучением, $\alpha_{конв}$ - коэффициент теплоотдачи естественной конвекцией [7]; ε - степень черноты поверхности нагревателя; $T_н$, $T_ж$, $t_н$, $t_ж$ - температура нагревателя и окружающей его среды в Кельвинах и градусах Цельсия, соответственно; Gr и Pr - критерии Грасгофа и Прандтля; индекс m показывает, что физические свойства воздуха выбирались по средней температуре пограничного слоя. При этом получаемое значение эффективного коэффициента теплоотдачи практически не зависит от того в каком положении находится нагреватель - горизонтальном или вертикальном, в силу малых его размеров.

На рисунке 7 представлены зависимости распределения температуры по ширине подложки однодорожечного и многодорожечного плазменно-напыленных нагревателей от толщины и коэффициента теплопроводности материала подложки. Более равномерное температурное поле получается при большей толщине и коэффициенте теплопроводности подложки. Наличие нескольких дорожек также уменьшает температурные перепады, получаемые по ширине подложки нагревателя.

Изображенные зависимости охватывают диапазон изменения коэффициента теплопроводности подложки, соответствующий нержавеющей (λ = 30 Вт/м·К) и качественной (λ = 60 Вт/м·К) сталям и алюминиевым сплавам (λ = 120 Вт/м·К). Удельная поверхностная мощность возрастает с повышением коэффициента теплопроводности материала подложки. Как видно из приведенных графиков, росту удельной поверхностной мощности способствует увеличение толщины металлической подложки.

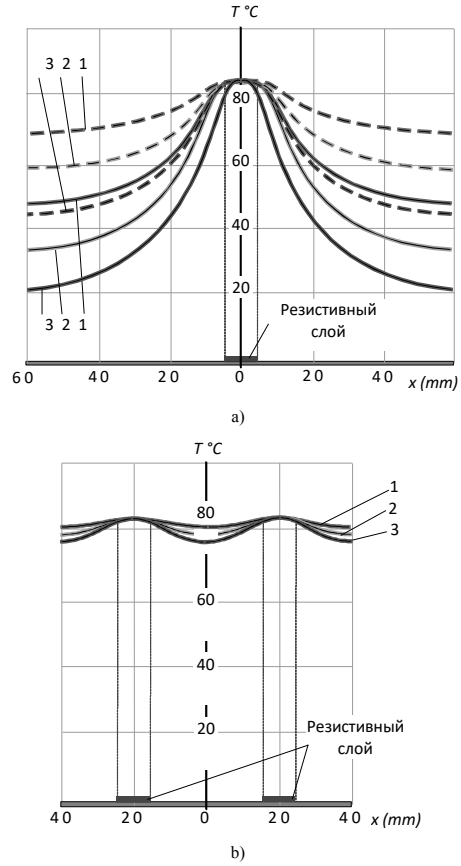


Рис. 7. Распределение температуры по ширине подложки плоского плазменно-напыленного нагревателя при его температуре 85 °С: а) однодорожечного от толщины и коэффициента теплопроводности подложки: 1 - λ =120 Вт/(м·К); 2 - λ =60 Вт/(м·К); 3 - λ =30 Вт/(м·К); (—) - h= 1мм; (---) - h= 4мм; x - текущая координата, направленная по ширине подложки; x = 0 соответствует положению продольной оси резистивной дорожки однодорожечного нагревателя; ширина резистивного слоя 10 мм; б) многодорожечного при толщине подложки 2 мм от коэффициента теплопроводности: 1 - λ =120 Вт/(м·К); 2 - λ =60 Вт/(м·К); 3 - λ =30 Вт/(м·К); x = 0 соответствует положению оси симметрии между соседними резистивными дорожками многодорожечного нагревателя.

Как показали расчеты, результаты которых приведены на рис. 6, 7, удельная поверхностная мощность, отдаваемая плоским плазменно-напыленным нагревателем, возрастает при повышении равномерности температурного поля в подложке. Очевидно, максимальная удельная поверхностная мощность при заданной максимальной температуре поверхности обогревательного прибора может быть получена при равномерном распределении температуры на его поверхности, соответствующем свойствам, близким к параметрам «идеального нагревателя». При этом, как видно из зависимостей, представленных на рис. 6, обеспечено это может быть толщинами подложек 2-4 мм.

V. Заключение

Экспериментальные исследования температурных режимов и электрических показателей плазменно-напыленных нагревателей, последующая обработка экспериментальных данных и теоретические исследования позволили провести сравнительную оценку их энергетических показателей с характеристиками панельных настенных обогревателей.

При одинаковой степени экологичности (по температурному режиму и созданию воздушно-пылевых потоков) сравнимые по конструктивной сложности и материалоемкости плоские плазменно-напыленные нагреватели являются более экономичными по энергетическим показателям. Причина повышенных показателей плазменно-напыленных нагревателей заключается в том, что их параметры (соотношение максимальной температуры поверхности и средней по поверхности удельной поверхностной мощности) могут быть максимально приближены к свойствам «идеального нагревателя», представляющего собой плоский нагреватель, одно из основных свойств которого является равномерное распределение температурного поля по его поверхности.

Учитывая, что плазменно-напыленные нагреватели могут выполняться не только плоскими, форма плоскости их поверхности может быть любой, а рабочая температура их поверхности может быть в диапазоне от 5^0C до 300^0C, они могут найти применение не только в системах обогрева помещений, но и в устройствах, обогревающих технологические емкости, используемые, например, в нефтегазовом комплексе.

Список литературы

[1] Гигиена и основы экологии человека: учебник для студ. высш. мед. учеб. заведений. Под ред. Ю.П. Пивоварова. - М.: «Академия».- 2006.- 528 с.

[2] Electric-arc plasma generator for treating the powder materials/ Anshakov A.S., Aliferov A.I., Kazanov A.M., Urbakh E.K. - Thermophysics and Aeromechanics. -1998. -Т. 5. -№ 2. -С. 215-222.

[3] Resource-saving electrotechnics and equipment / V. S. Cherednichenko, A. S. Anshakov, A.I.Aliferov // Proc. of the 2nd Korea-Russia International Industry-University Cooperation Forum. Daejeon, Korea, 2005.- Daejeon: Hanbat National University, 2005.- P.67-74

[4] Arc plasma generator for deposition of powder coating / A.I.Aliferov, A. S. Anshakov, A.A. Danilenko, Urbakh E.K., A.E Urbakh.// Proceedings of the Third International Forum on Strategic Technologies - IFOST, Novosibirsk-Tomsk, June 23-29, Russia, 2008 .- Novosibirsk: Publish house of Novosibirsk State Technical University, 2008.- P. 378–382

[5] Aliferov A.I., Urbukh E. Energy saving electroheaters for household heating / Proceedings of The 4th Russian-Korean international symposium on Science and Technology, KORUS-2000. - 2000. - С. 194-196.

[6] Electric heater development by means of plasma spraying/ Anshakov A.S., Aliferov A.I., Faleev V.A., Urbakh E.K., Khatsevskaya T.V.// Proceedings of The 6th Russian-Korean international symposium on Science and Technology, KORUS-2002. - 2002. - С. 214-218.

[7] Lupi S. Induction and direct resistance heating: theory and numerical modeling : monograph / S. Lupi, M. Forzan, A. Aliferov. - Heidelberg : Springer, 2015. - 370 p. - ISBN 978-3-319-03478-2, eISBN 978-3-319-03479-9. - DOI 10.1007/978-3-319-03479-9.

Многофакторный анализ эффективности расстановки конструктивных элементов в задаче оптимального проектирования магистрального нефтепровода

Афиногентов А.А.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
pondex@yandex.ru

Багдасарова Ю.А.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
bagdasarovaya@mail.ru

Фан И.А.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
irina.fedotova.1994@bk.ru

***Abstract* — the article formulates the problem of optimal design of the linear part of the oil trunk pipeline, as the problem of choosing the best conditions for the placement of structural elements. As an example, the optimal arrangement of shut-off valves along the oil pipeline route is considered. The criterion of the minimum possible oil yield in case of accidents and planned repairs of the pipeline is chosen as the criterion of the efficiency evaluation of valve arrangement. An additional factor that characterizes the efficiency of design decisions is the provision of the minimum possible categories of selected areas for the placement of shut-off valves. Multi-factorial analysis, allowing to choose the optimal combination of the locations of the shut-off valves on the pipeline route that provides the minimum value of the possible yield of oil in case of breakdowns and planned repairs of the pipeline and minimum categories, allocation of the valves is carried out based on the data envelopment analysis method (DEA). The DEA analysis algorithm is based on the solution of a special mathematical programming problem and allows to rank the elements in the sample of the coordinates of the positions of the shut-off valves of the main oil pipeline by the degree of efficiency. The method of selection of optimal coordinates of shut-off valves on a typical section of the main oil pipeline between oil pumping stations is given.**

Ключевые слова — нефть, магистральный нефтепровод, запорная арматура, минимизация экологического ущерба, параметрическая оптимизация, задача математического программирования, DEA-method.

I. Введение

Секционирование участков трубопровода является одной из ключевых стратегий по минимизации воздействия разливов нефти на окружающую среду при авариях магистральных нефтепроводов. Линейные задвижки должны быть расположены по трассе трубопроводов, обеспечивая уменьшение максимальных объемов выхода нефти при авариях и производстве плановых ремонтных работ с освобождением полости трубопровода от нефти.

Однако, существует ряд дополнительных факторов, учет которых необходим при проектировании расстановки запорной арматуры на магистральных нефтепроводах.

Анализ нормативной документации в области проектирования магистральных нефтепроводов [1-3] России, США, Канады позволяет сделать вывод, что данные документы предлагают секционирование на основе общих критериев, таких как категория участка расположения и максимальное расстояние между линейными задвижками. В документах, приведенных выше, не учитываются объемы разлива при разгерметизации, расположение экологически уязвимых зон и режимы эксплуатации трубопровода, что определяет необходимость разработки новых методик, учитывающих набор различных факторов, определяющих эффективность размещения линейных задвижек по трассе магистрального нефтепровода на этапе его проектирования.

В работах [4, 5] описан метод оптимальной расстановки линейных задвижек по трассе нефтепровода по критерию минимального возможного выхода нефти при авариях и плановых ремонтах трубопровода. Метод базируется на решении задачи нелинейного математического программирования с ограничениями. В качестве критерия оптимальности рассматривается минимаксный критерий, обеспечивающий минимизацию максимально возможного объема выхода нефти при аварийных ситуациях и при проведении ремонтных работ на любом участке нефтепровода, а в качестве ограничений выступают максимальные расстояния между линейными задвижками.

Решение задачи оптимальной расстановки линейных задвижек по трассе нефтепровода в работах [4, 5], представляет собой некоторый вектор параметров (расстояний между линейными задвижками) $\overline{\Delta^0} = \left\{\Delta_1^0, \Delta_2^0, ..., \Delta_s^0\right\}$ для которого выполняются специальные альтернансные правила. Согласно с указанными алтьернансными правилами на участке магистрального нефтепровода протяженностью L

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

найдутся $R_1 \geq 0$ различных точек $l1_p \in [0, L]$, $p = \overline{1, R_1}$ и $R_2 \geq 1$ различных точек $l2_q \in [0, L]$, $q = \overline{1, R_2}$ в которых расстояния между линейными задвижками и объемы выхода нефти на участке нефтепровода, описываемые функциями $F_1\left(l1_p, \overline{\Delta}\right)$ и $F_0\left(l2_q, \overline{\Delta}\right)$ достигают своих максимальных значений при выполнении условия:

$$R_1 + R_2 = S + 1, \quad (1)$$

где S - число искомых параметров вектора $\overline{\Delta^0}$ или координат мест установки линейных задвижек.

Решение описанной выше задачи определяет предельно достижимый минимум критерия оптимальности для рассматриваемого набора оптимизируемых параметров – координат мест установки линейных задвижек. Однако такое решение обеспечивает экстремум лишь для одного, выбранного критерия оптимальности, и ввиду данного обстоятельства будем считать его решением задачи однокритериальной оптимизации.

Полученные методом однокритериальной оптимизации решения могут не удовлетворять иным требованиям к расположению линейных задвижек, например, координаты мест их установки могут попадать на заболоченные участки или русловую часть рек, а расстояние между одной из пар линейных задвижек может оказаться максимальным.

В то же время, практически всегда можно согласиться с некоторым увеличением потенциальных объемов выхода нефти при аварии, если это позволит существенно повысить иные эксплуатационные свойства проектируемого объекта.

В таком случае возникает задача выбора из множества вариантов решения задачи такого варианта, который обеспечивал бы наилучшую комбинацию значений нескольких дополнительных факторов, определяющих эффективность расстановки линейных задвижек на магистральном нефтепроводе при некотором увеличении объемов выхода нефти при аварии.

II. Многофакторный анализ эффективности расстановки конструктивных элементов магистрального нефтепровода на основе метода DEA

A. Базовая постановка задачи анализа эффективности вариантов расстановки конструктивных элементов магистрального нефтепровода на основе метода DEA

Многофакторная оценка эффективности выбора мест расположения линейных задвижек на магистральном нефтепроводе в данной работе проводится с использованием метода анализа оболочки данных DEA (Data Envelopment Analysis).

Метод DEA позволяет построить границу относительной эффективности для набора многомерных объектов сравнения – вариантов расстановки линейных задвижек по трассе нефтепровода таким образом, что лучшие (эффективные) объекты сравнения из выборки будут находиться на границе эффективности, а все остальные объекты сравнения будут удалены от границы эффективности пропорционально своему отставанию в эффективности от лучших объектов сравнения. В таком случае решение задачи многофакторной оценки эффективности различных вариантов расстановки линейных задвижек по трассе нефтепровода представляет собой набор оценок относительной эффективности объектов сравнения в диапазоне от 0 до 1.

Базовая математическая модель оценки эффективности объектов сравнения метода DEA (CCR модель) предложена Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E. [6].

Математическая модель оценки представляет взвешенное соотношение между векторами выходных $Y = \left(y_j\right), j = \overline{1, J}$ и входных $X = \left(x_i\right), i = \overline{1, H}$ параметров:

$$E\left(X, Y\right) = \frac{\sum_{j=1}^{J} u_j y_j}{\sum_{i=1}^{H} v_i x_i}, \quad (2)$$

где $u_j, j = \overline{1, J}$ и $v_i, i = \overline{1, H}$ – весовые коэффициенты, которые характеризуют вклад в величину оценки относительной эффективности каждого из выходов $y_j, j = \overline{1, J}$ и входов $x_i, i = \overline{1, H}$ многомерного объекта сравнения.

В качестве входных параметров объектов сравнения X выбираются такие факторы, уменьшение величины которых приводит к повышению относительной эффективности объекта сравнения:

$$\frac{\partial E(x_1, ..., x_i, ..., x_H)}{\partial x_i} < 0, \; i = \overline{1, H}. \quad (3)$$

В качестве выходных параметров объектов сравнения Y выбираются такие факторы, рост величины которых приводит к повышению относительной эффективности объекта сравнения:

$$\frac{\partial E(y_1, ..., y_j, ..., y_J)}{\partial y_j} > 0, \; j = \overline{1, J}. \quad (4)$$

При этом для каждого n-го объекта сравнения из набора $n = \overline{1, N}$ значение величины оценки относительной эффективности E_n должно находиться на интервале *[0;1]* и стремиться к границе эффективности, что можно сформулировать в виде условий (5) и (6):

$$\frac{\sum_{j=1}^{J} u_{jn} y_{jn}}{\sum_{i=1}^{H} v_{in} x_{in}} \le 1, \ \forall \left(\begin{array}{c} n = \overline{1,N};\ j = \overline{1,J};\ i = \overline{1,H}; \\ u_{jn} > 0;\ v_{in} > 0 \end{array} \right), \qquad (5)$$

$$E_n\left(X_n, Y_n\right) = \frac{\sum_{j=1}^{J} u_{jn} y_{jn}}{\sum_{i=1}^{H} v_{in} x_{in}} \to \max_{U,V \in G}, \qquad (6)$$

где $U = \left(u_{jn}\right), j = \overline{1,J},\ V = \left(v_{in}\right), i = \overline{1,H}$ - векторы весовых коэффициентов для каждого *n*-го объекта сравнения.

Для отыскания N численных значений относительных эффективностей E_n объектов сравнения необходимо разрешить систему, состоящую из N задач вида (6) и N ограничений вида (5), определив значения весовых коэффициентов u_{jn} и v_{in}. Методы решения подобных задач приведены в работе [6].

Метод DEA имеет ряд модификаций, одна из которых, получившая название «суперэффективность» [7] (Super-efficiency), позволяет найти оценки относительной эффективности ES_n, распределённые на интервале *[0,∞)* и дает возможность определить наилучший в группе объект сравнения, имеющий максимальную оценку эффективности ES_n.

B. Алгоритм оценки эффективности вариантов расстановки конструктивных элементов магистрального нефтепровода

Таким образом, исходя из постановки задачи многофакторной оптимизации расстановки линейных задвижек на магистральном нефтепроводе и описания метода DEA, в качестве входных параметров объектов сравнения примем следующий набор факторов:

$x_1 \ldots x_K$ – максимальные расстояния между ближайшими линейными задвижками (в километрах), уменьшение которых приводит к уменьшению длины линий временных трубопроводов, собираемых при откачке нефти на участке:

$$x_k = \max\left(l_k - l_{k-1},\ l_{k+1} - l_k\right),\ k = \overline{1,K}, \qquad (7)$$

где K – количество линейных задвижек, не включая задвижки, расположенные в начале и конце нефтепровода $l_0 = 0$ и $l_{K+1} = L$, L - длина нефтепровода.

$x_{K+1} \ldots x_{2K}$ – категории участков размещения линейных задвижек, определяемые согласно требований стандарта [1], следуя которым, чем выше категория участка размещения, тем больше затрат ресурсов потребуется при сооружении и последующей эксплуатации элементов трубопровода. Поэтому примем шкалу оценки для участков размещения линейных задвижек согласно таблице I.

ТАБЛИЦА I. ШКАЛА ОЦЕНКИ УЧАСТКОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

Категория участка	IV	III	II	I	B
Оценка	1	2	3	4	5

В качестве выходного параметра модели объектов сравнения примем величину y_1 обратно пропорциональную величине максимально возможного объема выхода нефти при аварийных ситуациях V_{max} с масштабным коэффициентом, выбранным исходя из анализа объемов выхода нефти для типовых участков нефтепроводов равным 10000 (м^3):

$$y_1 = \frac{10000}{V_{max}}. \qquad (8)$$

Задача оптимального проектирования магистрального нефтепровода, таким образом, сводится к задаче многофакторной оценки относительной эффективности вариантов размещения конструкционных элементов (линейных задвижек) из заданного набора.

Схема участка магистрального нефтепровода представлена на рисунке 1.

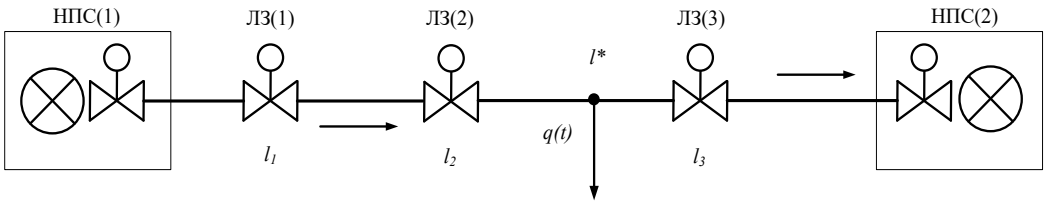


Рис. 1. Схема магистрального нефтепровода: НПС(1), НПС(2) – нефтеперекачивающие станции, ЛЗ(1), ЛЗ(2), ЛЗ(3) – линейные задвижки, l_1, l_2, l_3 – координаты мест размещения линейных задвижек, l^* – координата места выхода нефти.

III. Результаты и выводы

Для апробация разработанного алгоритма оценки эффективности вариантов расстановки конструктивных элементов магистрального нефтепровода, на основе экспертных оценок сформирован тестовый набор данных. Формирование выборки данных из неограниченного набора вариантов размещения линейных задвижек на магистральном нефтепроводе является самостоятельной задачей.

В рассматриваемом примере, представленном в виде таблицы II, заведомо известен лишь один вариант размещения линейных задвижек (вариант 1), соответствующий решению однокритериальной задачи оптимизации, остальные варианты формируются на основе экспертного анализа условий прокладки и профиля трассы нефтепровода. Выборка содержит $N=8$ вариантов размещения для $K=3$ линейных задвижек.

ТАБЛИЦА II. Параметры модели объектов сравнения относительной эффективности вариантов размещения линейных задвижек на магистральном нефтепроводе

Вариант	Параметры модели объектов сравнения						
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	y_1
1	19	19	17	4	2	3	1,97
2	22	17	16	4	4	3	1,74
3	21	21	15	4	2	2	1,81
4	24	24	25	2	2	3	1,29
5	23	18	18	2	4	2	1,55
6	20	20	22	2	2	3	1,49
7	17	21	21	2	2	3	1,92
8	19	24	24	4	2	2	1,42

Результаты расчета оценок E_n и ES_n относительной эффективности вариантов размещения линейных задвижек на магистральном нефтепроводе, по моделям CCR и Super-efficiency метода DEA, представлены в таблице III.

Результаты расчета оценок E_n и ES_n относительной эффективности вариантов размещения линейных задвижек на магистральном нефтепроводе, по моделям CCR и Super-efficiency метода DEA, представлены в таблице III.

Из вариантов размещения, приведенных в примере, эффективными являются варианты 1, 3, 5, 7. Наилучшим вариантом со значением относительной эффективности $ES_7 = 1,43$ является вариант 7, т.е. решение задачи многофакторной оптимизации отличается от варианта 1, полученного при решении задачи однокритериальной минимаксной оптимизации [4, 5].

ТАБЛИЦА III. Результаты расчета оценок относительной эффективности вариантов размещения линейных задвижек на магистральном нефтепроводе

Вариант	Оценка относительной эффективности	
	E_n	ES_n
1	1,00	1,14
2	0,99	0,99
3	1,00	1,31
4	0,67	0,67
5	1,00	1,10
6	0,81	0,81
7	1,00	1,43
8	0,83	0,83

Полученное в данной работе с помощью методики многофакторной оптимизации, основанной на методе DEA, решение для проблемы расстановки запорной арматуры на магистральном нефтепроводе, в отличие от однокритериального подхода минимизации максимально возможного объема выхода нефти при аварийных ситуациях позволяет учитывать особенности рельефа трассы и категории участков трубопровода, т.е. принимать во внимание возможные экологические риски, а так же потенциальные издержки при строительстве и эксплуатации нефтепровода.

Предложенная методика позволяет оценивать неограниченный набор дополнительных факторов и использовать многоцелевые подходы для решения задачи оптимального проектирования магистральных нефтепроводов.

Список литературы

[1] СП 36.13330-2012 Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*.

[2] ASME B31.4-2012 Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries.

[3] CSA Z662-15: Oil and Gas Pipeline Systems.

[4] Афиногентов А.А., Багдасарова Ю.А., Фан И.А. Оптимизация размещения линейной запорной арматуры на магистральном нефтепроводе по критерию минимального выхода нефти // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2018. № 5-6. С. 28-32.

[5] Afinogentov A.A., Ivanova N.I., Fedotova I.A. “The Method of Shut-off Valves Optimal Placing on Trunk Oil Pipeline“, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, vol. 272, 2. Section one.

[6] Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E. “Measuring the efficiency of decision-making units“, European Journal of Operation Research, vol. 6 (2), pp. 429-444, 1978.

[7] Chen Y., Du J. Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis. In: Zhu J. (eds) Data Envelopment Analysis. International Series in Operations Research & Management Science, vol. 221. Springer, Boston, MA, 2015.

Моделирование и исследование алгоритма обнаружения состояний гонки в многопоточных вычислительных системах

Барабанова П.С.
СамГУПС
Самара, Россия
lady.barabanovapolina@list.ru

Засов В.А.
СамГУПС
Самара, Россия
vzasov@mail.ru

***Abstract* — The article discusses the static method for determining and localizing race conditions in multiprogramming systems. The choice of this method is justified by the need to make the race detection process a standard software testing process that an ordinary developer can conduct. The aim of the work is to develop a set of programs for the automated detection of races by static methods. For this purpose, a software implementation of the algorithm was developed, which was tested on the Peterson algorithm and a software package for monitoring transport infrastructure facilities. The developed software complex accurately and guaranteedly discovered the situation of the race, and indicated the places and streams that exist in these situations. Using the program allows you to increase the reliability of the results of the developed multi-threaded software.**

Ключевые слова — мультипоточное программирование, синхронизация потоков, состояния гонки, надежность, тестирование, статический анализ, граф потока управления, комплекс программ.

I. Введение

Состояние конкурентного доступа к памяти или состояние гонки – ситуация, когда несколько потоков одновременно обращаются к одному и тому же ресурсу и хотя бы один из потоков выполняет операцию записи, а порядок этих обращений точно не определен. Появление состояний гонок приводят к некорректной работе программы, т.е. к различным результатам работы программы при одинаковых исходных данных [1,2].

Способы поиска гонок классифицируются на динамический анализ, статический анализ, проверку на основе моделей и аналитическое доказательство корректности программ.

В динамическом анализе состояние гонки может быть найдено, если оно возникло в процессе проверки исполнения только одного из вариантов программы. Полная проверка требует исполнения множества других вариантов программы, что требует длительного времени тестирования. Исходя из этого, проверка способом динамического анализа эффективна только для небольших программных модулей [2,3]. Такой же недостаток присущ способу проверки на основе моделей [2,3].

Для обнаружения “мигрирующих” ошибок синхронизации, которые проявляются с некоторой вероятностью при исполнении программы эффективен мониторинг — сбор данных о ходе выполнения программы с минимальным вмешательством в работу целевой системы и без остановки отлаживаемой задачи и модификации её данных [3]. Такой мониторинг требует длительного времени тестирования и увеличивает стоимость разработки программного обеспечения.

Статические анализаторы предназначены для связи множества всех состояний программы со всеми возможными ситуациями появления гонок в программе. Количество всех состояний очень велико, поэтому статические анализаторы только отслеживают возможные ситуации гонок [4-6].

Сравнение и анализ методов поиска гонок приводит к выводу, что статический анализ является одним из наиболее эффективных методов. Действительно:

- не требуется проверять полностью программный код на недостающие функции и процедуры в связи с тем, что статический анализ можно применить к части программы;
- статический анализ способен обнаружить «мигрирующие» ошибки, т.к. данный анализ использует мониторинг;
- статический анализ не требует выполнения программы.

Классические алгоритмы, используемые в статическом анализе представлены в [3-5]. Данные алгоритмы имеют следующие недостатки: алгоритм [3] проводит анализ только действительных траекторий исполнения программ, подрезая недосягаемые ветви исполнения; алгоритм [4] является потоко- и контекстно-нечувствительным (анализирует функции без привязки к контексту), а также в алгоритме отсутствует анализ сложных типов данных; алгоритм [5] не осуществляет контроль графа исполнения, т.к. является потоконечувствительным и этот алгоритм содержит ограниченную контекстную чувствительность анализа.

Следует заметить, что не существует абсолютного понятия корректности работы произвольной программы. Можно только проверить правильность решения определённой задачи, которую выполняет программа. Для этого разрабатывается тестовый вариант программы для проверки работающей программы, который наиболее полно соответствует решаемой задаче и возможно, в результате, наряду с правильными результатами появятся неверные, что может указать о возможных состояниях гонки.

В работах [1,2] предлагаются эффективные по вычислительной сложности метод и алгоритм статического анализа, которые позволяют существенно

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

уменьшить число необходимых операций при анализе программы, гарантируя при этом точное определение наличия, либо отсутствия состояний гонки в ней.

Таким образом, в настоящее время существует достаточно большое число теоретически обоснованных методов статического анализа, поэтому применение этих методов является более предпочтительным по сравнению с другими методами.

Статические методы и алгоритмы представлены в основном в аналитическом виде, что сдерживает их применение на практике. Для решения прикладных задач актуальна разработка программной реализации этих алгоритмов.

Кроме того, методика статического анализа должным образом не формализована и не является в достаточной мере автоматизированной, из чего следует, что данный анализ может применяться только квалифицированными специалистами, что сдерживает применение методов.

Таким образом, имеется насущная потребность в разработке средств, которые позволят сделать процесс обнаружения гонок стандартным технологическим процессом при тестировании программного обеспечения, который может производить рядовой разработчик программного обеспечения.

Цель работы – разработка комплекса программ для автоматизированного обнаружения гонок статическими методами.

II. Тестовый комплекс программ для обнаружения состояний гонок в многопоточных программах

Для исследования эффективности алгоритма обнаружения состояний гонки реализован тестовый комплекс программ. Данный комплекс решает следующие задачи:

1. реализует наиболее распространенные алгоритмы статического анализа;

2. представляет интерфейс для выбора применяемого алгоритма и его параметров;

3. идентифицирует программу или ее часть для тестирования;

4. отображает результаты выполнения тестирования.

Архитектура комплекса состоит из трех слоев – презентационного, логики, данных (рис.1).

Презентационный слой содержит в себе следующие компоненты: интерфейс и подсистему визуализации результатов моделирования, подсистема документирования экспериментов. Слой логики содержит архив алгоритмов. Слой данных состоит из подсистемы доступа к данным и интерпретатора результатов, рекомендации по устранению гонок.

Разработка программ проводилась в среде IntelliJ IDEA Community Edition 2018.3 на языке Java. IntelliJ IDEA Community Edition является версией IntelliJ IDEA. Программа для тестирования принимается на языке Java, наиболее популярном языке программирования, комплекс программ тоже реализован на Java.

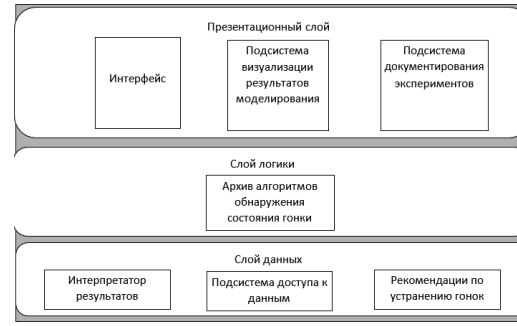


Рис. 1. Архитектура комплекса программ

Приложения Java транслируются в специальный байт-код, поэтому они работают на любой компьютерной архитектуре с помощью виртуальной Java-машины, следовательно, комплекс универсален [6-8].

Исследуемый и моделируемый в работе алгоритм, интегрированный в комплекс программ, реализован на основе библиотеки для анализа программ Wala [7].

Общий алгоритм работы с комплексом программ состоит в последовательности шагов, которые описаны ниже.

Шаг 1: выбирается алгоритм, который будет анализировать программу, с помощью указания функции “Выбрать алгоритм”.

Шаг 2: выбирается функция “Выберите файл”, где определяется программа для анализа.

Шаг 3: запускается алгоритм выбором функции ”Начать анализ”.

Шаг 4: после завершения анализа в блоке “Интерпретатор” появляется граф потока управления данной программы.

Шаг 5: выбирается функция “Подробный анализ” для более подробного изучения результатов анализа в текстовой форме.

Шаг 6: в блоке “Рекомендации” выводится информационное сообщение. Если программа работает корректно и не содержит гонок, она выводит сообщение: «Гонка не обнаружена». Если алгоритм обнаружил состояние гонки, выводится сообщение о местонахождении некорректного кода и рекомендации по устранению этого состояния.

В блоке “Справка” приведена инструкция по работе с комплексом программ и справочная информация для анализа.

Рассмотрим работу комплекса программ на примере взаимоисключающего алгоритма Петерсона для синхронизации двух потоков [8].

Суть алгоритма состоит в следующем, поток вызывает процедуру с его номером в качестве параметра, которая организует ожидание потока своей очереди входа в критическую секцию.

После исполнения критической секции и выхода из неё поток вызывает другую определенную процедуру, после этого другие потоки могут войти в критическую область [8].

Данный алгоритм не использует специальных команды процессора для запрета прерываний, блокировки шины памяти и т. д., но использует только общие переменные памяти и цикл для ожидания входа в критическую секцию исполняемого кода [8-10].

В комплексе программ используется анализ, который основан на представлении программы в виде графа потока управления (CFG), который отображает множество всех возможных путей исполнения программы в виде графа [9].

В графе потока управления при анализе распространения данных программы в переходах между его вершинами, происходит обнаружение шаблонов ошибочного или потенциально опасного поведения проверяемой программы[10,11].

Далее, в графе возможно определить места, где начинается опасная ситуация, местонахождение их фактического возникновения и полного пути между ними с выводом всех значений промежуточных условий.

Каждый узел в графе потока управления соответствует базовому блоку, т.е. прямолинейному участку кода, который не содержит ни операций передачи управления, ни точек, на которые управление передается из других частей программы. Направленные дуги используются в графе для представления инструкций перехода. Обычно в большинстве реализаций добавлено два специализированных блока:

- входной блок, через который управление входит в граф;
- выходной блок, который завершает все пути в данном графе [10-12].

Также в комплексе программ используется промежуточное представление (SSA), которое используется компиляторами, где каждой переменной значение присваивается только один раз.

Следует отметить, что переменные анализируемой программы делятся на версии, из чего следует, что каждое присваивание осуществляется уникальной версией переменной [9-12].

В узле графа еще может быть инструкция (phi-узел), которая используется для выбора значения в зависимости от предшественника текущего блока. Данные узлы необходимы в связи со структурой стиля SSA, в котором переменная должна быть определена один раз. Например, если есть два возможных значения какой-либо переменной перед командой возврата, тогда вставляется phi-узел, объединяющий оба значения[9-12].

Возможности инструкции phi-узел способны объединить определения, которые должны быть достигнуты (то есть определения, которые должны быть новыми версиями переменных) [9].

Анализируя граф, можно отследить работу двух потоков, которые вызывают один и тот же метод, что может вызвать некорректное выполнение программы, так как у метода нет зарезервированного слова synchronized.

Результаты работы программы представлены на рис.2.

Граф потока управления содержит phi-узел, который находится в узле графа под номером 5, который содежит переменные узлов 1 и 2 в блоке вызова метода, что указывает на возможное состояние гонок данных потоков [10].

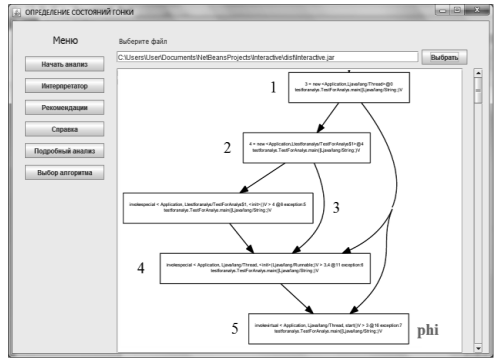


Рис. 2. Граф потока управления

То же самое состояние гонки можно проследить в подробном текстовом анализе на рис.3.

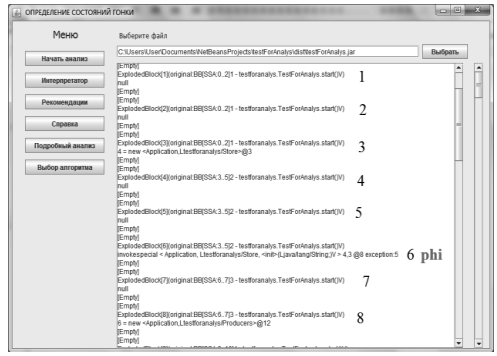


Рис. 3. Анализ машинного кода программы в текстовой форме

Программа определила, что состояние гонки возникнет в исследуемой программе и указала место и потоки, которые находятся в состоянии гонки (рис. 4). Комплекс программ также предлагает средства для устранения гонок (рис. 4).

Например, для рассмотренной задачи, где используются два потока рекомендуется использовать мьютекс. В других ситуациях для устранения гонок нескольких потоков комплекс программ будет рекомендовать использовать передачу сообщений или семафор и т.д.

Анализируя результаты выполненных экспериментов (в работе приведены результаты лишь части из них), можно сделать следующие выводы.

Рассмотренная программа поиска состояний гонки позволяет существенно уменьшить время разработки программного обеспечения.

Рис. 4. Информационное сообщение об обнаружении гонки

Если необходим более точный анализ гонок, целесообразно применить более сложный метод [1,2].

Данный метод строится на основе анализа графа совместного исполнения потоков, который связан с разделяемыми ресурсами (например, общими ячейками памяти): операции чтения, операции записи, операции хранения и изменения ранее считанного значения и другие операции [3-5]. Дуги графа распределяют по классам эквивалентности. Потом вычисляют результаты исполнения только для одного представителя каждого класса [6].

Далее редуцируют граф на основе выбранных представителей классов и находят результаты исполнения потоков от начальной вершины графа к конечной. Для определения возникновения состояния гонки производится анализ полученного состояния [4-6].

Построим расчетный граф для алгоритма Петерсона, который показан на рис. 5.

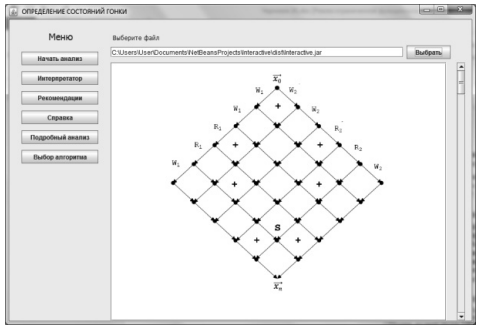


Рис. 5. Граф совместного исполнения потоков

Точка S на графе совместного исполнения потоков обозначает неразрешимое состояние гонки. На основе работы метода было обнаружено, что допустимые пути не проходят через точку S, поэтому алгоритм Петерсона корректно разрешает критическую точку[1,2].

Результаты вычислительных экспериментов показывают эффективность применения исследуемого алгоритма на небольших многопоточных программах. Важным достоинством применения тестового комплекса программ является увеличение надежности разрабатываемого программного обеспечения и сокращение времени разработчика на поиск «плавающих» ошибок.

Если программа обнаруживает риск возникновения состояния гонок и очередность выполнения потоков важна, тогда необходимо вводить дополнительные программные решения наряду с взаимоисключением, дополнительно определяющим строгую очередность выполнения потоков, например, за счет организации обмена сообщениями между потоками [8].

Разработанный комплекс программ предназначен для тестирования программного обеспечения компьютерных систем управления, к которым предъявляются высокие требования по надежности и достоверности работы [13].

III. Заключение

В работе проведен анализ методов обнаружения состояний гонки в многопоточных программах, на основании которого для программной реализации выбраны методы статического анализа, как наиболее эффективные для практических приложений.

Для автоматизации процесса обнаружения гонок в многопоточных приложений разработан комплекс программ, позволяющий повысить эффективность тестирования программного обеспечения.

Работоспособность комплекса программ продемонстрирована на примере алгоритма Петерсона.

Список литературы

[1] Кудрин М.Ю., Прокопенко А.С., Тормасов А.Г. Метод нахождения состояний гонки в потоках, работающих на разделяемой памяти. // Сборник научных трудов МФТИ. – М.: МФТИ, 2009. – № 4. – Том 1. – С. 181-201.

[2] Битнер В. А., Заборовский Н. В. Построение универсального линеаризованного графа потока управления для использования в статическом анализе кода алгоритмов, Модел. и анализ информ. систем, 2013, том 20, номер 2. С. 166–177

[3] Deutsch A. Interprocedural May-Alias Analysis for Pointers: Beyond k-limiting // Proc. Programming Language Design and Implementation. — ACM Press, 1994.

[4] Steensgaard B. Points-to Analysis in Almost Linear Time //Proceedings of the 23rd ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages (POPL'96). 1996. ACM. P. 32–41.

[5] Andersen L. A Program Analysis and Specialization for the C Programming Language. Ph.D. thesis, Copenhagen, 1994. - 311 p.

[6] Emanuelsson P., Nilsson U. A Comparative Study of Industrial Static Analysis Tools // Elsevier Science Publishers. – 2008. – Amsterdam, Netherlands. №217.

[7] T.J. Watson Libraries for Analysis (WALA) (http://wala.sourceforge.net).

[8] Таненбаум Э. Современные операционные системы: 2-изд. – СПб.: Питер, 2002. – 1040 с.

[9] Альфред В. Ахо, Моника С. Лам, Рави Сети, Джеффри Д. Ульман. Компиляторы: принципы, технологии и инструментарий.— 2-е изд.— М.: Вильямс, 2008. – 1184 с.

[10] Робин Хантер. Основные концепции. — М.: Вильямс, 2002. – 256с.

[11] Steven S. Muchnik Advanced Compiler Design And Implementation, Morgan Kaufmann Publishers, July 1997. - 880 p.

[12] Касьянов В.Н. Оптимизирующие преобразования программ. – М.: Наука, 1988. - 336 с.

[13] Барабанова П. С. Сравнительный анализ моделей надежности программного обеспечения //Аналитические и численные методы моделирования естественно-научных и социальных проблем: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2018. – С. 133-138.

Исследование аппроксимационных свойств двумерных стохастических базисов в задачах восстановления изображений

Батищев В.И.
кафедра «Информационные технлогии»
Самарский технический университет
Самара, Россия
vib@list.ru

Золин А.Г.
кафедра «Информационные технлогии»
Самарский технический университет
Самара, Россия
zolin.a.g@gmail.com

Якимов В.Н.
кафедра «Информационные технлогии»
Самарский технический университет
Самара, Россия
vvnr@hotmail.com

***Abstract*—This paper touches upon the problems of constructing a basis for two dimensional stochastic functions, which represent samples of random numbers with a given distribution law. The algorithm for constructing an approximation model with the use of this basis is described. The general algorithm for two dimensional signal recovery using the stochastic basis by the least squares method with a given weight function is given. The approach to solving the problem of recovery of blurred images with a known point scattering function by constructing an inverse filter model is proposed. The approbation of the algorithms was performed on model examples and in the processing of real images obtained by remote sensing of the Earth. To quantify the quality of the recovery, we used a relative root mean square measure of the difference between the reference and reconstructed images.**

Ключевые слова: восстановление сигнала, реконструкция изображения, функция рассеяния точки, критерий адекватности, модель, базисная функция, метод наименьших квадратов.

I. Введение

При решении задач обработки и интерпретации экспериментальных данных, в настоящее время, часто возникает необходимость восстановления неизвестного входного воздействия по результатам регистрации откликов на выходе средств измерения. В большинстве случаев это задача компенсации искажающего действия аппаратной функции, обеспечивающая улучшение разрешающей способности различного рода измерительных приборов и систем [1,2]. В случае, когда для обработки доступна только часть искаженного сигнала, без начальных условий, задача становится недоопределенной и, соответственно, некорректной [3,4].

Примером таких задач, являются задачи восстановления смазанных и расфокусированных изображений [5,6,7]. Так, в современных системах дистанционного зондирования Земли (СДЗЗ) изображение формируется с помощью устройств с зарядовой связью, работающих в режиме временной задержки и накопления оптического сигнала. Для правильной работы таких приборов необходимо, чтобы скорость космического аппарата была точно согласована с периодом опроса светочувствительной матрицы. На практике такое равенство может нарушаться из-за ошибки вычисления скорости спутника [8]. В результате изображение подстилающей поверхности оказывается смазанным вдоль траектории движения летательного аппарата. Конструктивные особенности светочувствительных элементов позволяют получить параметры функции рассеяния точки. Способы определения параметров смаза представлены в [9,10]. Полученные в результате несоответствия скоростей искажения чаще имеют одну пространственную составляющую, однако в виду угловых движений летательных аппаратов, таких как тангаж и рысканье, способствуют формированию двумерной функции рассеяния точки (ФРТ). Альтернативный подход к решению двумерной задачи восстановления смазанного изображения представлен, например, в [11], где рассмотрен метод построения двумерных обратных цифровых фильтров с регуляризирующими параметрами без построения модели весовой функции.

Каждая область полученного с помощью СДЗЗ смазанного изображения может быть представлена как свертка значений строки исходного изображения x с известной ФРТ - h_0

$$x_B(n_1,n_2)=\sum_{r=0}^{N_{R0}-1}\sum_{c=0}^{N_{C0}-1}h_0(r,c)x(n_1-r,n_2-c), \quad (1)$$

здесь N_{R0}, N_{C0} – размерность ФРТ, $n_1 = 0,..,N_R\text{-}1$, $n_2 = 0,..,N_C\text{-}1$, где N_R и N_C – количество пикселей строки и столбца исходного изображения.

II. Постановка задачи

Задача реконструкции полученной с помощью (1) числовой последовательности сводится к нахождению функции $h(n_1, n_2)$, представляющей собой весовую функцию обратного двумерного фильтра, позволяющего получить с помощью операции свертки оценку значений интенсивностей пикселей восстановленного изображения x_{rec} :

$$x_{rec}(n_1,n_2)=\sum_{r=0}^{N_R-1}\sum_{c=0}^{N_C-1}h(r,c)x_B(n_1-r,n_2-c)$$

В данной статье рассматривается подход, основанный на построении двумерной

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-08-00253-А и 19-08-00228-А

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

аппроксимационной модели искомого результата x_{rec}. Несмотря на то, что на данный момент теория аппроксимации разработана достаточно полно, при решении конкретных прикладных задач встают вопросы, связанные с обоснованием и выбором критерия соответствия модели оцениваемой функции (критерия адекватности), вида модели и системы базисных функций.

Как известно, системы базисных функций могут быть либо выбраны из множества известных, либо сформированы по определенной методике под решаемую задачу [11,12,13,14]. Решение проблемы формирования базисной системы, согласованной с априорной информацией и физической сущностью явлений, позволит повысить точность и достоверность результатов оценивания.

В настоящей статье рассматривается построение аппроксимационной модели в системе базисных функций, представляющих собой выборку случайных величин с заданным распределением, соответствующим распределению оцениваемой функции (далее будем называть такой базис стохастическим). В [14] представлен подход построения аппроксимационных моделей в стохастическом базисе для одномерных числовых рядов.

III. Построение аппроксимационной модели в базисе стохастических функций

Аппроксимация функции $x(n_1,n_2)$, $n_1=0,\ldots,N_R-1$, $n_2=0,\ldots,N_C-1$ моделью

$$\hat{x}(n_1,n_2)=\sum_{k=0}^{p} C_k \phi_k(n_1,n_2) \qquad (2)$$

в базисе функций $\phi_k(n_1, n_2)$ сводится к оцениванию коэффициентов C_k методом наименьших квадратов. Значение погрешности ε:

$$\varepsilon=\sum_{n_1=0}^{N_R-1}\sum_{n_2=0}^{N_C-1}(\hat{x}(n_1,n_2)-x(n_1,n_2))^2 \qquad (3)$$

зависит от порядка модели p, значений параметров модели C_k и от вида базисных функций $\phi_k(n_1, n_2)$. В качестве базисных функций предлагается использовать сгенерированную выборку случайных величин с заданными параметрами распределения. Формально представляя функции $\phi_k(n_1, n_2)$ в ортогональном базисе $\Psi_k(n_1, n_2)$:

$$\phi_k(n_1,n_2)=\sum_{v=0}^{k} A_{k,v}\Psi_v(n_1,n_2), \qquad (4)$$

и, подставляя $\phi_k(n_1, n_2)$ из (4) в (2), получим:

$$\hat{x}(n_1,n_2)=\sum_{v=0}^{p}\beta_v\Psi_v(n_1,n_2),$$

где: $\beta_v=\sum_{k=v}^{p} C_k A_{v,k}$.

Из соотношения (3) находим, что погрешность будет минимальной, если

$$\beta_v=\frac{1}{\Phi_v}\sum_{n_1=0}^{N_R-1}\sum_{n_2=0}^{N_C-1} x(n_1,n_2)\Psi_v(n_1,n_2),$$

где:

$$\Phi_v=\sum_{n_1=0}^{N_R-1}\sum_{n_2=0}^{N_C-1}\Psi_v^2(n_1,n_2), v=\overrightarrow{0,p} \qquad (5)$$

Минимальное значение погрешности при этом будет равно

$$\varepsilon_{min}=\sum_{n_1=0}^{N_R-1}\sum_{n_2=0}^{N_C-1} x(n_1,n_2)^2-\sum_{k=0}^{p} S_k$$

Здесь $S_k=\beta_k^2\Phi_k$.

Нетрудно видеть, что для уменьшения погрешности ε_{min}, k-ую базисную функцию следует выбирать такую, чтобы $S_k \rightarrow max$.

На основании вышеизложенного, используя процедуру ортогонализации Грама-Шмидта, получаем следующий алгоритм вычисления значений $A_{k,v}$ и β_k:

$$\Psi_0(n_1,n_2)=-1$$
$$\Phi_0=N_R N_C$$
$$A_{k,v}=\frac{1}{\Phi_v}\sum_{n_1=0}^{N_R-1}\sum_{n_2=0}^{N_C-1}\phi_k(n_1,n_2)\Psi_v(n_1,n_2),\ v=\overrightarrow{0,k-1}$$
$$\Psi_k(n_1,n_2)=\phi_k(n_1,n_2)-\sum_{v=0}^{k-1}A_{k,v}\Psi_v(n_1,n_2)$$
$$\Phi_k=\sum_{n_1=0}^{N_R-1}\sum_{n_2=0}^{N_C-1}\Psi_k^2(n_1,n_2)$$
$$\beta_k=\frac{1}{\Phi_k}\sum_{n_1=0}^{N_R-1}\sum_{n_2=0}^{N_C-1}x(n_1,n_2)\Psi_k(n_1,n_2)$$

Теперь для заданного k берется набор выборок случайных чисел размером N с использованием программного генератора случайных чисел. В зависимости от задачи несложно сформировать выборки с различными законами распределения. Из полученного набора выборок в качестве $\phi_k(n_1, n_2)$, принимается та, при которой значение S_k максимально. Затем на основании соотношения (5) определяются коэффициенты

$$C_v=\beta_v-\sum_{k=v+1}^{p}A_{k,v}C_k,\ v=\overrightarrow{p,0}. \qquad (6)$$

Полученные коэффициенты используются в (2) для построения аппроксимационной модели.

IV. Восстановление сигнала с использованием стохастического базиса

Рассмотрим задачу восстановления двумерного сигнала, полученного из исходного по формуле (1) с известной весовой функцией $h_0(n_1, n_2)$. Предлагаемый подход позволяет выполнять восстановление прямоугольной части числового ряда, состоящей из $N_R \times N_C$ последовательных элементов в диапазоне

$$(m_1-N_R+1,\ldots,m_1)\times(m_2-N_C+1,\ldots,m_2).$$

В качестве модели восстановленного сигнала выберем следующую линейную зависимость:

$$\hat{x}_{rec}(n_1,n_2)=\sum_{v=0}^{p}K_v\phi_v(m_1-n_1,m_2-n_2) \qquad (7)$$

Здесь p – порядок модели, (m_1, m_2) – соответственно номера строки и столбца последнего восстанавливаемого значения части числовой матрицы, K_v – коэффициенты модели, $\phi_v(n_1, n_2)$ - стохастические двумерные базисные функции, $n_1=0,\ldots,N_R+N_{R0}-2$, $n_2=0,\ldots,N_C+N_{C0}-2$. Если эту модель подвергнуть воздействию того же прямого фильтра, что и исходный сигнал, то получим:

$$\hat{x}_B(n_1,n_2)=\sum_{r=0}^{N_{R0}-1}\sum_{c=0}^{N_{C0}-1}h_0(r,c)\hat{x}_B(n_1-r,n_2-c)$$

или с учетом (7)

$$\hat{x}_B(n_1,n_2)=\sum_{v=0}^{p}K_v\vartheta_v(m_1-n_1,m_2-n_2), \qquad (8)$$

где:

$$\vartheta_v(n_1,n_2)=\sum_{r=0}^{N_{R0}-1}\sum_{c=0}^{N_{C0}-1}h_0(r,c)\phi_v(n_1+r,n_2+c),$$
$$n_1=\overline{0,N_{R0}+N_R-2},n_2=\overline{0,N_{C0}+N_C-2}$$

Значение параметров модели K_v будем вычислять, исходя из условия минимума квадратической погрешности с весовой функцией $w(n_1,n_2)$:

$$\varepsilon=\sum_{n_1=m_1-N_C+1}^{m_1}\sum_{n_2=m_2-N_R+1}^{m_2}w(m_1-n_1,m_2-n_2)\times$$
$$\times\left(\hat{x}_B(n_1,n_2)-x_B(n_1,n_2)\right)^2=\sum_{n_1=0}^{N_R-1}\sum_{n_2=0}^{N_C-1}w(n_1,n_2)\times \qquad (9)$$
$$\times\left(\hat{x}_B(m_1-n_1,m_2-n_2)-x_B(m_1-n_1,m_2-n_2)\right)^2,$$
$$N_R,N_C\geq p$$

Здесь

$$\hat{x}_B(m_1-n_1,m_2-n_2)=\sum_{v=0}^{p}K_v\vartheta_v(n_1,n_2) \qquad (10)$$

это следует из (8).

В качестве весовой функции $w(n_1,n_2)$ целесообразно выбрать средневзвешенную весовую функцию. Для большинства задач обработки изображений она может быть эквивалентна 1.

По аналогии с выражением (4) представим функции $\phi_k(n_1, n_2)$ через некоторый двумерный ортогональный базис $\Psi_k(n_1, n_2)$ с весовой функцией $w(n_1, n_2)$:

$$\phi_k(n_1,n_2)=\sum_{v=0}^{k}w(n_1,n_2)A_{k,v}\Psi_v(n_1,n_2),$$

Для этого будем использовать процедуру ортогонализации Грама-Шмидта:

$$\begin{cases}\Psi_0(n_1,n_2)=\vartheta_0(n_1,n_2)\\ \Phi_0=\sum_{n_1=0}^{N_R-1}\sum_{n_2=0}^{N_C-1}w(n_1,n_2)\Psi_0^2(n_1,n_2)\end{cases}$$
$$\begin{cases}A_{v,k}=\frac{1}{\Phi_k}\sum_{n_1=0}^{N_R-1}\sum_{n_2=0}^{N_C-1}w(n_1,n_2)\vartheta_v(n_1,n_2)\Psi_k(n_1,n_2)\\ A_{v,v}=1,k=\overline{0,v-1},v=\overline{1,p}\end{cases} \qquad (11)$$
$$\begin{cases}\Psi_v(n_1,n_2)=\vartheta_v(n_1,n_2)-\sum_{k=0}^{v-1}A_{v,k}\Psi_k(n_1,n_2)\\ \Phi_v=\sum_{n_1=0}^{N_R-1}\sum_{n_2=0}^{N_C-1}w(n_1,n_2)\Psi_v^2(n_1,n_2)\end{cases}$$

Из (11) следует, что

$$\vartheta_v(n_1,n_2)=\sum_{k=0}^{v}A_{v,k}\Psi_k(n_1,n_2) \qquad (12)$$

справедливо и такое соотношение

$$\Psi_v(n_1,n_2)=\sum_{q=0}^{v}g_{v,q}\vartheta_q(n_1,n_2)$$

Функции $A_{v,k}$ и $g_{v,q}$ связаны соотношением

$$\sum_{v=k}^{q}g_{q,v}A_{v,k}=\sum_{v=k}^{q}g_{v,k}A_{q,v}=\delta_{k,q} \qquad (13)$$

Отсюда вытекает следующий алгоритм вычисления значений $g_{q,k}$:

$$\begin{cases}g_{0,0}=1\\ g_{q,q}=1\\ g_{q,k}=-\sum_{v=k+1}^{q}g_{q,v}A_{v,k}\\ q=\overline{1,p},k=\overline{0,q-1}\end{cases} \qquad (14)$$

Для вычисления параметров модели подставим $\vartheta_v(n_1, n_2)$ из (12) в (10):

$$\hat{x}_B(m_1-n_1, m_2-n_2) = \sum_{k=0}^{p} \beta_k \Psi_k(n_1, n_2)$$

здесь:

$$\beta_k = \sum_{v=k}^{p} A_{v,k} K_v \qquad (15)$$

Для обеспечения минимума взвешенной квадратической погрешности ε значения β_k должны определяться так

$$\beta_k = \frac{1}{\Phi_k} \sum_{n_1=0}^{N_R-1} \sum_{n_2=0}^{N_C-1} \Psi_k(n_1, n_2) w(0,0) \times \times x_B(m_1-n_1, m_2-n_2) \qquad (16)$$

Из (15) с учетом (13) получаем

$$K_v = \sum_{k=v}^{p} g_{k,v} \beta_k \qquad (17)$$

Подставив в (17) β_k из (16), будем иметь

$$K_v = \sum_{n_1=0}^{N_R-1} \sum_{n_2=0}^{N_C-1} x_B(m_1-n_1, m_2-n_2) w(n_1, n_2) \times \times \sum_{k=v}^{p} \frac{g_{k,v} \Psi_k(n_1, n_2)}{\Phi_k} \qquad (18)$$

Теперь обратимся к соотношению (7). Подставив $n_1=m_1$ и $n_2=m_2$, получим

$$\hat{x}_{rec}(n_1, n_2) = \sum_{v=0}^{p} K_v \phi_v(0,0)$$

И, наконец, с учетом (18) приходим к следующим алгоритмам нахождения значений весовой функции $h(n_1, n_2)$ обратного фильтра и восстановления сигнала:

$$\begin{cases} h(n_1, n_2) = w(n_1, n_2) \sum_{k=0}^{p} \frac{\Psi_k(n_1, n_2)}{\Phi_k} \sum_{v=0}^{k} g_{k,v} \phi_v(0,0) \\ \hat{x}_{rec}(n_1, n_2) = \sum_{r=0}^{N_R-1} \sum_{c=0}^{N_C-1} h(r,c) x_B(m_1-r, m_2-c) \end{cases} \qquad (19)$$

Таким образом, предлагаемый алгоритм сводится к последовательному вычислению значений по формулам (8), (11), (14) и (19).

Отметим, что значение весовой функции обратного фильтра $h(n_1, n_2)$ осуществляется однократно, так как не зависит от значений $x_B(n_1, n_2)$.

При использовании алгоритма (19) для реконструкции смазанного изображения, следует учесть, что весовая функция $w(n_1, n_2)=1$. Из соотношения (9), с учетом (16) находим, что погрешность будет минимальной, если

$$\varepsilon_{min} = \sum_{n_1=m_1-N_R+1}^{m_1} \sum_{n_2=m_2-N_C+1}^{m_2} x_B(n_1, n_2)^2 - \sum_{v=0}^{p} S_v ,$$

где $S_v = \beta(v)^2 \Phi_v$

Таким образом, для заданного v берется набор выборок случайных чисел размером $N_R \times N_C$ с использованием программного генератора случайных чисел. Из полученного набора выборок в качестве $\phi_v(n_1, n_2)$, принимается та, при которой значение S_v максимально.

V. Апробация алгоритма

Для данной работы были выполнены апробации двух алгоритмов: построения аппроксимационной модели изображения и реконструкции смазанного эталонного изображения. Для исследования аппроксимационных свойств стохастических базисных функций, по формуле (2) были построены модели с изменяемыми параметрами: порядком модели P и количеством точек оцениваемой функции N_R и N_C. По полученным результатам была вычислена относительная среднеквадратическая погрешность (ОСП) по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{n_1=0}^{N_R-1} \sum_{n_2=0}^{N_C-1} (\hat{x}(n_1, n_2) - x(n_1, n_2))^2}{\sum_{n_1=0}^{N_R-1} \sum_{n_2=0}^{N_C-1} x(n_1, n_2)^2}},$$

где $x(n_1, n_2)$ – значение пикселя строки эталонного изображения $\hat{x}(n_1, n_2)$ - значение пикселя строки восстановленного изображения, где N_R и N_C – количество пикселей строки и столбца исходного изображения.

Данный способ оценки возможен благодаря наличию и эталонного и восстановленного изображения. Полученная величина показывает степень отклонения результата от исходного изображения. Другие способы оценки качества восстановления изображений приведены, например, в [16].

Значения ОСП аппроксимационной модели изображения по формуле (2) с использованием базисных функций, построенных по алгоритму (3)-(6) представлены в таблице 1.

Полученные результаты показывают, что в случае, когда порядок модели превышает значение параметров изображения N_R и N_C, решение становится неустойчивым. Наименьшую погрешность показали результаты, где порядок модели на единицу меньше N_R и N_C.

ТАБЛИЦА I. ПОГРЕШНОСТЬ АППРОКСИМАЦИИ В СИСТЕМЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ БАЗИСНЫХ ФУНКЦИЙ

N_R=N_C	Порядок модели				
	4	*9*	*14*	*19*	*29*
5	5.89e-7	1.0333	1.5936	2.3752	6.7095
10	0.0079	2.18e-7	0.3304	0.7731	2.4857
15	0.0306	0.0019	3.41e-7	0.2219	2.0952
20	0.0417	0.0074	0.0241	1.52e-7	0.6832
30	0.0606	0.0238	0.0076	0.0018	4.72e-7

Для исследования аппроксимационного алгоритма восстановления смазанного изображения использовался следующий подход. В качестве эталонного изображения было взято изображение, полученное в результате процесса дистанционного зондирования Земли. Данное изображение было переведено в формат с 256-ю градациями серого цвета. Из тестового изображения был взят тестовый фрагмент 480 на 285 пикселей, над которым и проводились эксперименты.

Далее, изображение было обработано фильтром (1) с весовой функцией:

$$h_0(n_1,n_2)=\begin{bmatrix} N & 0.5N & 0 & 0 \\ 0.5N & N & 0.5N & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0.5N & N \end{bmatrix},$$

представляющую собой диагональную квадратную матрицу (N_R=N_C). Здесь N рассчитывается таки образом, что

$$\sum_{r=0}^{N_{R0}-1}\sum_{c=0}^{N_{C0}-1} h_0(r,c)=1$$

Данный характер смаза может получиться в результате рыскания летательного средства.

Значения ОСП восстановления смазанных изображений по алгоритму (8), (11), (14) , (19), приведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА II. ПОГРЕШНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Пор. мод.	Величина смаза				
	5	*6*	*7*	*8*	*10*
без восст.	0.0704	0.0840	0.1164	0.1241	0.1538
4	0.0472	0.0427	0.0562	0.0584	0.07161
5	0.2420	0.0385	0.0499	0.0562	0.06527
7	0.6511	0.1371	0.1441	0.0552	0.06160
9	1.1573	1.0529	1.0638	0.2701	0.05211

Несмотря на то, что в настоящее время единых технических требований к точности реконструкции изображений для задач, решаемых СДЗЗ, не определено, полученные результаты можно косвенно оценить, сравнив их с погрешностью не восстановленного изображения.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были поучены и исследованы алгоритмы, использующие аппроксимационный подход для построения моделей и реконструкции смазанных изображений с использованием стохастических базисных функций. Вопрос применения полиномиальных, экспоненциальных и тригонометрических базисных функций к решению аналогичных задач восстановления сигналов и изображений, рассматривался в работах [15,17]. Приведенные результаты апробации (таблицы 1 и 2) показывают, что использование стохастического базиса позволяет уменьшить погрешность восстановления и аппроксимации, что дает подходу, основанному на стохастических базисных функциях преимущество при решении задач аппроксимации и восстановления данных. Выигрыш в точности в любом случае может быть обеспечен рациональным выбором вида базисных функций и выбором метода оценивания параметров сформированных на их основе моделей. Выбор детерминированных базисных функций производится, как правило, субъективно на основании некоторых неформализованных предположений. В данном случае повышение точности обеспечивают предложенные алгоритмы генерирования последовательностей случайных чисел, образующих ортогональный базис, адаптируемый к статистическим свойствам обрабатываемых исходных данных, в том смысле, что законы распределения сформированных последовательностей соответствуют закону распределения поступающих на обработку данных. При таком подходе выбор базисных функций и, следовательно, структуры модели осуществляется на основе объективных, доступных вычислению характеристиках обрабатываемых данных.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность Игорю Ивановичу Волкову за помощь в подготовке материалов статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Клебанов Я.М., Карсаков А.В., Хонина С.Н., Давыдов А.Н., Поляков К.А. Компенсация аберраций волнового фронта в телескопах космических аппаратов с регулировкой температурного поля телескопа // Компьютерная оптика, 2017, том 41, №1, С. 30-36.

[2] Tokovinin, A. DONUT: measuring optical aberrations from a single extrafocal image / A. Tokovinin, S. Heathcote // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2006. – Vol. 118(846). – Pp. 1165-1175.

[3] Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1979.

[4] Engl H.W., Hanke M., Neubauer A. Regularization of Inverse Problems. – Dordrecht, Kluwer Acad. Publ., 1996. 322p.

[5] Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. М.: Радио и связь. 1986. 304 с.

[6] Сизиков В.С., Римских М.В., Мирджамолов Р.К. Реконструкция смазанных и зашумленных изображений без использования граничных условий // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 5. С. 38-46.

[7] Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений 3-е издание, исправленное и дополненное. — М.: Техносфера, 2012. — 1104 с.

[8] Кузнецов П.К., Семавин В.И., Солодуха А.А. Алгоритм компенсации скорости смаза изображения подстилающей

поверхности, получаемого при наблюдении Земли из космоса // Вестник Сам. ГТУ, 2005. №37. С. 150-157

[9] Егошкин Н.А., Еремеев В.В. Коррекция смаза изображений в системах космического наблюдения земли // Цифровая обработка сигналов. 2010. №4, с. 28-32.

[10] Кузнецов П.К., Мартемьянов Б.В., Мятов Г.Н., Юдаков А.А. Методика вычисления оценок параметров смаза изображений, получаемых целевой аппаратурой КАН типа "Ресурс" // 7-я международная научно-техническая конференция К.Э. Циолковский - 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика" Год издания: 2017 Рязань С. 344-350.

[11] Волков И.И., Золин А.Г. Решение двумерной обратной задачи восстановления смазанного изображения // Вестник СамГТУ, сер. Технические науки. 2013, вып. №39, С. 223-226.

[12] Батищев В.И., Волков И.И., Золин А.Г. Синтез фильтров для восстановления смазанных изображений с использованием методов регуляризации // Проблемы управления и моделирования в сложных системах (ПУМСС-2013): Труды XV Международной конференции, ИПУСС РАН, Самара, 2013, С. 615-618.

[13] Батищев В.И., Золин А.Г., Косарев Д.Н, Романеев А.Е. Аппроксимационный подход к решению обратных задач анализа и интерпретации экспериментальных данных // Вестник СамГТУ, сер. Технические науки. 2006, вып. №40, С. 57-65.

[14] В.И. Батищев, И.И. Волков, А.Г. Золин. Использование стохастического базиса в задачах восстановления сигналов и изображений // Автометрия, 2017, №4, С. 127-134.

[15] Батищев В.И., Волков И.И., Золин А.Г. Синтез цифровых КИХ-фильтров для решения задач восстановления сигналов с использованием критерия моментов // Вестник СамГТУ, сер. Технические науки. 2012, вып. №36, С. 98-105.

[16] Avcibas I., Sankur B., Sayood K. Statistical evaluating of image quality measures // Journal of Electronic Imaging. – April 2002. – Vol.11, № 2. – Pp. 206-223.

[17] Батищев В.И., Волков И.И., Золин А.Г. Аппроксимационный подход к решению обратных задач восстановления сигналов в базисе экспоненциальных функций // Тр. XVI Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах»/ Под ред.: акад. Е.А. Федосова, акад. Н.А. Кузнецова, проф. В.А. Виттиха. Самара: ООО «Оформ», 2014. С. 678-681.

Моделирование, анализ и улучшение работы входного очистительного устройства газотурбинной установки для перекачивания газа

Батурин О.В.
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов
Самарский университет
Самара, Россия
oleg.v.baturin@gmail.com

Кривцов А.В.
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов
Самарский университет
Самара, Россия
krivcov.alexander@ssau.ru

Колмакова Д.А.
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов
Самарский университет
Самара, Россия
kolmakova.daria@gmail.com

Мязитов А.А.
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов
Самарский университет
Самара, Россия
alesha2456@yandex.ru

***Abstract*—The paper presents the results of numerical simulation of air flow through a modernized variant of the inlet filter unit (IFU) of the gas compressor unit GPA-Ts-16. A feature of the IFU design is that to reduce the load on the filter unit, it is proposed to be as compact as possible, which determines its complex shape. The goal of the study is to study the hydraulic losses and to develop the measures to reduce them, since it is found that every 100 Pa of losses in the inlet unit increases the consumption of fuel gas by 2.5 kg/h or reduces the engine power by 10.5 kW. Calculations of hydraulic losses in IFU are carried out for cases of absence or presence of wind with a velocity from 0 to 35 m/s, blowing from 5 main directions (0°, 45°, 90°, 135°, 180°). Studies are also carried out on the effect of the weather shield shape, presence of baffles under it, and the rack in the shaft on the hydraulic losses. As a result of the research, recommendations are provided for designing (changing the shape) of the inlet filter unit that eventually allow to propose a design that will reduce the hydraulic losses in IFU by 15% relative to the originally suggested variant.**

Ключевые слова —газоперекачивающие компрессорные станции, газотурбинный привод, входное очистительное устройство, гидравлические потери

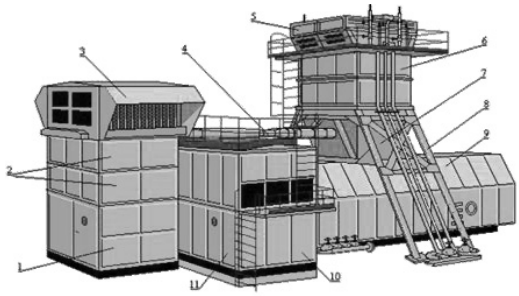
I. Введение

Российская корпорация ПАО «Газпром» сегодня является одной из крупнейших энергетических компаний мира. Ее основная деятельность направлена на геологоразведку, добычу, транспортировку, хранение и реализацию газа, газового конденсата и нефти, а также производство и сбыт электро- и теплоэнергии. ПАО «Газпром» обеспечивает непрерывный цикл поставки газа от месторождения до потребителя [1, 2].

Особенность газовой промышленности Российской федерации заключается в том, что основные месторождения ее газа находятся за Уралом, а потребители газа находятся в Европе и Китае. Такое географическое расположение обуславливает наличие большой и разветвленной газотранспортной системы, через которую природный газ поставляется от месторождения к потребителю.

Важным элементом газотранспортной системы является газоперекачивающие компрессорные станции, которые повышают давление природного газа в газопроводе и сообщают ему необходимый для движения импульс. Компрессорные станции располагаются равномерно вдоль всего магистрального трубопровода через каждые 100…150км. В 2013 году в ПАО «Газпром» было 215 линейных компрессорных станций, 6 комплексов по переработке газов и 25 подземных газовых хранилищ, также использующих компрессорные станции. 87,2% компрессорных станций имеют газотурбинный привод (всего около 3400 газотурбинных двигателей (ГТД)) [2].

Среди парка ГТУ ПАО «Газпром» свыше 18% занимают двигатели НК-16СТ мощностью 16МВт, разработанные в ПАО «Кузнецов» в конце 1970х годов на базе авиационного двигателя НК-8 и работающие в составе агрегата ГПА-Ц-16 (рис. 1).



1 – поворотный участок входной шахты; 2 – входной шумоглушитель; 3 – воздухоочистительное устройство; 4 – система подогрева циклового воздуха; 5 – утилизатор тепла; 6 – шумоглушители выхлопа; 7 – диффузор; 8 – опора выхлопной части; 9 – отсек двигателя 10 – блок агрегатов маслосистемы

Рис. 1. Газоперекачивающий агрегат ГПА-Ц-16

ГПА-Ц-16 показали хорошие эксплуатационные характеристики и высокую надежность. По этой причине значительную часть ГПА, выработавших ресурс, не заменяют на современные, а ремонтируют, совмещая замену выработавших ресурс агрегатов с модернизацией, направленной на снижение затрат (повышение эффективности) и устранение выявленных в эксплуатации недостатков. В ходе модернизации среди прочих элементов часто происходит модернизация входного устройства ГПА, поскольку штатное обеспечивает низкий уровень фильтрации и быстро забивается в снежную погоду.

II. Исследуемый объект

Входное очистительное устройство (ВОУ) промышленного ГТУ предназначено для очистки от пыли и других механических включений циклового воздуха, поступающего из атмосферы на вход в двигатель во всех возможных режимах эксплуатации. ВОУ, несмотря на кажущуюся (по сравнению с двигателем) простоту, являет-

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

ся важным элементом ГПА, в котором происходят сложные процессы. ВОУ должно надежно очистить входящий в ГТУ воздух от посторонних включений во избежание критических повреждений элементов проточной части посторонними предметами, попавшими туда. При этом потери давления должны быть минимальны для повышения экономичности двигателя, и предотвращения помпажа компрессора. Входное устройство должно исключать забивание фильтрующих элементов снегом и льдом во всех условиях эксплуатации. Ошибки в создании ВОУ могут существенно снизить эксплуатационные свойства всей газотурбинной станции, однако, этот узел обычно относится к второстепенным элементам двигателя, и его совершенству уделяется не столь пристальное внимание, как, например, компрессору.

Одной из фирм, занимающихся поставкой оборудования для модернизируемых ГПА-Ц-16, является ООО «Волга-Энергогаз», офис которой располагается в Самаре (Россия) [3]. Инженеры этой фирмы предложили несколько вариантов исполнения ВОУ ГПА-Ц-16 и обратились на кафедру теории двигателей летательных аппаратов Самарского национального исследовательского университета с просьбой оценить уровень гидравлических потерь в них, и помочь в выборе окончательного варианта.

Предлагаемая ООО «Волга-Энергогаз» конструкция ВОУ состоит из погодного козырька с входом с нижней стороны, блока фильтров с двухступенчатыми кассетными фильтрами Folter с классом очистки G4/F8 [4], диффузора, вертикальной шахты с панелями шумоглушения, поворотного канала, входного канала двигателя с лемнискатой и трубопроводов противообледенительной системы (рис. 2). Предложенные заказчиком варианты ВОУ отличались формой погодного козырька (с прямыми стенками и со скруглениями) и наличием/отсутствием перегородок во входном сечении под ним и скругленной эстакады в поворотном канале.

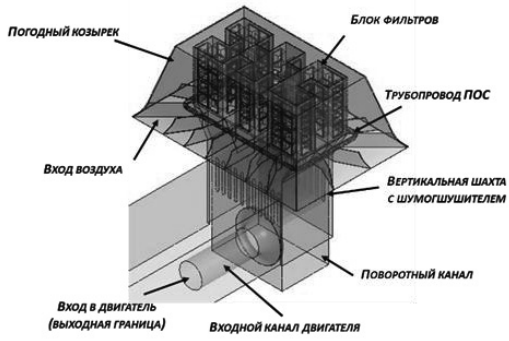


Рис. 2. Предложенная конструкция ВОУ

Вертикальная шахта, поворотный канал и входной канал двигателя с лемнискатой берутся от существующей шахты ГПА-Ц-16. Остальные элементы разрабатываются и будут изготовлены вновь.

Основной идеей модернизации является замена неудовлетворительно показавшими себя в эксплуатации инерционных фильтров на двухступенчатый кассетный фильтр Folter с классом очистки G4/F8 квадратной формы с размерами 592х592мм. Чистый фильтр данного типа обладает гидравлическим сопротивлением 75Па. Максимальное падение давления на загрязненном фильтре достигает, по заверению производителя, 450Па [4].

Потребное число фильтров (124 штуки) было выбрано исходя из номинального расхода воздуха через двигатель 102кг/с с учетом 15% запаса (т.е. исходя из расхода 117кг/с). В первоначальном варианте конструкции было принято, что по высоте блока фильтров должно быть 4 фильтра. Это, с учетом необходимого числа фильтров, потребовало для их размещения увеличивать боковую площадь блока фильтров за счет усложнения ее формы (рис. 3). При этом проектировщики стремились для снижения нагрузки на шахту сохранить минимальные размеры блока фильтров.

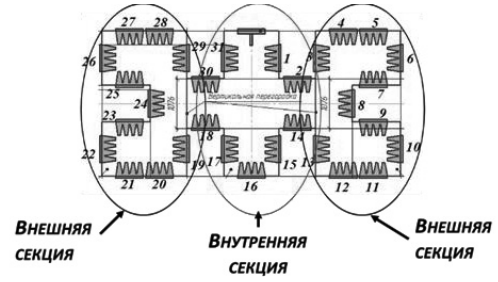


Рис. 3. Принятая форма блока фильтров (в плане) с принятой их нумерацией

III. Влияние гидравлических потерь во входном устройстве на эффективность двигателя ГПА

На первом этапе с помощью термодинамической модели двигателя НК-16СТ, созданной и верифицированной по данным, предоставленным ПАО "Кузнецов" было проведено исследование влияния гидравлического совершенства ВОУ данного двигателя на расход топливного в случае сохранения постоянной мощности 16МВт (рис. 4).

Полученные результаты показывают, что увеличение гидравлических потерь в ВОУ приводит к линейному росту расхода топливного газа и снижению мощности. Каждые 100Па потерь во входном устройстве увеличивают расход топливного газа на 2,5кг/час или снижают мощность двигателя на 10,5кВт.

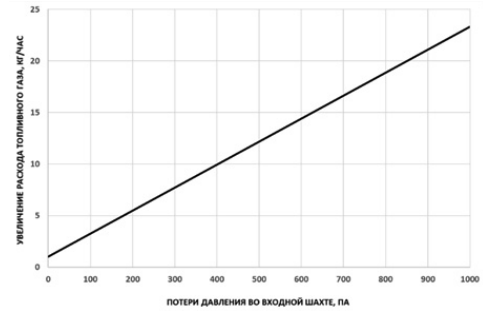


Рис. 4. Увеличение расхода топливного газа двигателя НК-16СТ в зависимости от гидравлических потерь во входном устройстве при условии выработки постоянной мощности

IV. Описание расчетной модели

Расчетная модель для определения гидравлических потерь в ВОУ ГПА-Ц-16 была создана в программных комплексах NX и Ansys CFX в соответствии с ее чертежами, предоставленным ООО "Волга-Энергогаз".

Расчетная модель включает в себя часть атмосферы вокруг входной шахты и проточную часть ВОУ с имитатором блока двигателя (рис. 5). Моделирование окружающей атмосферы необходимо для корректной имитации полей параметров на входе в шахту, в том числе с учетом изменения направления и скорости (силы) ветра. Имитатор блока двигателя применен для учета влияния блоков станции при моделировании ветров, дующих со стороны двигателя. Расчетная модель учитывала полную геометрию каналов, наличие фильтров, панелей шумоглушения, эстакады в переходнике (при наличии), падение давления в фильтрующих элементах, кольцевого коллектора ПОС и т.п. Наличие площадки обслуживания по периметру фильтров не учитывалось. Фильтры моделировались упрощенно (см. ниже).

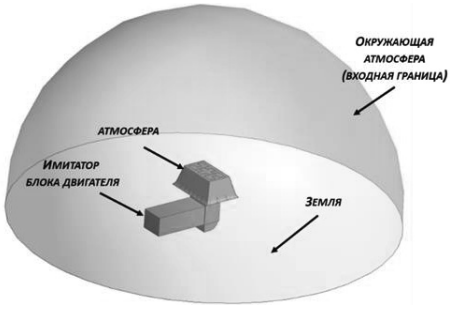


Рис. 5. Внешний вид созданной расчетной модели входной шахты ГПА-16-Ц

При численном моделировании рабочего процесса во входной шахте были применены следующие граничные условия:

- Входное граничное условие было применено на границе рассматриваемого участка атмосферы. Там задавалась температура воздуха (в САУ) $T_н$=288К.

- Выходная граница расположена на входе в двигатель. На ней задавался массовый расход через двигатель.

- Поверхность земли – непроницаемая стенка.

В ходе расчета было принято, что в течение «численного эксперимента» режим работы двигателя (массовый расход через него) и атмосферное давление не изменялись. Также было принято, что массовый расход воздуха через двигатель идентичен для всех рассмотренных условий работы.

Из-за того, что точная геометрия и характеристики проницаемости материалов фильтров не известны, они моделировались следующим образом. Геометрия фильтра упрощалась, и представляла собой параллелепипед. На него налагалось условие (интерфейс), согласно которому поток, попадающий на входную поверхность 1, передается на выходную поверхность 2 таким образом, чтобы давление на поверхности 2 было меньше чем на 1 на величину падения давления в фильтре Δp. Таким образом, в созданной расчетной модели, на всех фильтрах, независимо от внешних условий (скорости и направления ветра), потери полного давления на фильтрах считаются одинаковыми (фильтры загрязнены равномерно).

В качестве рабочего тела при моделировании использовался идеальный газ со свойствами воздуха с переменной теплоёмкостью и вязкостью. При расчете использовалась модель турбулентности к-ε с масштабируемой функцией стенки.

Расчетная модель разбивалась сеткой конечных объемов (рис. 6). В ее основе лежат тетраэдральные элементы в сочетании с призматическим слоем на поверхности обтекаемых стенок. Общее число конечных объемов - 11 млн. Число конечных объемов было выбрано по итогам проведенного изучения сеточной сходимости.

Рис. 6. Сетка конечных объемов созданной расчетной модели

В ходе исследования было рассмотрено 4 варианта исполнения конструкции входной шахты (таблица I).

ТАБЛИЦА I. Схема различий рассмотренных вариантов

Вариант	1	2	3	4
Скругление на входе в погодный козырек	+	-	+	+
Перегородки на входе	+	-	+	-
Эстакада в поворотном канале	+	+	-	+

Для упрощения анализа полученных результатов, осредненные значения параметров потока и поля распределения параметров (скорости и давления) в проточной части снимались в 7 контрольных сечениях вдоль тракта (рис. 7).

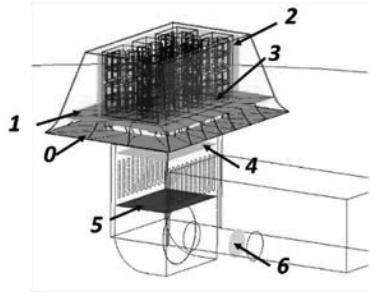


Рис. 7. Рассмотренные контрольные сечения ВОУ

V. Исследование рабочего процесса ВОУ в безветренную погоду

Обобщенные данные о ожидаемой величине потерь полного давления в рассмотренных вариантах ВОУ без учета влияния ветра (скорость ветра 0м/с) приведены на рис. 8. Потери считались как алгебраическая разница между осредненными по площади значениями полного давления в контрольных сечениях. Распределение потерь полного давления между участками проточной части ВОУ показано на рис. 9.

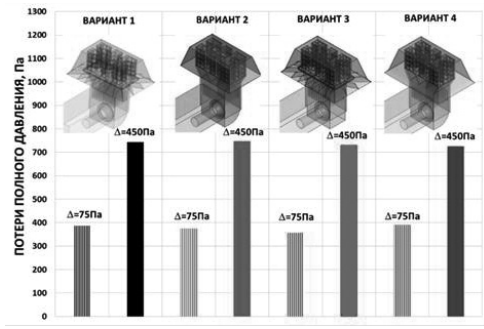


Рис. 8. Суммарные потери полного давления в ВОУ для различных модификаций базовой конструкции в безветренную погоду

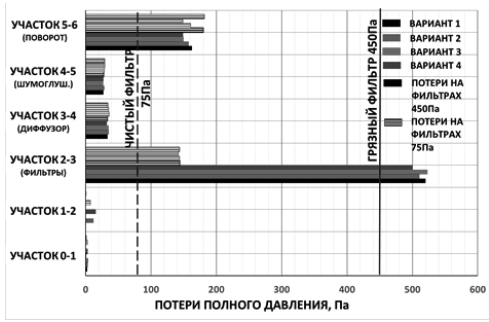


Рис. 9. Потери полного давления в элементах ВОУ для различных модификаций базовой конструкции в безветренную погоду

Видно, что в безветренную погоду все рассмотренные варианты показывают близкие гидравлические характеристики (потери полного давления). Разница между четырьмя рассмотренными вариантами составляет не более 30Па. В безветренную погоду потери полного давления меняются от 380 (при чистых фильтрах) до 750Па (при загрязненных фильтрах).

Суммарные гидравлические потери в предложенном варианте проточной части ВОУ в безветренную погоду для всех рассматриваемых вариантов исполнения мало отличаются друг от друга и составляют приблизительно 310Па (без учета потерь в фильтрах).

Как видно из полученных результатов, при принятых допущениях (равномерное загрязнение фильтров), физическая картина происходящая при «чистых» (Δp=75Па) и «грязных» (Δp=450Па) идентична. Разница заключается лишь количественной оценке гидравлических потерь (расчетные модели для оценки потерь при чистых и загрязненных фильтрах идентичны, за исключением величины падения давления на интерфейсах, имитирующих работу фильтра (75Па для чистых и 450Па – для грязных)).По этой причине, в дальнейшем все расчетные модели рассчитываются только с «грязными» фильтрами (Δp=450Па), так как этот вариант является предельным с точки зрения потерь.

Основные потери полного давления в шахте имеют место при прохождении рабочего тела через фильтры (участок 2-3) и при повороте потока в переходнике и движении в канале до входа в двигатель (участок 5-6). На первых двух (0-2) участках при нулевом ветре потери полного давления незначительны. Потери в диффузоре (участок 3-4) и в блоке шумоглушения (участок 4-5) относительно невелики (не превышают 40Па) и не зависят от конструкции шахты.

Следует отметить, что потери в блоке фильтров во многом определяются потерями на фильтрующем элементе. Дополнительные потери в этом элементе не превышают 70Па.

Причина повышенных потерь при повороте потока в поворотном канале и входном канале ГТД заключается в том, что при течении рабочего тела справа и слева от входа в двигатель возникают зоны вихреобразования, а также большого уровня скоростей (до 70м/с) во входном канале двигателя.

Вихрь в поворотном канале формируется следующим образом. Внутренняя часть блока фильтров перегородками делится на три секции (две внешних и внутреннюю) (рис. 10). Воздух, проходящий через фильтры внутренней секции, направляется вертикально вниз непосредственно на вход двигателя и сразу засасывается в него (рис. 10). Лишь малая часть проходит мимо и взаимодействует с боковыми вихрями или попадает в пространство между лемнискатой и передней стенкой блока двигателя.

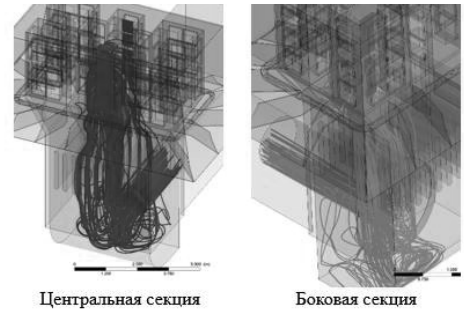


Рис. 10.Пример течения воздуха через различные секции блока фильтров

На рисунке 11 изображена круговая диаграмма распределения расходов воздуха между вертикальными рядами фильтров. Данный график выполняется в полярной системе координат. В ней вдоль радиуса откладывается суммарное значение массового расхода через вертикальный ряд фильтров в кг/с. Положительный знак указывает на то, что рабочее тело втекает внутрь блока фильтров, отрицательный – на то, что вытекает. Угловая позиция соответствует номеру ряда фильтра согласно рисунку 5 (указан на периферии круга).

Рисунок 11 показывает распределение расходов рабочего тела между вертикальными рядами фильтров для всех 4 рассмотренных вариантов исполнения ВОУ (без учета ветра) при максимальных и минимальных потерях давления на фильтрах. Таким образом в безветренную погоду 4 вертикальных ряда фильтров не работают (рабочее тело из них вытекает наружу) и еще 4 ряда работают с пониженным расходом.

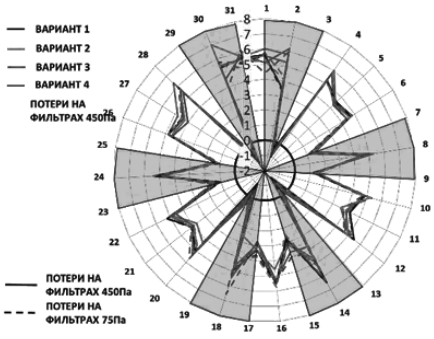


Рис. 11.Распределение расходов рабочего тела между фильтрами (номера соответствуют рис. 5) (закрашенные области соответствуют фильтрам, находящимся в «карманах»)

Анализ структуры течения рассмотренных вариантов ВОУ показывает, что в безветренную погоду воздух попадает на вход в шахту со всех направлений, равномерно заполняя все входное сечение.

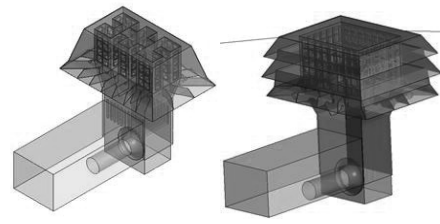
Если сравнивать структуру потока в вариантах без скругления стенок погодного козырька (вариант 2) и с ним (вариант 4), то можно прийти к выводу о том, что в варианте без скругления на входной кромке погодного козырька (отмечено на рисунке) образуется крупный отрыв потока, который снижает эффективное проходное сечение и увеличивает скорость потока на входе в фильтры. Таким образом, формирование скругления на входе в погодный козырек формирует на входное более благоприятную структуру потока, уменьшая скорость на входе и ее неравномерность. В целом скругление погодного козырька в безветренную погоду уменьшает гидравлические потери на относительно малую величину.

VI. Рекомендации по изменению конструкции

На основании полученных рекомендаций было разработано 2 варианта исполнения ВОУ.

Вариант 5 – в целом идентичен варианту 3, но отличается измененными размерами диффузора, блока фильтров и погодного козырька, а также упрощением их формы (рис. 12).

Вариант 6 – вариант, который характеризуется блоком фильтров прямоугольной формы (рис. 13), в котором расположено (8 (ширина)*6 (длина)*5 (высота) фильтров, отсутствием панелей шумоглушения и погодным козырьком с дополнительными окнами в боковых стенках.



Вариант 5 Вариант 6

Рис. 12.Модернизированные варианты ВОУ

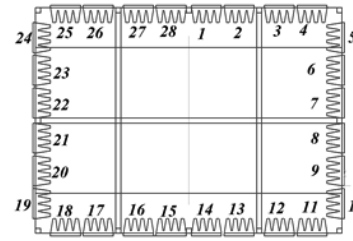


Рис. 13.Принятая нумерация фильтров варианта ВОУ №6

Для обоих модернизированных вариантов были созданы расчетные модели, аналогичные описанным ранее. Проведённые расчеты показали, что вариант №5 показывая гидравлические характеристики близкие к характеристикам варианта №3. Величина потерь давления возросла на 40Па (на 5%)

Вариант №6 обеспечивает достижение минимальных потерь среди всех рассмотренных вариантов исполнения ВОУ. При отсутствии ветра ожидаемое суммарное гидравлическое сопротивление в модернизированном ВОУ составляют: начальное – 260Па (с учётом сопротивления чистых фильтров 75Па), конечное – 635Па (с учётом сопротивления грязных фильтров 450Па). Это на 107Па (на 15%) меньше, чем у исходного варианта конструкции (№1). Причиной улучшения является отсутствие пластин шумоглушения, более низкий уровень потерь на входе и большая равномерность потока на входе в фильтрующие элементы.

Средняя скорость на входе в блок фильтров варианта №6 в безветренную погоду составляет 1,78м/с (для сравнения в исходном варианте конструкции (№1) - 3,01м/с), на входе в погодный козырек 1,52м/с (в варианте №1 – 2,09м/с). Прим. Рекомендуемая производителем фильтров скорость натекания на фильтрующий элемент – не более 2,5м/с.

В безветренную погоду распределение расходов рабочего тела через вертикальные ряды фильтров варианта ВОУ №6 близко к равномерному (4,25±0,25 кг/с). В отличие от рассмотренных ранее вариантов, в варианте ВОУ №6 в безветренных условиях нет секций с существенно отличающимся уровнем массового расхода рабочего тела, или через которые рабочее тело вытекает наружу (рис. 14).

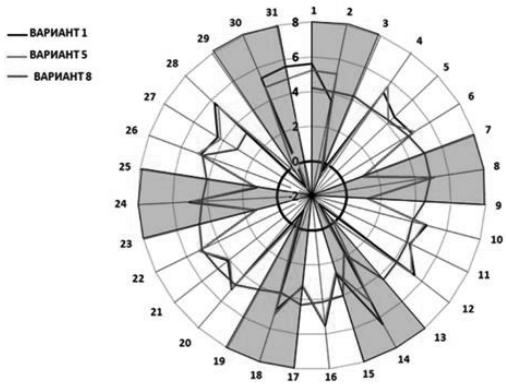


Рис. 14.Распределение расходов рабочего тела между фильтрами (номера для вариантов №1-5 – рис. 5, №8- рис. 24 (розовые области соответствуют фильтрам, находящимся в «карманах» вариантов 1- 5)

Вариант №6 в безветренную погоду обеспечивает существенно более равномерную «загрузку» фильтров, что снижает уровень скоростей потока, набегающего на них. Также следует отметить меньшую разницу в распределении скоростей вдоль высоты блока фильтров, что говорит о том, вариант №6 (рис. 15) обеспечивает большие расходы через верхние фильтры и, соответственно, снижение расходов через нижние. Указанные факты свидетельствуют о более благоприятных условиях работы фильтрующих элементов в варианте №6.

Рис. 15.Структура течения через входные окна погодного козырька варианта ВОУ №6 в безветренную погоду

Для уменьшения интенсивности вихревых течений и упорядочивания структуры потока под погодным козырьком следует оптимизировать его форму и установить внутренние перегородки аналогичные перегородкам вблизи нижней кромки погодного козырька. Для выбора формы и положения данных перегородок в том числе и с учетом из влияния на трудоемкость технического обслуживания ВОУ следует провести дополнительное исследование.

VII. Заключение

В проведенной работе было проведено численное моделирование течения в различных вариантах модернизированного входного устройства газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16 с двухступенчатым кассетным фильтром.

В результате были выявлены основные источники потерь энергии и сформулированы рекомендации по проектированию входных шахт подобного типа.

Опираясь на полученный опыт, была найдена конфигурация ВОУ, которая обеспечивает снижение гидравлических потерь относительно исходного варианта на 15%. Изменение конструкции ВОУ позволит сэкономить 2,67кг или 3,42м^3 в час топливного газа для каждого двигателя.

При этом полученная конструкция имеет резервы совершенствования за счет упорядочивания потока под погодным козырьком с помощью перегородок.

Проведенная работа должна быть продолжена в сторону анализа работы противообледенительной системы ВОУ и обеспечения ее эффективной работы во всем диапазоне параметров эксплуатации.

Список литературы

[1] ГАЗПРОМ (http://www.gazprom.ru/).

[2] Забелин Н.А., Лыков А.В., Рассохин В.А., Оценка располагаемой тепловой мощности уходящих газов ГПА единой системы газоснабжения России // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2013. № 4-1(183). -с.136-144.

[3] WEG (https://www.weg.net/).

[4] ФОЛТЕР (http://www.folter.ru/catalog/vozdushnye-filtry-folter-dlya-gazovyh-turbin/).

Предсказание удельного сопротивления стали для моделирования электротермических процессов

Бондарь А.С.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
bonda3005@gmail.com

Стрельцова О.В.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
streltsova-olga1995@mail.ru

Чмиленко Ф.В.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
tchfv@mail.ru

Бондаренко Д.Н.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
bdn62@mail.ru

***Abstract* — In this paper, an analysis of the data approximation methods was carried out; as a result, the method of approximation using neural networks was chosen. A neural network was created to predict the resistivity of the steel. For the created neural network, the training method was chosen. After training, the results were analyzed. .**

Ключевые слова — удельное сопротивление, свойства сталей, нейронные сети, предсказание свойств сталей.

I. Введение

Современные индукционные установки для металлургии и машиностроения представляют собой сложные технические объекты, в которых протекают физические явления и процессы различной природы (электромагнитные, тепловые, механические и структурные). Если не вводить существенных упрощений, то проектирование таких установок на современном уровне возможно только с помощью компьютерного моделирования. Для повышения точности моделирования следует учитывать наиболее полным образом теплофизические, электромагнитные и механические свойства нагреваемого объекта.

Необходимые свойства могут быть найдены в справочной литературе или рассчитаны с помощью специализированных программ, таких как JMatPro, базирующихся на термодинамической базе данных и разнообразных законах, в том числе и эмпирических. К сожалению, не всегда справочники располагают всей необходимой информацией для моделирования, а специализированные программы для расчета свойств материалов, на современном этапе своего развития, часто имеют относительно большую погрешность.

Одним из способов решения данной проблемы является аппроксимация уже существующих экспериментальных данных с помощью формул регрессии. Однако они имеют ряд недостатков, таких как, плохой учет нелинейных зависимостей и влияния друг на друга различных элементов химического состава. Кроме того, формулы регрессии, как правило, имеют существенное ограничение на «рабочий» интервал температуры и имеют приемлемую точность в небольшом диапазоне изменения элементов химического состава. Искусственные нейронные сети лишены этих недостатков, давно используются для задач регрессии и представляют большие возможности для решения задачи аппроксимации свойств материалов [1]. В связи с вышесказанным, в данной работе была поставлена задача – оценить возможности искусственных нейронных сетей, а именно их обобщающие способности для аппроксимации удельного сопротивления сталей. В работе [2] приводятся успешные результаты аппроксимации удельного сопротивления от химического состава при комнатной температуре. Однако для индукционного нагрева характерно изменение нагреваемого образца в большом диапазоне температуры, поэтому была собрана база данных и разработана искусственная нейронная сеть для аппроксимации зависимости удельного сопротивления не только от химического состава, но и от температуры.

II. Подготовка базы данных

Для адекватной работы нейронных сетей требуется достаточно большая база экспериментальных данных. В процессе обучения она, как правило, разбивается на три части:

1) обучающая, основная часть базы данных, на которой происходит обучение нейронной сети;
2) верификационная, косвенно используется в обучении, применяется для настройки обучающих алгоритмов в методе «ранней остановки»;
3) тестирующая, не используется в обучении и предназначена для окончательной проверки обученной нейронной сети.

Стоит отметить, что создание больших коллекций обучающих данных, как это ни странно, сопряжено с достаточными трудностями. Специализированные справочники и базы данных не всегда располагают полной информацией о конкретном материале, его химическом составе и истории его обработки. В то же время проведение физических экспериментов достаточно дорого, и их проводят не так часто. Кроме того, в некоторых справочниках или электронных базах часть экспериментальных данных утеряна или в них искусственно добавлен «шум». Часто “зашумление” данных происходит из-за того, что вместо точного химического состава образца эксперимента указывается диапазон химического состава наиболее подходящей марки стали. В связи с этим, информация из справочников в которых имеется избыточный «шум» [3], [4] использовались только для создания тестирующей

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

базы данных, а справочники с более точной информацией [5]-[8] для создания обучающей базы данных. В результате были созданы два множества: для обучения (241 марка стали / 2721 значение удельного сопротивления в зависимости от температуры) и для тестирования (50 / 451). В таблице I представлены статистические данные обучающего множества.

ТАБЛИЦА I. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	СКО
C, %	0	2.15	0.234	0.277
Mn, %	0	24	1.397	2.753
Ni, %	0	63	5.119	8.940
Mo, %	0	6.5	0.483	0.937
V, %	0	3	0.082	0.269
Cr, %	0	30.4	7.389	8.601
Cu, %	0	2	0.079	0.232
Al, %	0	4.5	0.057	0.264
Nb, %	0	3	0.045	0.238
Si, %	0	3.5	0.417	0.455
W, %	0	18.5	0.429	2.373
B, %	0	4.2	0.015	0.229
Ti, %	0	1.2	0.034	0.125
Co, %	0	46.6	0.302	3.0267
T, °C	0	1350	411.982	314.830
ρ·100, Ом/м²	9.5	141	76.576	33.176

III. ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Как видно из объема обучающей базы данных, в задачах предсказания свойств материалов невозможно говорить о «big data». В таком случае очень расточительно выделять часть данных на верификацию (эта информация только косвенно влияет на обучение). Сталкиваясь с этой проблемой, иногда пытаются уменьшить верификационное или тестовое множество, что идет в ущерб качеству обучения нейронной сети и, как правило, приводит к ее переобучению (потеря обобщающей способности нейронной сети). В этом случае хорошая точность прогнозирования результатов получается только при исходных данных близких к обучающим.

Подходить к проблеме небольшого объема экспериментальных данных, можно двумя разными способами, назовем их: математическим и инженерным. В первом случае используются более сложные математические методы, однако экономятся вычислительные ресурсы, а во втором, как правило, применяются интуитивно понятные методы, но более дорогостоящие с точки зрения вычислений. Здесь следует отметить, что тренд развития вычислительной техники в направлении параллельных вычислений сглаживают этот недостаток инженерного подхода.

Математические методы на основе Байесовского подхода для задач регрессии были хорошо развиты и апробированы в работах D. J. C. MacKay [9], [10]. В данной работе авторы придерживаются инженерного подхода. Для того чтобы задействовать полностью пул обучающих данных применялся метод кросс-валидации. Суть метода заключается в том, что предварительно данные перемешиваются случайным образом, а затем разбиваются на n блоков. В нашем случае хороший результат показывает разбиение на 10 блоков, в которых 9 блоков являются обучающими данными, а один блок служит валидационным набором для предотвращения переобучения с помощью «ранней остановки». Каждый раз, выбирая новый валидационный блок, необходимо произвести обучение новой сети. Таким образом, надо обучить 10 нейронных сетей, результат которых потом усредняется (рис. 1). Уменьшение количества блоков в процессе кросс-валидации может привести к увеличению смещения (рис. 2).

Рис. 1. Принцип кросс-валидации

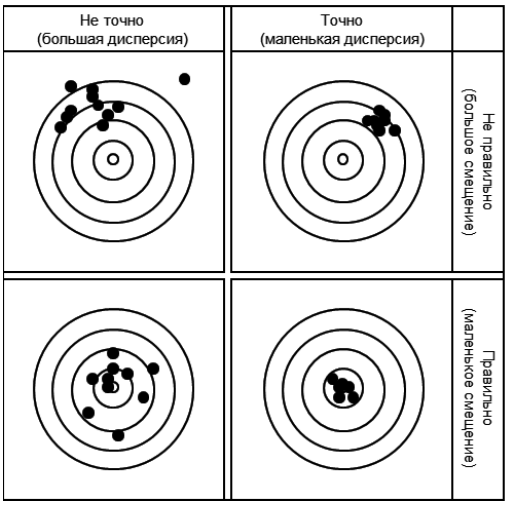


Рис. 2. Пониятия смещения и дисперсии

Другие варианты кросс-валидации, основанные на методе Монте-Карло или Бутстреп (bootstrap) с возвращением элементов, как правило, дают предсказание с большей дисперсией (рис. 2).

Существует также вариант пакетной кросс-валидации, когда n-блочная кросс-валидация выполняется несколько раз (для каждой новой пакетной итерации блоки разбиваются случайным образом). Такой метод позволяет значительно уменьшить дисперсию предсказываемых результатов. Однако в данной работе авторы применяют усредненную кросс-вадидацию по моделям с разным числом нейронов в скрытом слое, что

напоминает усреднение в Байесовском подходе D. J. C. MacKay [10]. Только в данном случае усреднение происходит по довольно большому количеству моделей, число которых может превышать несколько десятков. С одной стороны это может показаться недостатком, но с другой стороны, большое количество моделей позволяет вычислить 95% доверительный интервал на основе t-распределения Стьюдента для каждой точки предсказания.

Узкий доверительный интервал не говорит о точности, а только о стабильности предсказания, в то время как широкий доверительный интервал указывает на то, что оценка неточна. На неточность оценки может повлиять «зашумленность данных», недостаточное количество экспериментальных данных для некоторых сталей, экстраполяция данных (химический состав тестируемого образца выходит за диапазон обучающих данных), а также очень маленькая или очень большая емкость, входящих в пул моделей. приводящая к недообучению или переобучению.

В работах [11] - [14] для задач предсказания теплопроводности от температуры и химического состава успешно применялись нейронные сети с одним скрытым слоем. Так как зависимость удельного сопротивления сталей от температуры и химического состава (рис. 3) по сложности не превышает соответствующую зависимость теплопроводности, то в данной работе основное внимание уделялось обучению сетей с одним скрытым слоем. Количество нейронов варьировалось от 5 до 15 (рис. 4).

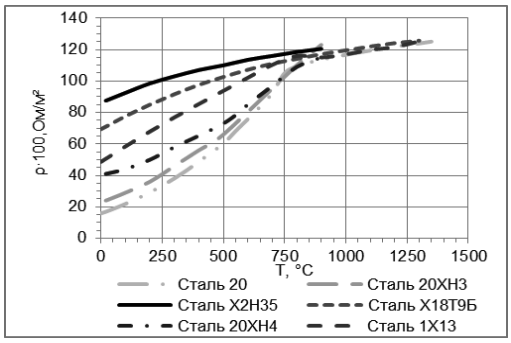


Рис. 3. Удельное электросопротивление стали

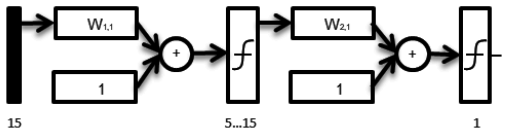


Рис. 4. Структура рассматриваемых нейронных сетей

Входные и выходные признаки нормировались, но, как показывают расчеты, простое масштабирование дает результаты не хуже.

В качестве функции активации для сетей с небольшим количеством скрытых слоев хорошо себя зарекомендовала биполярная сигмоида:

$$f(x) = -0.5 + \frac{1}{1+e^{-x}}.$$

Для выходного слоя, в отличие от работы [12], вместо линейного элемента также используется биполярная сигмоида, только с ограничением выходного диапазона [-0,5;0,5] на 5%, для того, чтобы уменьшить влияние зоны насыщения сигмоидальной функции.

Для оценки моделей в данной работе использовался критерий детерминации R^2 для усредненных результатов кросс-валидации на тестовом множестве. Такой подход позволяет оценить между собой результаты кросс-валидации с разными количествами скрытых нейронов и отбросить из результирующей модели недообученные или переобученные кросс-валидационные модели. Отдельные модели внутри пула одной кросс-валидации не оценивались, чтобы минимизировать влияние тестового множества на обобщающую способность результирующей модели.

IV. Полученные результаты

Оценка предсказания усредненной модели на обучающем множестве представлена на рис. 5. Большая часть значений, полученных нейронной сетью, хорошо совпадает со значениями из обучающего множества. Но имеются также «выбросы» значений. Их причиной может быть маленькая емкость модели, недостаточное количество данных для определенных композиций химических элементов, игнорирование истории термообработки или некорректные экспериментальные данные. К сожалению, последний фактор встречается часто и вызван не ошибками измерений (они относительно других физических свойств для удельного сопротивления малы), а ошибками при копировании данных из одних справочников в другие на протяжении последних 60 лет. Изучая причины «выбросов» предсказания для обучающего множества были найдены опечатки во многих используемых источниках [3]-[7].

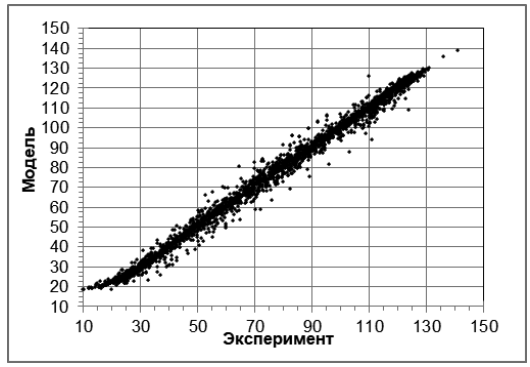


Рис. 5. Оценка предсказания для обучающего множества

Примером «плохих» данных может служить сталь 20CrMoV13-5 [7] из обучающего множества (рис. 6). При хорошем качественном совпадении, она имеет очень большую ошибку для аппроксимации обучающего множества. Однако для этой стали результаты аппроксимации нейронными сетями для теплопроводности также дают большую ошибку, в этом

случае имеет смысл предположить, что причиной плохого совпадения является предыстория термообработки (она для используемых данных неизвестна). Поэтому данную сталь лучше исключить из обучающего множества.

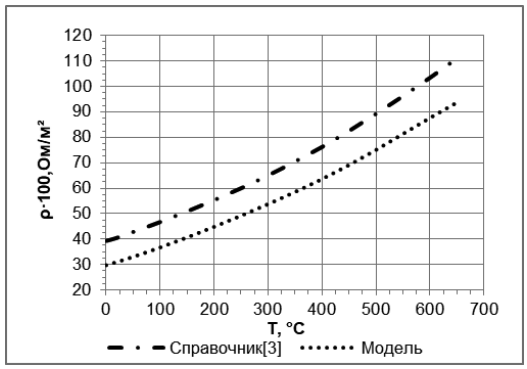


Рис. 6. Удельное сопротивление стали 20CrMoV13-5 [7]

На рис. 7. показана оценка предсказания разработанной модели на тестовом множестве. Уровень погрешности от температуры можно оценить на рис. 8.

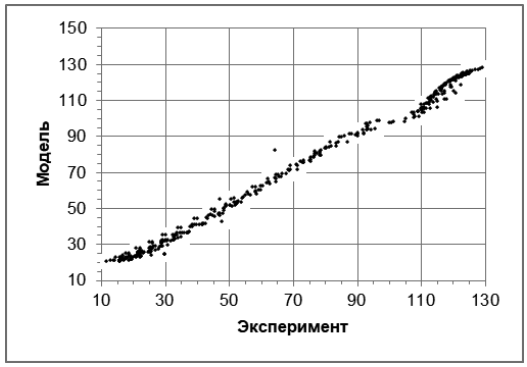


Рис. 7. Оценка предсказания для тестового множества

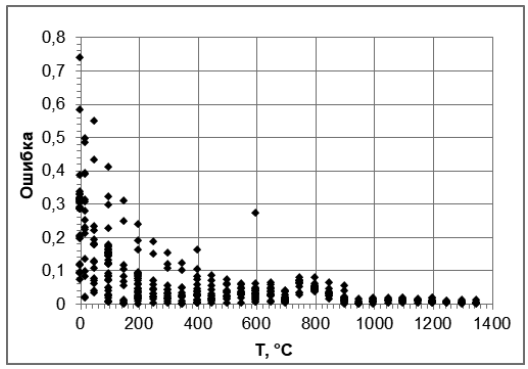


Рис. 8. Относительная ошибка предсказания в зависимости от температуры

Ошибка предсказания увеличивается в области температур до 400 С. Это можно объяснить общим распределением удельного сопротивления сталей (рис. 3), а также высоким влиянием для этих температур предыстории термообработки материала, которая не учитывалась при построении нейронной сети. Кроме того, некоторая доля ошибки вызвана тем, что для проверки взяты данные не с точным химическим составом, а для диапазонов, определенных стандартами.

Часть «выбросов» в тестовом множестве вызвана тем, что для некоторых сталей один из химических элементов имеет значение близкое к границам рабочего диапазона обучающего множества, где, как правило, представлено недостаточно экспериментальных данных.

На рис. 9. показано хорошее совпадение результатов модели и эксперимента для стали 5132 [3]. Для стали 4815 [3] предсказание имеет большую ошибку (рис. 10), но показывают качественно правильный результат. Для сравнения приводятся результаты расчета, полученные с помощью программы JMatPro.

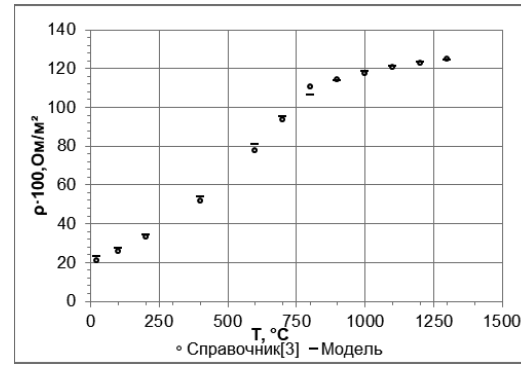


Рис. 9. Удельное сопротивление стали 5132 [3]

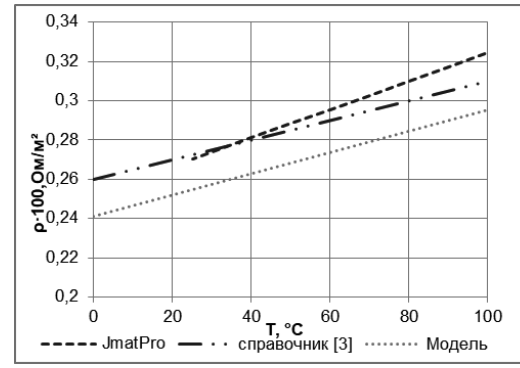


Рис. 10.Удельное сопротивление стали 4815 [3]

Чувствительность входов сети для данного обучающего множества приведена на рис. 11. В первую очередь, кроме температуры, выделяется влияние на удельное сопротивление хрома и никеля.

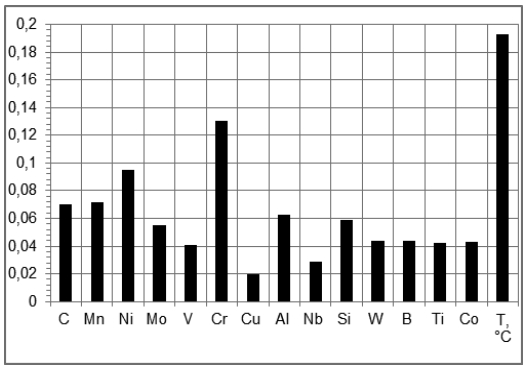


Рис. 11.Чуствительность входов сети

V. Заключение

Разработана модель на основе искусственных нейронных сетей для предсказания удельного сопротивления сталей в широком диапазоне температур. Более 80% предсказанных точек имеет относительную погрешность менее 10%. Полученные результаты показывают, что нейронные сети имеют большой потенциал для аппроксимации физических свойств материалов. Ими необходимо снабжать базы данных, что позволит не только создавать обобщающие модели, но и контролировать качество собранных данных.

Дальнейшие исследования в этой области следует проводить, учитывая предысторию термической обработки. К сожалению, она известна не для всех экспериментальных данных. Поэтому имеет смысл создавать нейронные сети не только для регрессии, но и для классификации, чтобы с их помощью отнести экспериментальные данные с неизвестной предысторией к какому-нибудь виду термообработки.

Кроме того, стоит отметить, что в данной работе стояла задача оценить обобщающую возможность искусственных нейронных сетей для широкого сортамента сталей. Для прикладных задач, возможно, имеет смысл, строить отдельные нейронные сети для разных видов сталей. В таком случае «специализированные» нейронные сети смогут иметь меньше входных признаков, меньшее количество скрытых нейронов, что позволит сократить время обучения и уменьшить ошибку предсказания.

Список литературы

[1] Bhadeshia H.K.D.H. Neural networks in materials science, ISIJ International, 1999, vol. 39, no. 10, pp. 966–979.

[2] Koley S., Ray T., Mohanty I. Prediction of electrical resistivity of steel using artificial neural network, Ironmaking & Steelmaking, November 2017

[3] ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. - ASM International, 1990. - p. 1063.

[4] Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справочник / Под ред. Б. Е. Неймарка. – М.; Л.,: Энергия, 1967. – 240 с.

[5] Теплофизические свойства веществ : справочник / под ред. Н. Б. Варгафтика. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 367 с.

[6] Bugardt, K., Spyra, W.: Wärmeleitfähigkeit unlegierter und legierter Stähle und Legierungen bei Temperaturen zwischen 20 und 700 ºC, Archiv für das Eisenhüttenwesen, 36 (4), 1965, pp. 1-11.

[7] Richter F., The Physical Properties of Steels «The 100 Steels Programme», Mülheim a.d. Ruhr.

[8] Physical constants of same commercial steels at elevated temperatures, The British Iron and Steel Research Association, Butterworths Scientific Publ., London 1953.

[9] D. J. C. MacKay. Bayesian interpolation. Neural Computation, 4(3):41, 1992.

[10] D. J. C. MacKay. A practical bayesian framework for backpropagation networks. Neural Computation, 4(3):448–472, 1992

[11] Peet, H.S. Hasan, H.K.D.H. Bhadeshia. Prediction of thermal conductivity of steel. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011, Vol.54, No.11-12, p.2602.

[12] Žmak, Irena and Filetin, Tomislav (2010) Predicting thermal conductivity of steels using artificial neural networks. Transactions of FAMENA, 34 (3). pp. 11-20.

[13] Alexei S. Bondar . Fedor V. Chmilenko The Use of a Neural Network to Obtain the Characteristics of Steels Depending on the Chemical Composition, 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus).

[14] Бондарь А.С., Чмиленко Ф.В., Нейросеть как средство для аппроксимации свойств стали, Наука. Технологии. Инновации, Сборник научных трудов конференции. Новосибирск, 03-07 декабря 2018 г., с 14-18.

Подходы к разработке моделей сложных систем

Булдакова Т.И.
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия
buldakova@bmstu.ru

***Abstract* — Problem of mathematical formalization and creation of models of complex systems is discusses. It is noted that depending on the availability of information about the properties of the system, various approaches to the development of its models are possible, including the systematization of problem statements in terms of a priori information about the object. Features of the development and possibilities of using mathematical models in the conditions of detailed, partial and missing a priori information about the properties of the system are described. Special attention is paid to the problem of creating adequate models of complex systems under uncertainty. Examples of such systems are natural systems, modern industrial enterprises, socio-economic systems. The perspectivity of the cybernetic principle of the "black box" is indicated, when the structure of the model is set by a certain universal mathematical model without reference to the structure of a real object, and the parameters are determined knowing the reaction to known input effects. From the user's point of view, the model structure, hidden in the "black box", imitates the behavioral features of a complex system. Such models are called information models. Classes of problems of reconstruction of model equations of complex systems are formed. Examples of solving problems (in the study of real complex processes) based on information models are given. It is noted that the key point in the development of the information model is to check its suitability for the solution of the practical problem, which is associated with the assessment of adequacy in relation to the properties of the object of interest to the researcher. Examples of different types of adequacy areas are given and also their features are given.**

Ключевые слова — моделирование, сложная система, неопределенность, информационные модели, реконструкция систем, области адекватности

I. Введение

Математическая формализация объекта или системы является важной задачей при решении многих проблем в различных предметных областях. Наличие адекватной модели расширяет возможности изучения реальных процессов и явлений, позволяет реализовать эффективное управление системой любой природы. В зависимости от наличия информации о свойствах системы возможны различные подходы к разработке ее моделей [1, 2].

Для описания хорошо структурированных систем традиционно применяются методы анализа, состоящие в последовательной декомпозиции системы на компоненты и разработке моделей все более простых элементов исходя из известных законов. Такой подход применяют, например, в системах автоматизированного проектирования сложных технических объектов [3, 4].

При отсутствии подробной информации о свойствах и реакциях сложной системы возникает проблема создания ее модели на основе неполных данных (в условиях неопределенности).

В этом случае перспективными являются методы, использующие кибернетический принцип «черного ящика», когда структура модели задается некой универсальной математической моделью без привязки к структуре реального объекта, а параметры определяют, зная реакцию на известные входные воздействия. Впервые кибернетический принцип «черного ящика» был предложен Н. Винером в рамках теории идентификации систем, в которой для создания модели системы предлагается широкий параметрический класс базисных функций или уравнений. С точки зрения пользователя структура модели системы, спрятанная в «черный ящик», имитирует поведенческие особенности системы. Подобные модели называют информационными.

Ключевым моментом при разработке информационной модели является проверка ее пригодности для решения поставленной практической задачи, что связано с оценкой адекватности в отношении интересующих исследователя свойств объекта.

Целью данной статьи является анализ подходов к исследованию сложных систем на основе их информационных моделей и геометрическая интерпретация областей адекватности, пригодных для практического применения.

II. Основные подходы к исследованию сложных систем по неполным данным

Пусть X – вектор, компоненты которого соответствуют количественным свойствам системы S, а Q – вектор количественных свойств внешних воздействий. Отклик системы может быть описан некоторой (неизвестной) вектор-функцией F: $Y = F(X, Q)$, где Y – вектор отклика (выхода). Задачей моделирования является идентификация системы, которая состоит в определении существования функционального отношения, алгоритма или системы правил в общей форме $Z = G(X, Q)$, которая ассоциирует (связывает) каждую пару векторов (X, Q) с вектором Z таким образом, что Z и Y близки в некоторой метрике, отражающей цели моделирования. Отношение $Z = G(X, Q)$, воспроизводящее в указанном смысле функционирование системы S, называют информационной моделью системы S.

При моделировании реальных сложных систем значения системной функции F получаются на основе экспериментов или наблюдений, которые проводятся лишь для конечного числа компонентов вектора X. При этом значения как Y, так и X измеряются приближенно, и

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

подвержены ошибкам различной природы (т.н. «мягкие вычисления»). Целью моделирования является получение значений системных откликов при произвольном изменении *X*.

В случае большого набора экспериментальных данных (достаточного для доказательства статистических гипотез о характере распределения) и при относительно равномерном их распределении в пространстве может быть успешно создана информационная (статистическая) модель *G* исследуемой системы *S*. Такие информационные модели могут строиться на основе традиционных методов непараметрической статистики, которая позволяет создавать обоснованные модели систем. Однако при высокой стоимости экспериментальных данных или невозможности получения достаточного их количества, их высокой зашумленности, неполноте и противоречивости такие модели являются неработоспособными.

Другим подходом является получение информационной модели с использованием кибернетического принципа «черного ящика». В этом случае модель разрабатывают, зная реакцию на известные входные воздействия и используя базисные функции и уравнения, предлагаемые теорией идентификации систем. Однако такой подход позволяет создавать информационные модели (макромодели) только тех объектов, которые допускают проведение экспериментов, что не всегда возможно.

Зачастую единственная информация о сложной системе содержится только в наблюдаемых данных о ее поведении. В случае, когда детальные сведения о сложной системе отсутствуют или их явно недостаточно для создания модели, возникает проблема ее разработки (реконструкции) на основе неполной информации о внутренней динамике.

В основе методов реконструкции систем также лежит использование принципов информационного кибернетического моделирования. В противоположность аналитическому подходу, при котором моделируется внутренняя структура системы на основе полных данных об ее динамике, информационная модель имитирует только поведенческие особенности сложной системы. Функционирование системы в рамках такой модели описывается чисто информационно, на основе данных измерений или наблюдений над реальной системой.

В нелинейной динамике на основе теоремы Такенса предложены и обоснованы различные методы реконструкции [5, 6]. В качестве универсальной математической структуры выбрана система дифференциальных уравнений с включенной нелинейностью. Основным недостатком рассматриваемого подхода является необходимость многократного дифференцирования исходных временных рядов для оценки параметров модели. Кроме того, остается невостребованной априорная информация о характере динамических процессов, которая может быть выявлена из анализа временных рядов или из других источников.

В работе [7] предложен метод реконструкции сложной системы, основанный на концепции базовых моделей. Метод позволяет использовать априорную информацию о динамике исследуемой системы при выборе математической структуры модели. Однако и в этом случае необходимо получить первую производную от исходного временного ряда.

Если информацию о внутренней динамике трудно формализовать, а измеряемые значения реакции системы зашумлены, то альтернативой является реконструкция на нейронных сетях с учетом целей исследования систем. Нейронная сеть оказывается избирательно чувствительной в областях скопления данных, и дает гладкую интерполяцию в остальных областях [8, 9].

Этот подход имеет две разновидности. В первом случае исходной информацией являются временные (динамические) ряды или регистрируемые сигналы. Тогда в качестве модели используется обученная нейронная сеть, адаптированная на решение задачи. Цели задачи определяют выбор архитектуры сети. Во втором случае на основе статических рядов характеристик систем, имеющих сходные свойства (например, популяции живых организмов или организационных систем одного класса), создается их типовая модель. Задача реконструкции в этом случае формулируется как задача распознавания образов. Применение нейронной сети позволяет выявить скрытые закономерности и взаимосвязи между параметрами систем.

Таким образом, при разработке информационных моделей важным является выбор информационного базиса. В ряде работ [5, 10] такие модели строят на основе временного ряда, регистрируемого в процессе наблюдений за системой. В этом случае информационные модели создаются методами реконструкции, развиваемыми в нелинейной динамике на основе теоремы Такенса. Такие методы и алгоритмы в достаточной степени исследованы [2, 6]. При наличии априорной информации о характере динамических процессов реконструкция может выполняться с использованием базовых моделей [7]. В других работах [11, 12] в качестве такого базиса предлагается использовать искусственные нейронные сети.

Следовательно, в зависимости от исходной информации о функционировании системы можно выделить следующие классы задач реконструкции модельных уравнений систем:

1) реконструкция систем по динамическим рядам характеристик состояния (количественных и качественных), которые, однако, не позволяют получить формализованное описание внутренней динамики системы;

2) реконструкция систем по статическим наборам характеристик состояния (качественных и количественных) с целью выявления скрытых взаимосвязей и закономерностей.

В зависимости от целей исследования реконструкция моделей систем по динамическим рядам характеристик может осуществляться на базе методов анализа автоколебательных процессов, анализа детерминированного хаоса, методов многомерного статистического анализа, анализа временных рядов, искусственных нейронных сетей. Создание

информационных моделей по статическим рядам характеристик состояния систем может осуществляться на базе методов параметрической статистики, нейросетевых и вероятностных методов. Выбор метода должен производиться с учетом особенностей постановки задачи и способа представления исходных данных.

Отметим, что информационные модели по своей природе всегда являются неполными. Поэтому при информационном подходе в случае неполных данных о системе S ее модель G не может быть целиком построена на явных правилах и формальных законах. Процесс получения G по имеющимся отрывочным экспериментальным сведениям о системе S может рассматриваться как обучение модели G обращению S в соответствии с заданным критерием $E = \|G - S\|$ настолько близко, насколько возможно. Алгоритмы обучения означают подстройку (адаптацию) внутренних параметров модели (в случае применения нейронных сетей – весов синаптических связей) с целью минимизации ошибки модели. Оценка ошибки производится в соответствии с выражением $E = \sum_{x \in X} \|G(x) - y\|$, где суммирование по $x \in X$ выполняется по некоторому конечному набору значений параметров X, который называется обучающей выборкой.

Общая методика решения прикладных задач (идентификации, диагностики, прогнозирования) с использованием информационных моделей сложных систем включает следующие этапы: анализ доступной информации о системе; выбор подходящего метода реконструкции; реализация выбранного алгоритма реконструкции; создание информационной модели; оценка адекватности модели; исследование модели с целью решения прикладных задач.

III. Примеры задач, решаемых с использованием информационных моделей систем

Информационные модели позволяют решать различные задачи: моделирование отклика системы на внешнее воздействие; классификация внутренних состояний системы; прогноз динамики изменения системы, оценка полноты описания системы и сравнительная информационная значимость параметров системы; оптимизация параметров системы по отношению к заданной функции ценности и многие другие. Например, в работах [7, 13] авторы использовали информационные модели для защиты передаваемых данных с помощью «физиологической» подписи человека. Реконструкция моделей осуществлялась по биосигналам.

В настоящее время наиболее часто информационные модели применяют при исследовании биомедицинских систем, в том числе при медицинской диагностике [14-16]. Например, при исследовании сердечно-сосудистой системы создают информационные модели по зарегистрированным биосигналам [17-20].

Приведем пример информационной модели, созданной с использованием сфигмограммы, которая регистрирует колебания артериальной стенки сосуда, обусловленные выбросом ударного объема крови в артериальное русло. Применяя принцип базовых моделей колебательных систем, с учетом биомеханики сосуда, можно описать динамические свойства сосудистой стенки уравнением Ван-дер-Поля – Релея [13]:

$$\ddot{x} + \left[\varepsilon_1\left(x^2 - r^2\right) + \varepsilon_2\left(\dot{x}^2 - \omega_0^2 \cdot r^2\right)\right] \cdot \dot{x} + ax = P(\omega_0 t),$$

где x – это перемещение стенки кровеносного сосуда, регистрируемое датчиком.

Исходной информацией для определения неизвестных параметров управления является временной ряд пульсаций стенки сосуда (сфигмограмма). Учитывая, что система функционирует в режиме предельного цикла, неизвестные параметры ω_0 и r уравнения находятся из экспериментальных данных. После их определения, используя измеренные значения $x_u(t)$ и вычисленные значения $\dot{x}(t)$ и $\ddot{x}(t)$, методом наименьших квадратов находятся значения p_i, a, ε_1 и ε_2. Здесь p_i – это коэффициенты разложения функции P в ряд Фурье, $i = 1, \ldots, N$.

В зависимости от состояния сосудов, структура модельного уравнения может изменяться. Например, для пожилых пациентов вместо вышеуказанного уравнения целесообразно использовать модель Ван-дер-Поля – Дуффинга [20].

Подобные базовые модели используют при исследовании поведенческих особенностей сложных систем различной природы, где наблюдаются колебательные процессы. Это могут быть физические, технические, экологические, экономические и другие классы систем.

Информационные модели широко применяют при автоматизированной обработке изображений для идентификации скрытых или завуалированных структурных элементов на снимках. Различные варианты процедур сегментации и кластеризации находят применение в робототехнике при проектировании систем технического зрения, в материаловедении для обнаружения дефектов деталей, в картографии и экологии для обработки аэрокосмических изображений, в медицине для выявления пораженных тканей и в других приложениях, имеющих практическое значение [15, 16, 21, 22, 23]. Модели создают с использованием статистических методов (например, кластеризации, дискриминантного анализа), нейронных сетей.

Таким образом, цели исследования сложных систем и имеющаяся информация об их функционировании обусловливают применение разных подходов к созданию информационных моделей. Кроме того, ключевым моментом при разработке информационной модели является проверка ее пригодности для решения поставленной практической задачи, что связано с оценкой адекватности в отношении интересующих исследователя свойств объекта.

IV. Геометрическая интерпретация областей адекватности моделей

Информационная модель считается адекватной, если отражает заданные свойства системы с приемлемой точностью. Точность определяется как степень совпадения значений выходных переменных модели и исследуемой системы.

Введем обозначения. Пусть εj – относительная погрешность модели по j–ой выходной переменной: $\varepsilon_j = \left(\widetilde{y}_j - y_j\right)/\widetilde{y}_j$, где y_j – j-ая выходная переменная, рассчитанная с помощью модели; $\widetilde{y}_j$ – эталонное значение той же выходной переменной; $j \in [1:m]$. Эталонное значение определяется либо экспериментально, либо может задаваться априорно. В рассматриваемом контексте конкретизация способа не принципиальна.

Погрешность модели часто отождествляют с одной из норм вектора $E = (\varepsilon_1, \varepsilon_2 \ldots, \varepsilon_m)$, m – число выходных переменных. В этом случае можно оценить точность только в одной или нескольких точках пространства QS внешних переменных при некоторых фиксированных значениях вектора Q. Однако точность модели различна при различных условиях функционирования объекта, которые характеризуются значениями внешних переменных. В результате оценка точности модели, полученная при одних внешних воздействиями, может оказаться недостоверной для других. Поэтому вместо количественной оценки точности модели предлагается рассматривать некоторую область адекватности [24].

Область адекватности AA (Area of Adequacy) – это область в пространстве внешних переменных qk, в пределах которых использование модели обеспечивает выполнение неравенств $|\varepsilon_j| \le \varepsilon_{j\,\mathrm{lim}}$, где εj – относительная погрешность определения значения выходной переменной yj, обусловленная приближенностью модели; $\varepsilon_{j_{\mathrm{lim}}}$ – допустимая погрешность.

В зависимости от конкретных постановок задач в пространстве внешних переменных QS можно выделить несколько видов областей адекватности. Наиболее общей *AA* является номинальная область адекватности *NAA*, в которой расчет с помощью модели любой выходной переменной реального объекта производится с относительной погрешностью, не превышающей заданную: $NAA = \left\{Q \in QS \,\middle|\, |\varepsilon_j(Q)| < \delta,\ j \in [1:m]\right\}$, где $\varepsilon_j(Q)$ – относительная погрешность *j*-ой выходной переменной; δ – максимально допустимая относительная погрешность; *m* – количество выходных переменных (рис. 1).

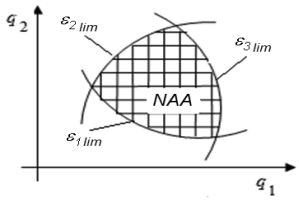


Рис. 1. Геометрическая интерпретация номинальной области адекватности *NAA*

Для практического использования сведения об областях адекватности моделей должны быть представлены в удобной форме, при которой проверка адекватности модели в любой точке внешнего пространства *QS* является простой и наглядной. Поэтому целесообразно применить аппроксимированные области адекватности, например, в виде некоторой гиперфигуры, вписанной в область *NAA*.

В качестве такой гиперфигуры *GF* можно использовать гиперпараллелепипед с ребрами, параллельными координатным осям пространства *QS*:

$$GF = \left\{Q \in QS \,\middle|\, q_{k_{\min}} \le q_k \le q_{k_{\max}},\ k \in [1:l]\right\},$$

где $q_{k_{\min}}$ и $q_{k_{\max}}$ – нижняя и верхняя границы изменения *k*-ой внешней переменной (рис. 2).

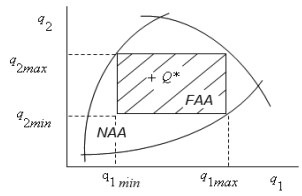


Рис. 2. Область адекватности *FAA* в виде гиперпараллелепипеда

Тогда имеем $FAA = GF \in NAA$ при условии, что максимизирован некоторый параметр гиперпараллелепипеда, например, длина наиболее короткого ребра. В этом случае формирование области адекватности *FAA* в виде гиперпараллелепипеда *GF* является решением максиминной задачи оптимизации вида $\max\limits_{Q \in NAA} \min\limits_{k \in [1:l]} \left(\gamma_k / q_k^*\right)$, где γ_k – ребро *GF* по *k*-ой координате пространства *QS*; q_k^* – элемент вектора Q^*, определенного на этапе идентификации модели.

Определение *FAA* в виде гиперпараллелепипеда *GF* дает сведения для модели о допустимых диапазонах изменения внешних переменных. Поэтому такую область адекватности удобно использовать на практике. Нарушение допустимого диапазона по какой-либо координате пространства *QS* является условием перехода к более сложной (точной) модели.

При решении практических задач могут использоваться и другие аппроксимации области *NAA*. На рис. 3 и рис. 4 показаны возможные виды аппроксимированных областей адекватности *AAA* с линеаризованными границами.

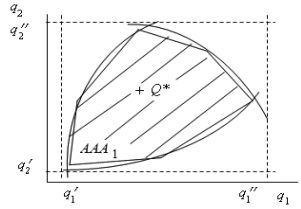


Рис. 3. Аппроксимированная область адекватности AAA_1 с линеаризованными границами

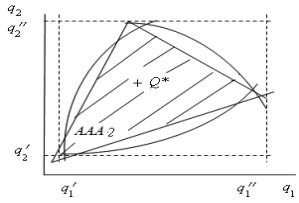


Рис. 4. Второй вид аппроксимированной области AAA_2 с линеаризованными границами

При построении области адекватности AAA_2 достигается меньшая точность аппроксимации из-за небольшого числа аппроксимирующих гиперплоскостей. При этом каждая гиперповерхность заменяется одной гиперплоскостью.

Таким образом, геометрическая интерпретация областей адекватности в пространстве внешних переменных позволяет наглядно представить условия функционирования реального объекта, при которых расчеты с применением информационной модели будут выполняться с погрешностью, не превышающей заданную.

V. Заключение

Моделирование сложных систем ввиду большой степени неопределенности является нетривиальной задачей, для решения которой существуют различные методы и подходы. Выбор наиболее подходящего метода осуществляется, исходя из интересующих исследователя свойств конкретного объекта или пригодности модели для решения поставленной практической задачи.

Рассмотренные подходы построения моделей сложных систем на основе реконструкции и примеры их практического применения показали эффективность информационных моделей при решении различных задач. Отмечена важность оценки адекватности реконструированных моделей. В зависимости от цели моделирования возможны различные формы интерпретации и оценки адекватности модели. Представленные в статье наглядные аппроксимации областей адекватности облегчают получение количественных оценок пригодности моделей.

Список литературы

[1] Shalizi C.R. Methods and Techniques of Complex Systems Science: An Overview. In: Deisboeck T.S., Kresh J.Y. (eds) Complex Systems Science in Biomedicine. Topics in Biomedical Engineering International Book Series. -Springer, Boston, MA. 2006.

[2] Bezruchko B.P., Smirnov D.A. Extracting Knowledge From Time Series: An Introduction to Nonlinear Empirical Modeling. -Springer Science & Business Media. 2010. 410 p.

[3] Sokolov B.V., Yusupov R.M., Zaychik E.M. Principles, Models, Methods and Algorithms for the Structure Dynamics Control in Complex Technical Systems // Lecture Notes in Computer Science International Conference on Computational Science and Its Applications - ICCSA 2005. Pp. 407-416.

[4] Shen K., Proletarsky A.V., Neusypin K.A. Algorithms of constructing models for compensating navigation systems of unmanned aerial vehicles // 2016 International Conference on Robotics and Automation Engineering, ICRAE. 2016

[5] Xu P.C. Differential phase space reconstructed for chaotic time series. // Applied Mathematical Modelling. 2009. Volume 33, Issue 2. Pp. 999-1013.

[6] Pecora L.M., Moniz L., Nichols J., Carroll T.L. A unified approach to attractor reconstruction // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2007. Vol 17, Issie 1. Pp. 1-9.

[7] Buldakova T.I., Suyatinov S.I. Reconstruction method for data protection in telemedicine systems // Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE. 2014. Vol. 9448. Paper 94481U. doi: 10.1117/12.2180644

[8] Maclin P.S., Dempsey J. Using an artificial neural network to diagnose hepatic masses // Journal of Medical Systems. 1992. Vol. 16, No. 5. P.215-225.

[9] Baratti R., Cannas B., Fanni A. and Pilo F. Automated Recurrent Neural Network Design to Model the Dynamics of Complex Systems // Neural Computing & Applications. 2000. No. 9. Pp. 190–201.

[10] Ma H., Leng S., Chen L. Data-based prediction and causality inference of nonlinear dynamics. Science China Mathematics, 2017, 60, doi: 10.1007/s11425-000-0000-0

[11] Tronci St., Giona M., Baratti R. Reconstruction of chaotic time series by neural models: a case study // Neurocomputing. 2003. Vol. 55. Pp. 581-591.

[12] Ma H., Aihara K., Chen L. Detecting Causality from Nonlinear Dynamics with Short-term Time Series // Scientific Reports. 2014. Vol. 4, No. 7464.

[13] Buldakova T., Krivosheeva D. Data Protection During Remote Monitoring of Person's State. In: Dolinina O. at al. (Eds.) Recent Research in Control Engineering and Decision Making. ICIT-2019. Studies in Systems, Decision and Control. Vol. 199. Pp. 3-14. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12072-6_1

[14] Karavaev A.S., Ishbulatov Y.M., Kiselev A.R., Ponomarenko V.I., Gridnev V.I., Bezruchko B.P., Prokhorov M.D., Shvartz V.A., Mironov S.A. A model of human cardiovascular system containing a loop for the autonomic control of mean blood pressure // Human Physiology. 2017. Vol. 43. No. 1. -Pp. 61-70.

[15] Suyatinov S.I., Kolentev S.V., Bouldakova T.I. Criteria of identification of the medical images // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2002. Vol. 5067. Pp. 148-153.

[16] Buldakov N.S., Buldakova T.I., Suyatinov S.I. Etalon-photometric method for estimation of tissues density at X-ray images // Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE. 2016. Vol. 9917. Paper 99171Y. doi: 10.1117/12.2229539

[17] Silvani A., Magosso E., Bastianini S., et al., Mathematical modeling of cardiovascular coupling: central autonomic commands and baroreflex control // Autonomic Neuroscience: Basic & Clinical, 2011, vol. 162, nos. 1–2, pp. 66-71.

[18] Stefanovska A. Coupled Oscillators: Complex but Not Complicated Cardiovascular and Brain Interactions // IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. November/December, 2007. -Pp. 25-29.

[19] Buldakova T.I., Suyatinov S.I. Registration and identification of pulse signal for medical diagnostics // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2002. Vol. 4707, paper 48. -Pp. 343-350.

[20] Suyatinov S.I. Criteria and Method for Assessing the Functional State of a Human Operator in a Complex Organizational and Technical System // Global Smart Industry Conference (GloSIC). Chelyabinsk, Russia. 2018. -P. 1-6. doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570088

[21] Geras K.J., Wolfson S., Shen Y., Kim S.G., Moy L. and Cho K. High-resolution breast cancer screening with multi-view deep convolutional neural networks // Preprint Cornell University Library, arXiv:1703.07047. 2017.

[22] Malik J., Belongie S., Leung Th., Shi J. Contour and Texture Analysis for Image Segmentation // International Journal of Computer Vision. 2001. Vol. 43. No. 1. -Pp. 7–27.

[23] Loktev D.A., Loktev A.A. Diagnostics of External Defects of Railway Infrastructure by Analysis of its Images // Global Smart Industry Conference (GloSIC). Chelyabinsk, Russia. 2018. doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570083

[24] Norenkov I.P., Buldakova T.I. Complex of Algorithms and Programs for Circuit Design Optimization // In: Proceedings of seventh European conference on Circuit Theory and Design. -Praha, 1985, pp. 161-164.

Иерархическая модель представления сетевого взаимодействия в телемедицинской системе

Булдакова Т.И.
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия
buldakova@bmstu.ru

Кривошеева Д.А.
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия
darinaaleks@gmail.com

Суятинов С.И.
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия
ssi@bmstu.ru

***Abstract* — Problem of the organization of secure network interaction in telemedicine systems, which are actively being created and implemented in healthcare, is considered. The analysis of network resources and services of telemedicine systems for various purposes and their capabilities are presented. As an example, a telemedicine system for remote monitoring of a person's state is considered; the component of system is a mobile measuring complex for picking up, recording and processing biosignals. In such a telemedicine system, the decision on the state of a person is made on the basis of the assessment and identification of transmitted data. The relevance of research in the field of information security of telemedicine systems is noted, and the task of ensuring the integrity, accessibility and consistency of data is posed. A threat model has been created and its analysis has been performed for the system that ensures continuous monitoring of the human state on the recorded biosignals. It is concluded that the main studies are related to ensuring the security of the interaction of certain types of components of the telemedicine system and do not affect its entire network structure. In addition, most studies consider only one level of representation of the system. A hierarchical structure of the system under study is proposed on the basis of the OSI reference model and the levels of data presentation are described. The tasks of ensuring the safe interaction of the components of the telemedicine system at each hierarchical level of the proposed model are highlighted. Examples of the organization of secure network interaction in the system of remote monitoring of the human state at various levels of data presentation are given. Methods and algorithms for the implementation of such an interaction, as well as a network protocol to ensure the protection of data transmitted over open channels, are proposed.**

Ключевые слова — телемедицина, сетевое взаимодействие, защита данных, система мониторинга состояния человека, биосигналы, модель угроз

I. Введение

В настоящее время в здравоохранении активно внедряются информационно-коммуникационные технологии, обеспечивающие формирование каналов устойчивых коммуникаций между специалистами разных лечебно-профилактических учреждений, удаленный доступ к медицинским информационным системам, облегчение и ускорение записи пациентов на прием к врачам [1, 2]. Примером развития виртуальных инфраструктур здравоохранения являются системы телемедицины, которые дистанционно предоставляют высококвалифицированную помощь врачей ведущих медицинских центров пациентам в отдаленных районах [3]. Также в настоящее время получают развитие мобильные телемедицинские комплексы для работы на местах аварий.

Включение подобных телемедицинских систем в единое информационное пространство (ЕИП) позволит осуществить непрерывный мониторинг состояния человека независимо от его местоположения. В процессе такого мониторинга осуществляются удаленные сбор, передача, хранение и обработка данных, которые необходимы для формирования и принятия решений о состоянии пациента.

Однако, при включении телемедицинских систем в ЕИП, в котором все заинтересованные пользователи обеспечены необходимой и достоверной информацией в нужное время и в удобной форме, возникает проблема обеспечения безопасности данных [4, 5]. Нарушение целостности и конфиденциальности информации, кража персональных и медицинских данных приводят не только к финансовым потерям, но и к нежелательным социальным последствиям, наносят моральный ущерб пациенту. Кроме того, необходимо обеспечить защиту данных, передаваемых по каналам связи. При функционировании систем мониторинга требуется нивелирование случайных и преднамеренных воздействий внешней среды, приводящих к снижению защищённости канала передачи данных и достоверности передаваемой информации [6, 7].

Данная статья посвящена разработке иерархической модели, облегчающей выбор методов, алгоритмов и протоколов для организации защищенного сетевого взаимодействия на различных уровнях телемедицинской системы.

II. Анализ сетевых ресурсов и сервисов телемедицинских систем

Телемедицина – это прикладное направление медицинской науки, связанное с разработкой и применением на практике методов дистанционного оказания медицинской помощи и обмена специализированной информацией на базе использования современных телекоммуникационных технологий. Телемедицинские системы объединяют на базе ЕИП все составляющие элементы системы здравоохранения, обеспечивая сбор более полной информации, анализ и обмен большими объемами данных, в значительной степени автоматизируя труд медицинского персонала. Поэтому они создаются для повышения качества врачебной помощи, увеличения оперативности представления медицинской информации, обеспечения комфортности в работе

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

медицинского персонала и повышения его квалификации, проведения научных исследований в области здравоохранения (рис. 1).

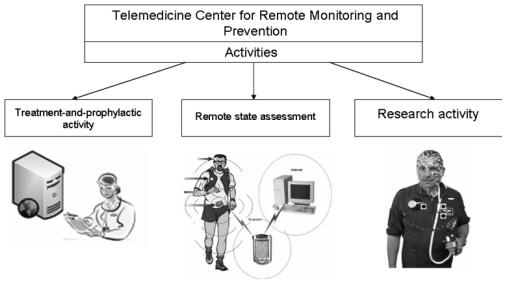


Рис. 1. Направления деятельности телемедицинских систем

В настоящее время телемедицинские системы используются для удаленных аудио- и видеоконсультаций, уменьшения затрат на повторные визиты к врачу, постоянного мониторинга пациентов с хроническими болезнями, дистанционных хирургических операций, срочной помощи при чрезвычайных ситуациях, а также для обучения и повышения квалификации врачей [8-11]. В телемедицинских системах пользователи могут совместно использовать сетевые ресурсы в виде электронных историй болезни, медицинских справочников и атласов, методик и рекомендаций, отчетов о клинических исследованиях и другой самой различной медицинской информации. Эти информационные ресурсы, представленные в базах данных и информационных хранилищах, становятся доступны медицинским учреждениям благодаря внедрению информационно-коммуникационных технологий и развитию сетевых инфраструктур здравоохранения.

Выделяют два вида взаимодействия в телемедицине: «врач-врач» и «врач-пациент». Первый вид взаимодействия уже давно и активно используется в разных странах. Он позволяет врачам в реальном времени обсуждать результаты анализов, проводить консилиумы и удаленные консультации с узкими специалистами, контролировать проводимые процедуры и операции, осуществлять обучение и аттестацию медицинского персонала. Тем самым достигается эффект «виртуального присутствия» медицинских специалистов.

Второй вид взаимодействия в полной мере появился сравнительно недавно, что обусловлено необходимостью решения ряда вопросов, как субъективных (например, доверие к врачу), так и объективных (например, защита данных о пациенте). Такой вид взаимодействия позволяет решить ряд задач: сбор информации (жалобы, анамнез), оценка результатов и корректировка лечения, принятие решения об очном визите, мониторинг состояния здоровья. Во время on-line общения врача и пациента имеется возможность передавать любые графические изображения и текстовые данные, которые можно сохранять, редактировать или комментировать. Обычно результатом такого взаимодействия является создание и заполнение электронной истории болезни (ЭИБ) пациента, доступной различным категориям пользователей телемедицинской системы.

Независимо от вида взаимодействия в телемедицинских системах, доступ к ЭИБ пациента может получить любой авторизованный медицинский сотрудник без информирования пациента. Эти системы позволяют внести, удалить или изменить любую информацию, поэтому они не являются безопасными, так как в них нарушаются принципы конфиденциальности и целостности информации. Системы, которые оперируют такими важными данными, как информация о здоровье человека, должны быть надежно защищены.

Таким образом, в телемедицинских системах в первую очередь должны быть решены вопросы, связанные с информационной безопасностью, а именно: вопросы обеспечения защищенного сетевого взаимодействия пользователей системы. Особенно актуальны эти вопросы для систем дистанционного мониторинга состояния человека.

III. Особенности телемедицинской системы дистанционного мониторинга состояния человека

В настоящее время телемедицинские системы динамического наблюдения широко используются для мониторинга состояния пациентов с хроническими заболеваниями (диабет, сердечная патология, пожилое население) [12-15]. Многообещающим направлением развития дистанционного биомониторинга является интеграция датчиков в одежду, различные аксессуары, мобильные телефоны [16-18]. На пациенте устанавливается система нательных датчиков, которые регистрируют физиологическую информацию (в основном, биосигналы) и передают ее по беспроводным каналам связи на сервер (рис. 2).

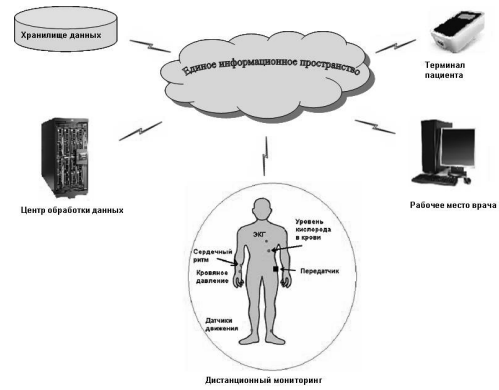


Рис. 2. Основные компоненты системы дистанционного мониторинга

Медицинский персонал может просматривать в режиме реального времени собранную информацию в медицинской информационной системе (МИС), содержащей базу данных биосигналов, и оценивать текущее функциональное состояние пациента. Включение такой мобильной измерительной системы в ЕИП позволит осуществить непрерывный мониторинг состояния человека независимо от его местоположения.

Оценка состояния человека в системах биомониторинга может выполняться разными способами: под наблюдением лечащего врача, на основе анализа контролируемых параметров (норма – патология) или автоматизировано по вычислительной модели пациента (виртуальной физиологии) [12, 19-21]. При этом независимо от способа оценки выделяют разные уровни обработки данных.

Источниками первичной информации выступают различные датчики, позволяющие регистрировать биосигналы человека. Поэтому составной частью телемедицинской системы дистанционного мониторинга состояния человека является мобильный измерительный комплекс. Он производит съем, регистрацию и первичную обработки биосигналов. Это низший уровень обработки информации в телемедицинской системе. Хранение, вычисление и визуализация огромного количества данных, собранных системой мониторинга, требует значительных вычислительных ресурсов, предоставляемых виртуальной инфраструктурой с помощью облачных технологий. Датчики могут отправлять данные на облако напрямую, либо через промежуточные базовые станции (средний уровень обработки информации). Обслуживающий персонал и пользователь могут просматривать собранную медицинскую информацию непосредственно из облака с помощью смартфона или через Интернет в режиме реального времени и принимать решения в соответствии с текущим функциональным состоянием человека. Это верхний уровень обработки информации в телемедицинской системе. Таким образом, в общем случае в телемедицинской системе мониторинга имеется три уровня обработки информации.

Несмотря на многообразие предлагаемых вариантов реализации телемедицинских систем, в них обходится стороной важный аспект информационной безопасности. В подобных системах обрабатываются как персональные данные, так и демографическая, финансовая и медицинская информация. Следовательно, необходимо обеспечить безопасность обрабатываемых системой персональных данных и информации, составляющей врачебную тайну. Однако вопросы защиты информации, циркулирующей в таких системах, рассматриваются крайне неполно, односторонне и поверхностно.

Основные исследования связаны с обеспечением защищенности взаимодействия отдельных видов компонентов телемедицинской системы и не затрагивают всей ее структуры [5-7, 22]. Однако сетевое взаимодействие в телемедицинских системах в зависимости от решаемых задач реализуется на разных уровнях. Тем не менее, в большинстве исследований рассматривается только один уровень представления системы, когда внимание уделяется только разграничению доступа пользователей к общим сетевым ресурсам телемедицинских систем. Вопросы комплексной защиты информационных процессов, протекающих на разных уровнях сетевого взаимодействия и реализующих разные уровни обработки данных, не рассматриваются.

Для выбора способа защиты данных определим возможные угрозы информационной безопасности применительно ко всем компонентам системы мониторинга (табл. 1). Анализ модели угроз показал, что существует проблема обеспечения информационной безопасности данных пациентов, которые передаются от датчиков в хранилище. При этом решающее значение имеет защита личных медицинских данных при передаче через коммуникационный канал от датчиков к облачной медицинской базе данных. Поэтому при выборе методов, алгоритмов и протоколов защиты передаваемых данных необходимо учитывать различные уровни описания сетевого взаимодействия в телемедицинской системе дистанционного мониторинга состояния пациента.

IV. Анализ сетевого взаимодействия в телемедицинской системе

Для более детального описания информационных процессов, протекающих при сетевом взаимодействии в телемедицинской системе, используем базовую эталонную модель взаимодействия открытых систем – сетевую модель OSI (Open Systems Interconnection). В модели выделяют семь уровней, каждый из которых обслуживает различные части процесса взаимодействия открытых систем [23, 24]. В процессе передачи данных каждый уровень модели OSI выполняет определенную функцию. Дополним описание уровней модели задачами обеспечения защищенного сетевого взаимодействия в телемедицинской системе (табл. 2).

ТАБЛИЦА I. Возможные угрозы информационной безопасности

№	Компоненты	Угрозы	Комментарии
1	Датчики	Доступ злоумышленника к датчику	Необходимо использовать надежные датчики, ограничивающие доступ
2	Коммуникации	Злоумышленники могут подслушивать все виды разговоров, а также исказить сигналы	Коммуникационная связь в системе является ненадежной, поэтому необходимо шифрование сигналов
3	Смартфон	Злоумышленник может повлиять на работу смартфона	Защита приложений на смартфоне
4	Хранилище данных в облаке	Возможный доступ к данным в облаке	Только после успешной авторизации врач сможет получить доступ к информации о пациенте
5	Медицинский персонал	Передача информации злоумышленнику	Предполагается, что медицинский персонал не откроет доступ к информации под влиянием злоумышленников
6	Пациент	Передача информации злоумышленнику	Предполагается, что пациент не откроет доступ к информации под влиянием злоумышленников
7	Тело пациента	Злоумышленник может иметь физический контакт с пациентом (например, пожать ему руку), поэтому биосигналы пациента могут быть искажены сигналами злоумышленника	Надежные датчики не позволяют злоумышленнику искажать сигналы. Кроме того, вся информация о состоянии здоровья пациента в прошлом неизвестна злоумышленнику

ТАБЛИЦА II. ОРГАНИЗАЦИЯ БЕЗОПАСНОГО СЕТЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ OSI

Уровень	Название	Основные функции	Задачи обеспечения безопасности передачи данных в телемедицине
7	Прикладной уровень	Поддержка прикладных процессов (определение доступности сетевых ресурсов, синхронизации связи)	Идентификация пользователей телемедицинской системы мониторинга
6	Уровень представления	Организация данных при их передаче (преобразование форматов данных, шифрование/дешифрование данных)	Определение способа криптозащиты. Выбор алгоритма шифрования
5	Сеансовый уровень	Управление сеансом связи	Аутентификация пользователей системы и проверка их полномочий
4	Транспортный уровень	Обеспечение надежности и корректности передачи данных	Контроль целостности передаваемых конфиденциальных данных и факта передачи информации
3	Сетевой уровень	Определение пути передачи данных, маршрутизация и пересылка	Разграничение доступа к сетевым ресурсам, мониторинг сетевого трафика, скрытие от злоумышленников таблиц маршрутизации
2	Канальный уровень	Обеспечение взаимодействия сетей на физическом уровне, передача и прием пакетов	Обеспечение достоверности передачи информации (степени соответствия принятого сообщения переданному)
1	Физический уровень	Работа со средой передачи, сигналами и битами	Обеспечение защищенности физической среды передачи данных

Далее сгруппируем уровни модели OSI по типам задач обеспечения безопасности передачи данных:

1) обеспечение доступа к сети на уровне физической среды передачи данных (1 и 2 уровни модели OSI);

2) обеспечение надежной передачи данных на уровне маршрутизации (3 и 4 уровни модели OSI);

3) разграничение доступа к сетевым ресурсам (5 уровень модели OSI);

4) обеспечение защищенного взаимодействия на уровне процессов (приложений) (6 и 7 уровни модели OSI).

Рассмотрим подходы к решению указанных типов задач обеспечения защищенного сетевого взаимодействия. Каждому типу задач поставим в соответствие уровень представления сетевого взаимодействия.

В настоящее время созданы различные протоколы и методы, которые обеспечивают безопасность передачи данных в системах, имеющих сетевую структуру [5, 7, 22]. Определим, для каких из уровней представления сетевого взаимодействия требуются дополнительные меры защиты данных (применительно к телемедицинским системам дистанционного мониторинга состояния пациентов).

Первый и второй уровни представления сетевого взаимодействия не накладывают ограничений на тип системы и не учитывают ее специфики. Поэтому достаточно известных мер защиты. Третий уровень представления сетевого взаимодействия учитывает полномочия пользователей (приложений) при доступе к сетевым ресурсам. Здесь эффективным является применение ролевой модели разграничения доступа. И, наконец, четвертый уровень требует применения криптографических методов для идентификации пользователей и передачи конфиденциальных данных.

Полученная четырехуровневая модель сетевого взаимодействия позволяет более полно сформулировать требования и определить необходимые технологии защиты данных в системе дистанционного мониторинга состояния человека (рис. 3).

Рис. 3. Иерархия уровней модели и решаемые задачи

Рассмотрим технологии защиты данных для верхнего уровня представления сетевого взаимодействия. Применение в телемедицинских системах устройств аппаратной идентификации (например, смарт-карт пациентов или USB-токенов врачей), криптографии и электронных подписей позволит защитить от несанкционированного доступа к персональным данным и нарушения их целостности, а также обеспечить неотказуемость от авторства созданных электронных персональных медицинских записей в ЭИБ. Кроме того, в зависимости от специфики системы при шифровании/расшифровании передаваемых данных возможны два подхода к распределению криптографических ключей [4].

Асимметричное шифрование достаточно надежно для обеспечения конфиденциальности и целостности передаваемых данных, но для регулярного обмена данными в режиме реального времени требует больших затрат ресурсов и времени. Симметричные криптосистемы работают на три порядка быстрее, но их недостатком является невозможность подтверждения авторства, так как ключ известен каждой стороне.

В ряде работ для подтверждения авторства предложено использовать регистрируемые биосигналы, которые отражают физиологические особенности пациента. Например, в работе [25] выделены некоторые морфологические особенности биосигналов, которые

являются уникальными для каждого человека и которые мало изменяются с течением времени. Предложенный сетевой протокол с использованием биосигналов пациента не требует априорного распределения ключей. Однако необходимо применять подбор функциональных зависимостей по виду регистрируемых биосигналов, что не очень эффективно.

Для сокрытия информации может быть также применена математическая модель генератора биосигнала в форме системы дифференциальных уравнений, созданная на основе методов реконструкции [4, 13]. В облаке, внутри хранилища, находится диагностический эквивалент биосигналов (в виде структуры и параметров математической модели генератора биосигнала), который должен быть настроен согласно физиологическим данным пользователя при его регистрации в телемедицинской системе [19]. Предполагается, что для более глубокого сокрытия информации необходимо использовать несколько совместно зарегистрированных биосигналов.

V. Заключение

Отмечено, что при определении методов, алгоритмов и протоколов защиты передаваемых данных необходимо учитывать различные уровни представления сетевого взаимодействия в телемедицинской системе. В качестве примера рассмотрена система дистанционного мониторинга состояния пациентов, для которой создана и проанализирована модель угроз информационной безопасности. Предложенная иерархическая модель представления сетевого взаимодействия в телемедицинской системе детально описывает основные функции и задачи защиты информации каждого уровня. Данная модель для конкретного применения позволяет сформулировать требования и обоснованно выбрать технологии защиты данных в телемедицинской системе дистанционного мониторинга состояния человека.

Список литературы

[1] Развитие системы электронных услуг муниципальной поликлиники (на основе анализа зарубежных web-ресурсов) / А.В. Ланцберг, К. Тройч, Т.И. Булдакова // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. 2011. № 4. -С. 1-7.

[2] Llinás G., Rodríguez-Iñesta D. et al. Comparison of Websites from Spanish, American and British Hospitals // Methods of Information in Medicine. 2008. Vol. 47; Issue 2. -P. 124-130.

[3] Perednia D.A., Allen A. Telemedicine technology and clinical applications // JAMA 2006. No. 273. -Pp. 483-488.

[4] Булдакова Т.И., Суятинов С.И., Кривошеева Д.А. Обеспечение информационной безопасности в телемедицинских системах на основе модельного подхода // Вопросы кибербезопасности. 2014. № 5(8). -С. 21-29.

[5] Appari A. and Johnson M.E. Information Security and Privacy in Healthcare: Current State of Research // International Journal of Internet and Enterprise Management, vol. 6, no. 4, 2010, Pp. 279-314.

[6] Buldakova T.I., Dzhalolov A.S. Analysis of data processes and choices of data-processing and security technologies in situation centers // Scientific and Technical Information Processing. 2012. Vol. 39(2). -Pp. 127-132.

[7] Анализ информационных рисков виртуальных инфраструктур здравоохранения / Т.И. Булдакова, С.И. Суятинов, Д.А. Миков // Информационное общество. 2013. № 4. -С. 6.

[8] Gubanov D., Korgin N., Novikov D., Raikov A. E-Expertise: Modern Collective Intelligence // Springer. Series: Studies in Computational Intelligence, 2014, Vol. 558, XVIII -112 p.

[9] Romero-Aroca P., Valls A., Moreno A., Sagarra-Alamo R., Basora-Gallisa J., Saleh E., Baget-Bernaldiz M., Puig D. A Clinical Decision Support System for Diabetic Retinopathy Screening: Creating a Clinical Support Application // Telemedicine and e-Health. 2019. Vol. 25, No. 1. -Pp. 31–40. https://doi.org/10.1089/tmj.2017.0282

[10] Liu X., Cheng J., and Huang S. Mobile Phone Training Platform for the Nursing Staff in the Emergency Department // Telemedicine and e-Health. 2019. Vol. 25, No. 1. -Pp. 66–70. https://doi.org/10.1089/tmj.2017.0317

[11] Lee S.-J., Cho G.-Y., and Lee T,-R, N-WRETS: Near-Lossless Wireless Real-time Efficient Electroencephalogram Transmission Solution to Support Sleep Disorder Monitoring Platforms // Telemedicine and e-Health. 2019. Vol. 25, No. 2. -Pp. 116–125. https://doi.org/10.1089/tmj.2017.0279

[12] Prado M., Roa L., Reina-Tosina J. Virtual Center for Renal Support: Technological Approach to Patient Physiological Image // IEEE Transaction on biomedical engineering. 2002. Vol. 49, №12. -Pp.1420-1430.

[13] Концептуальная модель виртуального центра охраны здоровья населения / В.С. Анищенко, Т.И. Булдакова, П.Я. Довгалевский, В.Б. Лифшиц, В.И. Гриднев, С.И. Суятинов // Информационные технологии. 2009. № 12. -С. 59-64.

[14] Bashi N., Karunanithi M., Fatehi F., Ding H., Walters D. Remote Monitoring of Patients With Heart Failure: An Overview of Systematic Reviews // Journal of Medical Internet Research. 2017. Vol. 19(1), e18.

[15] Nakamura N., Koga T., Iseki H. A meta-analysis of remote patient monitoring for chronic heart failure patients // Journal of Telemedicine and Telecare. 2014. Vol. 20(1). -Pp. 11–17. https://doi.org/10.1177/1357633X13517352.

[16] Schmidt S., Schuchert A., Krieg T., Oeff M. Home telemonitoring in patients with chronic heart failure // Deutsches Ärzteblatt International. 2010. Vol. 107(8). -Pp. 131–138. https://doi.org/10.3238/arztebl.2010.0131.

[17] Paradiso R., Loriga G., Taccini N. A Wearable Health Care System Based on Knitted Integrated Sensors // IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine. 2005. V. 9, N. 3. -P. 337-344.

[18] Winters J., Wang Y. Wearable Sensors and Telerehabilitation // IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. 2003. No. 3. -Pp. 56-65.

[19] Suyatinov S.I. Criteria and Method for Assessing the Functional State of a Human Operator in a Complex Organizational and Technical System // Global Smart Industry Conference (GloSIC). Chelyabinsk, Russia. 2018. P. 1-6. https://doi.org/10.1109/GloSIC.2018.8570088

[20] Булдакова Т.И., Игнатьева Е.В., Ляпина Н.С., Суятинов С.И. Оценка состояния человека и выделение групп риска развития хронических заболеваний // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2011. Т. 10. № 2. -С. 391-395.

[21] S. Suyatinov, “Bernstein’s Theory of Levels and Its Application for Assessing the Human Operator State,” in Dolinina O. at al. (Eds.) Recent Research in Control Engineering and Decision Making. ICIT-2019. Studies in Systems, Decision and Control. Vol. 199. Pp. 298-312. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12072-6_25

[22] Venkatasubramanian K.K., Banerjee A., Gupta S.K.S. PSKA: Usable and secure key agreement scheme for body area networks // IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine . 2010. Vol. 14(1). -Pp. 60-68.

[23] Suresh P. Survey on seven layered architecture of OSI model // International Journal of research in computer applications and robotics. 2016. Vol. 4, Issue 8. -Pp. 1-10.

[24] Chaturvedi A., Verma P. Popularly Used Security Protocols on All Layers of Network Communication // International Journal of Trend in Scientific Research and Development. 2018. Vol. 2, issue 2. -Pp.81-87. http://www.ijtsrd.com/papers/ijtsrd8312.pdf

[25] Banerjee A., Gupta S.K.S., Venkatasubramanian K.K. PEES: Physiology-based End-to-End Security for mHealth // Proceedings of the 4th Conference on Wireless Health. 2013. Article No. 2.

Формализованное описание шифрования сообщений в мессенджерах с использованием теории автоматов

Веселова М.Д.
Пензенский Государственный Университет
ул.Красная 40
440026, Пенза, Россия
marina_veselova58@mail.ru

Забродина К.А.
Пензенский Государственный Университет
ул.Красная 40
440026, Пенза, Россия
kzabrodina1999@gmail.com

Сафронова В.С.
Пензенский Государственный Университет
ул.Красная 40
440026, Пенза, Россия
valer.safronova@gmail.com

Пучкова У.Н.
Пензенский Государственный Университет
ул.Красная 40
440026, Пенза, Россия
u.puchkova2807@gmail.com

Пащенко Д.В.
Пензенский Государственный Технологический Университет
проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11
440039, Пенза, Россия
dmitry.pashchenko@gmail.com

Синев М.П.
Пензенский Государственный Университет
ул.Красная 40
440026, Пенза, Россия
mix.sinev@gmail.com

Трокоз Д.А.
Пензенский Государственный Университет
ул.Красная 40
440026, Пенза, Россия
dmitriy.trokoz@gmail.com

Мартышкин А.И.
Пензенский Государственный Технологический Университет
проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11
440039, Пенза, Россия
alexey314@yandex.ru

***Abstract* — This article describes the method of end-to-end encryption of messages in messaging apps using the automata theory, which are necessary for the visual representation of this mechanism. Interpretation of end-to-end encryption on event non-deterministic automaton allows to implement these methods not only by software, but also by hardware. Since at the present time there is a high probability of loss and falsification of personal data of users and storing the correspondence in a decrypted form on the network, such software methods of message encryption as symmetric and asymmetrical are used now; the distinctive features of each of which were described in this article. On the basis of these encryption methods, two protocols, which are the most reliable and frequently used in modern messaging apps, were considered. In one of the methods, a serious vulnerability was found. It is missing in another protocol due to the use of Double Ratchet and triple Diffie–Hellman. This vulnerability was described in this article. In the analysis of the protocols, the Diffie-Hellman algorithm and the AES-256 standard were detailed. The AES-256 standard is represented by a form of mathematical model using the automata theory, on the basis of which a hardware implementation of the encryption mechanism is possible.**

Ключевые слова — протокол, алгоритм Диффи-Хеллмана, стандарт шифрования AES-256, недетерминированный событийный автомат, открытый ключ, закрытый ключ, кодирование, дешифровка, симметричное шифрование, асимметричное шифрование.

I. Введение

Целью данной статья является формализация алгоритма шифрования сообщений с использованием математического аппарата событийно недетерминированных автоматов (далее – СНДА), который позволит проводить исследования процессов функционирования сложных распределенных информационных систем, на примере интернет-мессенджеров.

С развитием информационных технологий возрастает необходимость улучшения надежности защиты информации при передаче данных через сеть с помощью криптографических протоколов, связанных с системами обмена мгновенными сообщениями [1]. Это обусловлено тем, что велика вероятность утечки личных данных из-за увеличения роста кибератак [2]. В связи с этим разработчики мессенджеров при передаче сообщений стали использовать различные способы шифрования, к которым можно отнести симметричные и асимметричные алгоритмы [3].

Симметричное шифрование представляет собой такой алгоритм, при котором используется один и тот же пароль как для шифрования, так и для дешифрования. Поэтому необходимо предусмотреть максимальную сложность и безопасность пароля при его распространении между собеседниками [4]. Схема реализации механизма этого алгоритма: генерируется ключ для двух абонентов (источника и приемника), при помощи которого сообщение от пользователя - источника будет зашифровано. На выходе, при наложении пароля на передаваемую информацию, получается зашифрованный текст, который отправляется пользователю - приемнику. Получив сообщение, клиент расшифровывает информацию с помощью сгенерированного ранее ключа. Преимущества данного метода заключаются в низкой технической нагрузке, высокой скорости реализации и простоты протекания процесса. Однако у этого алгоритма есть существенные недостатки: возникает сложность в управлении обменом ключами в сети, необходимость поиска надежного канала для передачи ключа пользователям, отсутствие цифровой подписи и сертификатов [5].

Исходя из вышеописанных недостатков данного алгоритма, возникает потребность в более надежном методе шифрования. Для решения данной проблемы был создан асимметричный алгоритм, в котором у каждого пользователя беседы генерируются два ключа: открытый, необходимый для шифрования передаваемой информации, и закрытый, используемый только для

Данная статья была профинансирована РФФИ в соответствии с исследовательским проектом № 19-07-00516.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

расшифровки сообщения. Перед тем, как информация будет зашифрована, пользователю - приемнику приходит запрос от пользователя - отправителя на получение открытого ключа. Далее сообщение шифруется на устройстве клиента-отправителя с помощью полученного ключа. Процесс дешифровки происходит на устройстве клиента - получателя закрытым ключом.

Реализация данных алгоритмов отображена на рис. 1 [6].

Рис. 1. Схема симметричного и асимметричного шифрования

Однако, этого становится недостаточно. Для гарантии максимальной конфиденциальности и надежной передачи особо важных данных начали использоваться секретные чаты [7].

Подобные чаты отличаются от обычных тем, что передача информации происходит от источника к приемнику без использования облачного хранилища. Доступ к сообщениям имеют только участники беседы, и только на тех устройствах, где она была создана.

Такого рода технология шифрования называется End-to-End Encryption (E2EE) или сквозное шифрование [8]. Данный алгоритм основывается на локальном использовании криптографических ключей на устройствах клиентов и предусматривает, что переписку контролируют исключительно пользователи, состоящие в беседе, и расшифровать передаваемые данные третьи лица, в том числе и сервер, не смогут. E2EE, оперируя протоколами, совмещает в себе оба вида шифрования: симметричное и асимметричное. Одним из видов такого типа криптографических протоколов является MTProto [9].

II. Протокол обмена сообщениями MTProto

Принцип работы симметричного MTProto основывается на таких фундаментальных алгоритмах шифрования как протокол Диффи-Хеллмана и AES (Advanced Encryption Standard) [10]. В его основе лежит генерация общего секретного ключа, на основе которого кодируется информация, передаваемая от одного пользователя к другому [11].

На первом этапе пользователем-отправителем «Sender» осуществляется генерация двух чисел basis и prime_number (pn), которые не являются засекреченными. Также «Sender» придумывает число private_key_sender (pk_s), на основании которого вычисляет public_key_s (1).

$$public\_key\_s = basis^{pk\_s} \bmod pn \quad (1)$$

Затем пользователю-получателю «Recipient» посредством сервера передаются параметры public_key_s, pn, basis. На основе полученных данных «Recipient» генерирует private_key_recipient и вычисляет public_key_r (2).

$$public\_key\_r = basis^{pk\_r} \bmod pn \quad (2)$$

После того, как получателем будет сформирован и отправлен пакет данных, каждая сторона производит подсчет общего секретного ключа, на основании данных, которые были переданы друг другу: ключ отправителя (3), ключ получателя (4).

$$secret\_key = public\_key\_r^{\,pk\_s} \bmod pn \quad (3)$$

$$secret\_key = public\_key\_s^{\,pk\_r} \bmod pn \quad (4)$$

Рассмотренный выше протокол Диффи-Хеллмана между пользователями, отображенный на рис. 2, является довольно надежным, благодаря возможности при каждой сессии передачи информации изменять общий секретный ключ, генерируя новое собственное значение, что позволяет сохранить приватность переписки, так как при потере ключа возможно скомпрометировать только текущий сеанс [12].

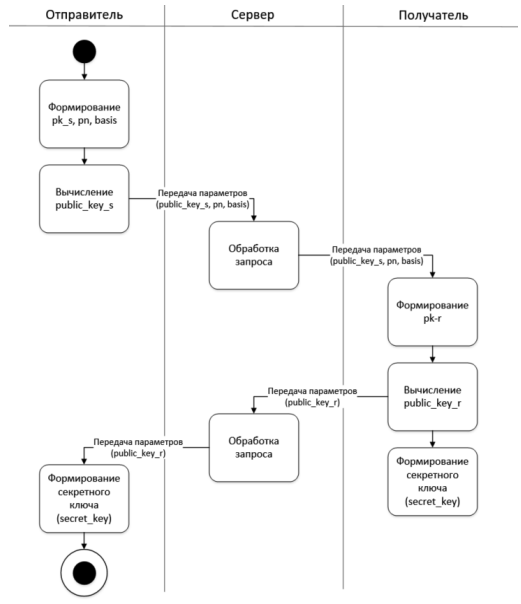


Рис. 2. Диаграмма деятельности формирования секретного ключа при помощи протокола Диффи-Хеллмана

Секретный ключ размером 128 бит, сформированный на основании вышеизложенного алгоритма, и 128-битный KDF (key derivation function), включающий в себя хешированную информацию о пакете передаваемых данных и secret_key, сгенерированный по алгоритму Диффи-Хеллмана, используются для кодирования сообщений актуальным ключом размером 256 бит с помощью стандарта AES-256. Симметричный алгоритм блочного шифрования основан на оперировании битами, которые интерпретируются в виде блочных элементов размером 128 бит. Блок данных в виде матрицы представлен на рис. 3 [13].

St_{00}	St_{01}	St_{02}	St_{03}
St_{10}	St_{11}	St_{12}	St_{13}
St_{20}	St_{21}	St_{22}	St_{23}
St_{30}	St_{31}	St_{32}	St_{33}

Рис. 3. Блок данных в виде матрицы

Кодирование блока не зависит от информации, содержащейся в других блоках. Процесс обновления элементов в матрице происходит после каждой обработки предыдущего блока, что дает возможность параллельного шифрования ячеек матрицы.

Достоинством данного стандарта является высокий уровень надежности закодированных данных ввиду огромных временных затрат на подбор необходимого секретного ключа.

После чего зашифрованные сведения вместе с общим секретным ключом и хешированной информацией о пакете, предназначенной для проверки зашифрованного сообщения при декодировании, передаются пользователю-получателю при помощи транспортного протокола (http, tcp, udp) [14].

III. Нахождение уязвимостей в секретных чатах

Несмотря на надежность, благодаря которой данный протокол популярен, он обладает существенной уязвимостью, вытекающей из-за отсутствия аутентификации между участниками секретного чата [15].

Ввиду вышеописанного недостатка при формировании секретного ключа пользователями третье лицо может внести свои корректировки в передаваемые данные от «Sender». Допустим, третьим лицом был получен доступ к секретному чату между «Sender» и «Recipient». При попытке одного из пользователей отправить сообщение другому, «Server» в период создания общего секретного ключа перехватывает передаваемые параметры от «Sender». Формируя собственные секретные числа отправителя (pk_s_S) и получателя (pk_r_S), кроме того, заменяет значение, вычисляемое «Sender» на результат собственных вычислений public_key_s_S (5).

$$public\_key\_s\_S = basis^{pk\_s\_S} \bmod pn \quad (5)$$

Подобным образом «Server» получает и модифицирует значение «Recipient» public_key_r_S (6), адресованное «Sender».

$$public\_key\_r\_S = basis^{pk\_r\_S} \bmod pn \quad (6)$$

Модифицированные данные «Server» отправляет пользователям, на основе которых, «Server» становится известны засекреченные ключи отправителя secret_key_s (7) и получателя secret_key_r (8).

$$secret\_key\_s = public\_key\_s^{\,pk\_s} \bmod pn \quad (7)$$

$$secret\_key\_r = public\_key\_r^{\,pk\_r} \bmod pn \quad (8)$$

Таким образом, происходит нарушение приватности обмена информацией, благодаря доступности к оперированию данными, передаваемыми в текущем сеансе. При этом пользователи чата не будут осведомлены об атаке, произошедшей в данный момент времени. Алгоритм данной атаки отражен с помощью диаграммы деятельности на рис. 4 [16].

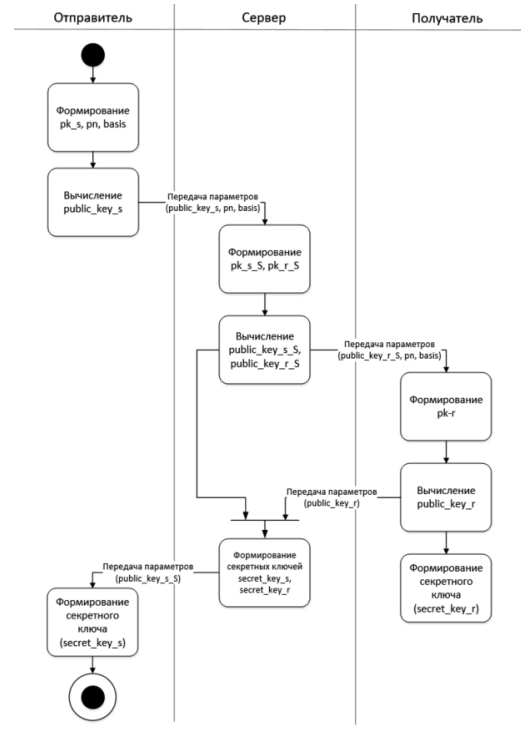


Рис. 4. Диаграмма деятельности атаки на протокол MTProto

Такого рода уязвимость приводит к утрате личных данных пользователей, к их подделке, хранению переписки в расшифрованном виде в сети.

Во избежание подобных ситуаций обмен информацией в некоторых мессенджерах происходит с помощью протокола Signal [17].

IV. Протокол обмена сообщениями Signal

Последовательность действий асимметричного Signal, как и в MTProto, основывается на таких фундаментальных алгоритмах шифрования как протокол Диффи-Хеллмана и AES (Advanced Encryption Standard). Однако, рассматриваемый алгоритм имеет существенную особенность – получение новых ключей обеими сторонами происходит с применением алгоритма Double Retchet [18].

Каждая сторона формирует два ключа: открытый и закрытый. По аналогии с асимметричным шифрованием «Sender» запрашивает открытый ключ «Recipient», который при помощи закрытого ключа по алгоритму Диффи-Хеллмана сформирует общий секретный ключ. Далее «Sender» передает свой открытый ключ «Recipient» для создания идентичного общего секретного ключа. После чего «Recipient», обновляя пару собственных ключей, возобновляет предыдущий цикл обмена. «Sender» в свою очередь, получая необходимую информацию от «Recipient», выполняет аналогичные действия. Каждая итерация цикла формирования общего секретного ключа называется шагом хроповика Диффи-Хеллмана. Таким образом происходит реализация принципа храпового механизма тройного Диффи-Хеллмана, изображенного на рис. 5.

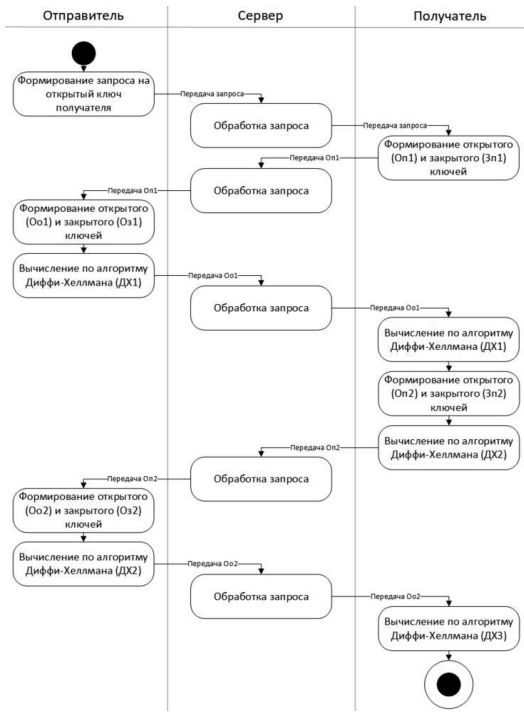


Рис. 5. Диаграмма деятельности храпового механизма тройного Диффи-Хеллмана

Общий секретный ключ проходит этап хеширования функцией KDF аналогично протоколу MTProto и является исходным корневым ключом, который является основой для общего секретного ключа следующей сессии и цепи ключей, позволяющих зашифровать или расшифровать пользователю сообщение в данной сессии. Алгоритм выполнения данного этапа, именуемый Double Retchet, отображен на рис. 6 [19].

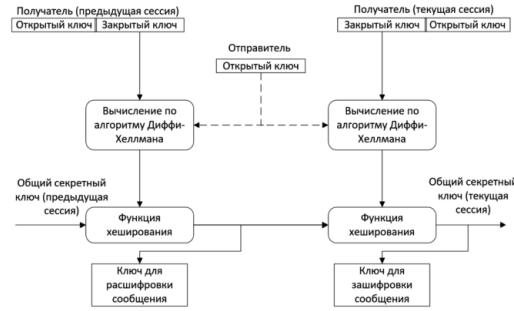


Рис. 6. Схема выполнения алгоритма Double Retchet

Дальнейшая кодирование и передача сообщения происходит подобно протоколу MTProto с использованием AES-256.

V. Математическая модель алгоритма стандарта шифрования AES-256.

AES-256 является основополагающим компонентом рассмотренных ранее протоколов передачи данных. Для наиболее наглядного представления алгоритмов шифрования с использованием СНДА была разработана его математическая модель, представленная на рис. 7.

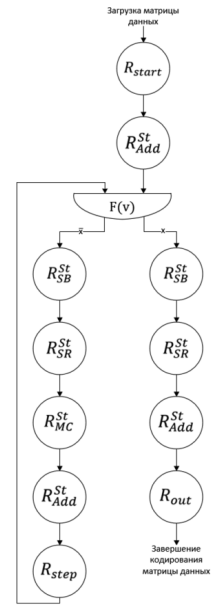


Рис. 7. Математическая модель алгоритма стандарта шифрования AES-256

Преимуществом использования такого подхода является наглядность процесса моделирования сложных систем, а также возможность применения автоматной модели при разработке аппаратной составляющей. Кроме того, достоинством таких моделей является их простота верификации, что является ключевым моментом при проектировании распределенных информационных систем, так как отклонение от заданного алгоритма может привести к серьезным последствиям, в том числе к сбою всей системы [20].

Ниже описаны условные обозначения, которые были использованы при построении данной модели управляющего автомата, который переходит в сигнальное состояние после выполнения соответствующих функций в операционном автомате.

St – побитовая матрица блока данных;

W – массив, содержащий ключ шифрования;

R_{start} – условное обозначение события, которое определяет начало выполнения процедуры;

R_{step} – событие, переходящее в сигнальное состояние по завершении инкремента счетчика раундов. Раундом является выполнение преобразования одного столбца матрицы блока данных;

R_{Add}^{St} – событие, которое символизирует выполнение трансформировании j-ого столбца матрицы данных, при помощи операции исключающего ИЛИ в операционном автомате по формуле:

$$St_j = St_j \oplus W \quad (9)$$

R_{SB}^{St} – событие, переходящее в сигнальное состояние, когда операционный автомат завершит обработку матрицы блока данных St, с использованием нелинейной таблицы замещения байтов. Данная таблица строится при помощи взятия обратного числа в поле Галуа:

$$St_j = St_i \oplus St_{(i+4) mod 8} \oplus St_{(i+5) mod 8} \oplus St_{(i+6) mod 8} \oplus St_{(i+7) mod 8} \oplus C_i \quad (10)$$

где C_i – константа i-ого бита;

R_{SR}^{St} – событие, символизирующее окончание трансформирования в операционном автомате i-ой строки матрицы при помощи циклического сдвига на i байт. При этом 0-вая строка остается неизменной;

R_{MC}^{St} – событие, символизирующее выполнение в операционном автомате обработки St_i, как полинома четвертой степени по формуле:

$$St_i = St_i \oplus C(x) \quad (11)$$

где

$$C(x) = 3x^3 + x^2 + x + 2 \quad (12),$$

при условии, что x = St[i:j];

R_{out} – событие, обозначающее завершение кодирования;

F(v) – вспомогательная функция, сигнализирующая достижение предпоследнего раунда.

X – вспомогательный сигнал, характеризующий состояние автомата, от которого зависит выход из раунда. При условии X = 0, цикл продолжается, при X = 1 подается сигнал завершения цикла, и автомат продолжает выполнять следующие процедуры.

Началом алгоритма шифрования является загрузка матрицы данных с последующей трансформацией первого столбца. После чего происходит выполнение циклической модификации остальных столбцов матрицы, исключая последний, количество которых пропорционально числу раундов цикла. По достижении последней итерации цикл завершается, и выполняется подобный список событий раунда, исключающий обработку столбца матрицы данных полиномом четвертой степени. Далее управляющий автомат сигнализирует о завершении шифрования матрицы данных.

В результате проделанных процедур на выходе получается закодированная матрица данных, которая в дальнейшем используется при шифровании информации на этапе выполнения алгоритма Диффи-Хеллмана.

VI. Заключение

В данной статье были рассмотрены протоколы обмена мгновенными сообщениями MTProto и Signal, основанные на симметричном алгоритме блочного шифрования AES-256, который является наиболее используемым стандартом кодирования на сегодняшний день. Для того, чтобы более детально представить механизм его работы, была описана математическая модель метода шифрования сообщений в мессенджерах с применением теории автоматов [21]. Кроме того, разработанное формализованное описание с использованием СНДА может быть применено и в смежных областях, например, для проектирования дискретного устройства кодирования данных и портирования разработанного программного обеспечения на аппаратные средства таких, как ПЛИС, что в дальнейшем позволит повысить уровень безопасности при передаче информации на физическом уровне [22].

Список литературы

[1] Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы // Учебник для вузов. 4-е изд. - СПб.: Питер, 2010. - С. 944.

[2] Е. В. Котух, В. М. Карташов, О. Г. Халимов, Д. П. Цапко, А. В. Самойлова Анализ современных требований к криптографическим примитивам нового поколения // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2015. – № 181. – С. 133 – 142.

[3] Алферов А. П., Зубов А. Ю., Кузьмин А.С., Черемушкин А. В. Основы криптографии // Учебное пособие. 3-е изд., испр. и доп. – М.: Гелиос АРВ. – 2005. – С. 480.

[4] Zhang Chuan-fu., et al. Cryptographic Key Agreement Protocol Simulation // Conference on Semantics, Knowledge and Grids. IEEE – 2010.

[5] Boyd, Colin Protocols for Authentication and Key Establishment // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2019. – P. 321

[6] Tutubalin P.I., et al. The Evaluation of the cryptographic strength of asymmetric encryption algorithms // Conference on Computer Technology and Applications (RPC). IEEE – 2017.

[7] Секретные чаты [Электронный ресурс]: URL: https://tgrm.su/blog/faq/sekretnyj-chat-v-telegram/ (дата обращения: 09.11.2018).

[8] R. Nelson, End-to-end encryption at the network layer // Annual Computer Security Applications Conference. IEEE – 2017.

[9] Job J., et al. A modified secure version of the Telegram protocol (MTProto) // Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT). IEEE – 2015.

[10] Jakobsen Jakob Bjerre A practical cryptanalysis of the Telegram messaging protocol // Aarhus Au University Department of Computer Science. – 2015. – P. 78.

[11] R.C.-W. Phan, Fixing the integrated Diffie-Hellman-DSA key exchange protocol // IEEE Communications Letters Vol. 9. IEEE – 2005, pp. 570-572

[12] Кабаков С.А., Александров О.Е. Криптографические алгоритмы. Алгоритм криптопреобразования // Екатеринбург: кафедра молекулярной физики УГТУ-УПИ. - 2007. - С.28.

[13] Алгоритм шифрования AES [Электронный ресурс]: URL: https://ppt-online.org/41728 (дата обращения: 09.11.2018).

[14] Семенов Ю.А. Алгоритмы телекоммуникационных сетей. Часть 2. Протоколы и алгоритмы маршрутизации в INTERNET // М.: Национальный Открытый Университет "ИНТУИТ". - 2016. – С.1004.

[15] Романцев Ю.В., Тимофеев П.А., Шаньгин В.Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях // Под ред. В.Ф.Шаньгина. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Радио и Связь. – 2001. – С. 376.

[16] Гома Х. UML. Проектирование систем реального времени, параллельных и распределенных приложений // Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс. – 2016. – С. 700.

[17] Belvin G. A Secure Text Messaging Protocol [Электронный ресурс]: URL: https://eprint.iacr.org/2014/036.pdf (дата обращения: 09.11.2018).

[18] A Formal Security Analysis of the Signal Messaging Protocol [Электронный ресурс]: URL: https://eprint.iacr.org/2016/1013.pdf (дата обращения: 09.11.2018).

[19] The Double Ratchet Algorithm [Электронный ресурс]: URL: https://signal.org/docs/specifications/doubleratchet/#ref-x3dh (дата обращения: 09.11.2018).

[20] Вашкевич Н. П., Бикташев Р. А. Достоинство формального языка, основанного на концепции недетерминизма, при структурной реализации параллельных систем логического управления процессами и ресурсами // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – №. 1.

[21] Pashchenko, D. V., et al. Directly executable formal models of middleware for MANET and Cloud Networking and Computing // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 710. No. 1. IOP Publishing. – 2016.

[22] Вашкевич Н. П. Недетерминированные автоматы в проектировании систем параллельной обработки. – 2004.

Моделирование процесса торможения наноспутника с помощью электродинамической тросовой системы

Воеводин П.С.
Самарский национальный исследовательский университет им.академика С.П. Королева,
Самара, Россия
p.voevodin@inbox.ru

Заболотнов Ю.М.
Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева,
Самара, Россия
yumz@yandex.ru

***Abstract* — The problem of modeling the braking process of a nanosatellite using a current-conducting tether is considered. The task is related to the actual problem of removing nanosatellites from space that have exhausted their life without the use of jet engines. The interaction of the conducting current of the tether with the magnetic field of the Earth leads to the appearance of the ampere (Lorentz) force, which provides braking of the system and a steeper trajectory of the nanosatellite entry into the dense layers of the atmosphere. Modeling and analysis of the braking system is carried out in two models: the model for a straight tether and the model with distributed parameters, in which the tether is represented by a set of material points. Comparison of the considered equations of motion of the system in terms of estimating the increments of the orbital parameters of the system is considered. The relative influence of aerodynamic forces and ampere forces on the braking process of the system is estimated by the method of mathematical modeling. As an example, a numerical simulation of the motion of an electrodynamic tether system with an bare tether in the earth's magnetic field is considered.**

Ключевые слова — электродинамическая тросовая система, сила Ампера, наноспутник, неизолированный проводящий трос, торможение наноспутника

I. Введение

Одно из направлений полезного применения космических тросовых систем это возможность изменения орбитальных параметров с помощью проводящих ток тросов [1]. Взаимодействие проводящих тросов с магнитным полем Земли (в перспективе с магнитными полями других планет) приводит к возникновению силы Ампера, которая, действуя на систему в целом, изменяет орбиту ее центра масс. Электродинамические тросовые системы (ЭДТС) могут функционировать в пассивном и активном режимах [1]. При движении в магнитном поле в проводнике (тросе) возникает электродвижущая сила (ЭДС) индукции, которая является причиной возникновения электрического тока определенного направления. Сила Ампера, действующая на элементарный участок троса, определяется известной формулой

$$\mathbf{F} = I\,\boldsymbol{\tau} \times \mathbf{B} \qquad (1)$$

где I – величина тока, $\mathbf{B}$ – вектор магнитной индукции, $\boldsymbol{\tau}$ – единичный вектор, направленный по касательной к тросу.

В пассивном режиме использование ЭДТС приводит к возникновению силы (1), тормозящей движение системы по орбите [1–5]. Активный режим функционирования ЭДТС соответствует случаю, когда наряду с ЭДС индукции имеется еще управляющая разность потенциалов [1], которая возникает за счет бортовых источников энергии концевых тел, и с помощью которой можно изменять величину и направление тока в тросе, а значит, и направление действия силы (1). Тем самым можно не только тормозить орбитальное движение, но и осуществлять стабилизацию орбитальных параметров или переводить систему на более высокую орбиту. Перспективность применения ЭДТС в космосе подтверждает тот факт, что до настоящего времени проведено уже более десятка реальных тросовых экспериментов с проводящими ток тросами на околоземных орбитах [3].

Здесь рассматривается задача торможения спутника на околоземной орбите. Анализируется динамика ЭДТС, использующей проводящий трос, взаимодействующий с окружающей его плазмой. Концепция использования проводящего троса для торможения и удаления с орбиты малых космических аппаратов и наноспутников рассматривалась во многих работах, например, [2–6]. В работе [6] получена достаточно простая модель распределения тока по неизолированному тросу на орбите. Используя результаты [6], в [3–4] оценена эффективность применения рассматриваемого подхода для удаления из космоса отработавших свой ресурс наноспутников. При этом использовались достаточно простые модели движения ЭДТС, не учитывающие продольные и изгибные колебания троса.

В настоящей работе разработаны две модели движения с разной степенью детализации описывающие движение системы. В обеих моделях в совокупность внешних сил входят: гравитационные, электромагнитные и аэродинамические силы. Причем электромагнитные и аэродинамические силы рассматриваются как распределенные по длине троса нагрузки. В первой модели трос считается невесомым и нерастяжимым, и приближается прямой линией, соединяющей концевые тела. Вторая модель движения ЭДТС позволяет оценить влияние изгибных и продольных колебаний троса на динамику системы. Эту модель можно рассматривать как модель с распределенными параметрами, так как в этом случае трос представляется совокупностью материальных точек с некоторой дискретностью. Рассматриваемая модель

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

движения ЭДТС позволяет оценить влияние многих допущений, принятых в первой модели, на динамику движения системы. Здесь можно отметить: прямолинейность троса, его нерастяжимость, отсутствие эффектов провисания троса, постоянство вектора магнитной индукции в пределах системы, малые размеры системы по сравнению с расстоянием до притягивающего центра и др. Проведенные исследования динамики движения ЭДТС иллюстрируются численным примером расчета движения системы с неизолированным проводящим тросом (пассивный режим использования ЭДТС).

II. Математическая модель движения системы с прямолинейным тросом

Уравнения, описывающие колебания ЭДТС относительно центра масс, записываются в правой орбитальной прямоугольной системе координат $C_o x_o y_o z_o$ (рис.1), начало которой совпадает с центром масс системы, ось $C_o x_o$ направлена по его радиус–вектору $\mathbf{R}_c$, ось $C_o y_o$ – перпендикулярно $\mathbf{R}_c$ и направлена в сторону орбитального движения. Положение троса относительно системы координат $C_o x_o y_o z_o$ определяется углами θ, φ, направления отсчета которых показаны на рис.1. Соответственно с тросом связана система координат $C_o x_t y_t z_t$ (рис.1).

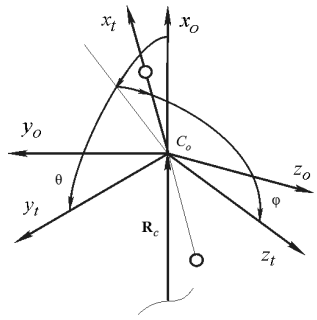


Рис. 1. Системы координат

Для случая прямолинейного невесомого троса уравнения движения ЭДТС относительно центра масс представляют собой частный случай уравнений, полученных в [7], если пренебречь изгибной деформацией троса

$$\begin{aligned} &\ddot{\theta}+\dot{\omega}-2\left(\dot{\theta}+\omega\right)\dot{\varphi}\,\mathrm{tg}\varphi+ \\ &\quad +1.5\nu^{-1}\omega^2\sin 2\theta = Q_\theta / J\cos^2\varphi \\ &\ddot{\varphi}+0.5\left(\dot{\theta}+\omega\right)^2\sin 2\varphi+ \\ &\quad +1.5\nu^{-1}\omega^2\cos^2\theta\sin 2\varphi = Q_\varphi / J \end{aligned} \qquad (2)$$

где $\nu = 1+e\cos\vartheta$, e и ϑ – эксцентриситет орбиты и истинная аномалия, $\omega = \dot{\vartheta} = \left(K/p^3\right)^{0.5}\nu^2$, $\dot{\omega} = \ddot{\vartheta} = -2K\nu^3 e\sin\vartheta / p^3$, p и K – параметр орбиты и гравитационная постоянная Земли, Q_θ, Q_φ – обобщенные силы, $J = m_e L^2$ – момент инерции ЭДТС относительно своего центра масс, $m_e = m_a m_b / \left(m_a + m_b\right)$ – приведенная масса. Здесь m_a, m_b – массы концевых тел, L – длина троса.

Уравнения (2) нетрудно обобщить на случай весомого прямолинейного троса. Для этого достаточно определить момент инерции J учетом массы троса как в [8]. Тогда

$$J = \left[m_a m_b + m_t\left(m_a + m_b\right)/3 + m_t^2/12\right]L^2/m_s \qquad (3)$$

где m_t – масса троса, $m_s = m_a + m_b + m_t$.

Обобщенные силы Q_θ, Q_φ определяются стандартным способом из выражений

$$Q_\theta = \delta A_\theta / \delta\theta,\ Q_\varphi = \delta A_\varphi / \delta\varphi \qquad (4)$$

где $\delta A_\theta, \delta A_\varphi$ – работы моментов сил на возможных перемещениях $\delta\theta, \delta\varphi$.

Фактически обобщенные силы (4) представляют собой проекции главного вектора моментов всех рассматриваемых сил соответственно на оси $C_o z_o$ и $C_o y_t$ (рис.1).

При определении обобщенных сил Ампера будем считать, что вектор магнитной индукции $\mathbf{B}$ не изменяется в пределах ЭДТС и определяется в центре масс системы, то есть $\mathbf{B} = \mathbf{B}_{co}$. Причем при вычислении сил Ампера (1) здесь будем использовать модель магнитного поля Земли (прямой диполь) вида [1]

$$\mathbf{B} = B_o\left[\mathbf{e}_z - 3\left(\mathbf{e}_z\cdot\mathbf{e}_R\right)\mathbf{e}_R\right] \qquad (5)$$

где $B_0 = \mu / R_c^3$, $\mu = 8\cdot 10^6\,\text{Тл}\,\text{км}^3$ – магнитный момент земного диполя, $\mathbf{e}_R = \mathbf{R}_o / R_c$, $\mathbf{e}_z$ – единичный вектор, направленный по оси вращения Земли, $\left(\mathbf{e}_z\cdot\mathbf{e}_R\right)$ – скалярное произведение.

Для сил Ампера (1) вектор момента относительно центра масс системы записывается в виде

$$\mathbf{M}_s = \Delta\mathbf{r}\times\mathbf{F}_s \qquad (6)$$

где $\Delta\mathbf{r}$ – радиус–вектор точки приложения равнодействующей силы относительно центра масс системы, $\mathbf{F}_s$ – вектор равнодействующей сил Ампера

Так как здесь используется предположение о прямолинейности троса и полагается $\mathbf{B} = \mathbf{B}_{co}$, то все элементарные силы (1) имеют одно направление. Поэтому равнодействующая сил Ампера определяется интегрированием по длине троса в виде

$$\mathbf{F}_s = I_s(L)\boldsymbol{\tau}\times\mathbf{B} \qquad (7)$$

где $I_s(s)=\int_0^L I(s)ds$. Причем за положительное направление тока (направление вектора $\boldsymbol{\tau}$) обычно принимают направление от нижнего концевого тела к верхнему.

Вектор $\Delta\mathbf{r}$, направленный вдоль троса, определяется выражением $\Delta\mathbf{r}=\Delta r\,\boldsymbol{\tau}$, где $\Delta r = s_{cm}-\Delta_a$, $s_{cm}=\left(m_b+m_t/2\right)L/m_s$ – величина, определяющая положение центра масс системы относительно анода; $\Delta_a=\int_0^L sI(s)ds/I_s(L)$ – расстояние между точкой приложения равнодействующей сил Ампера и верхним концевым телом.

Аэродинамические силы, действующие на концевые тела троса, определяются из выражений

$$\mathbf{R}_{a,c}=-C_{a,c}\rho_a S_{a,c}V_{a,c}\mathbf{V}_{a,c}/2 \qquad (8)$$

где $C_{a,c}$ – коэффициенты аэродинамических сил, $S_{a,c}$ – характерные площади, $\mathbf{V}_{a,c}$ – векторы скоростей концевых точек, ρ_a – плотность атмосферы, зависящая от высоты.

Векторы скоростей $\mathbf{V}_{a,c}$ определяются следующим образом

$$\mathbf{V}_{a,c}=\boldsymbol{\omega}_o\times\mathbf{r}_{a,b}+\boldsymbol{\omega}_r\times\Delta\mathbf{r}_{a,b} \qquad (9)$$

где $\boldsymbol{\omega}_o$ – вектор угловой скорости вращения орбитальной системы координат $C_o x_o y_o z_o$, $\mathbf{r}_{a,b}$ – радиус–вектора концевых точек системы в геоцентрической системе координат, $\mathbf{r}_{a,b}$ – радиус–вектора концевых точек относительно центра масс системы, $\boldsymbol{\omega}_r$ – вектор угловой скорости вращения системы координат $C_o x_t y_t z_t$, связанной с тросом, относительно системы координат $C_o x_o y_o z_o$. В соответствии с рис.1 в системе координат $C_o x_o y_o z_o$ имеем $\boldsymbol{\omega}_r=\left(-\dot\varphi\sin\theta,\dot\varphi\cos\theta,\dot\theta\right)^T$, где (T) – знак транспонирования.

При определении аэродинамических сил в данном случае пренебрегается вращением атмосферы, то есть абсолютные скорости (9) концевых точек равны их скоростям относительно атмосферы.

Аэродинамическая сила, действующая на трос, определяется посредством разбиения троса на N участков (цилиндров) с последующем их суммированием по длине троса. Тогда

$$\mathbf{R}_t=-\frac{1}{2}C_t D_t L\sum_{i=1}^{N}\rho_{ai}V_i\sin\alpha_i\mathbf{V}_i \qquad (10)$$

где C_t – коэффициент аэродинамического сопротивления цилиндра, D_t – диаметр троса, ρ_{ai} и $\mathbf{V}_t$ – плотность атмосферы и вектор скорости, определенные для средней точки участка; $\alpha_i\in[0,\pi]$ – пространственный угол атаки i –ого участка, определяемый из скалярного произведение $(\boldsymbol{\tau}\cdot\mathbf{V}_i)$. При определении аэродинамической силы (10) в свободно молекулярном потоке газа используется гипотеза о диффузном отражении молекул. Поэтому сила (10) направлена противоположно вектору скорости [8].

Для аэродинамических сил концевых точек вектора моментов определяются из выражений

$$\mathbf{M}_{a,b}=\Delta\mathbf{r}_{a,b}\times\mathbf{R}_{a,b} \qquad (11)$$

Для аэродинамических сил троса вектор момента также определяется суммированием по участкам троса

$$\mathbf{M}_t=-\frac{1}{2}C_t D_t L\sum_{i=1}^{N}\rho_{ai}V_i\sin\alpha_i\left(\Delta\mathbf{r}_i\times\mathbf{V}_i\right) \qquad (12)$$

где $\Delta\mathbf{r}_i$ – радиус-вектор средней точки участка троса относительно центра масс системы.

Суммарный вектор момента, по которому вычисляются обобщенные силы в уравнениях (2), определяется сложением выражений (6), (11) и (12).

Известно, что при отсутствии сил Ампера и аэродинамических сил тросовая система имеет два устойчивых положения равновесия в плоскости орбиты $\theta=0$ и $\theta=\pi$. При наличии этих сил и при достаточно малой их величине, система также будет иметь соответствующие положения равновесия, которые будут смещены относительно вертикали из-за действия моментов (6), (11) и (12).

С практической точки зрения, смещения положений равновесия должны быть по возможности небольшими, так как в этом случае влияние силы Ампера на изменение орбитальных параметров будет наибольшим. Так, например, для круговой экваториальной орбиты вектор $\mathbf{F}_s$ при пассивном торможении будет в этом случае почти параллелен вектору скорости центра масс системы, и направлен в противоположную сторону.

Для экваториальной круговой орбиты положения равновесия определяются из уравнений (2) и имеют вид ($\varphi=\dot\varphi=0$)

$$\theta_1=\arcsin(\sigma)/2,\ \theta_2=\theta_1+\pi \qquad (13)$$

где $\sigma=2Q_{\theta o}/3J\omega^2$, $Q_{\theta o}$ – обобщенная сила Q_θ , вычисленная при $\varphi=\dot\varphi=e=i=0$.

Очевидно, что условие существования вертикальных положений равновесия (условие статической устойчивости) будет иметь вид $|\sigma|<1$. Когда $e\neq 0$ на систему будут действовать периодическое возмущение,

связанное с изменением угла истинной аномалии ϑ. Если $i \neq 0$, то также будут иметь место периодические возмущения, связанные с изменением угла φ, причем даже тогда, когда в начальный момент времени $\varphi = \dot{\varphi} = 0$.

При использовании уравнений движения ЭДТС относительно центра масс (2) уравнения движения центра масс записываются в оскулирующих элементах [10].

III. Распределение тока по неизолированному тросу

Закон распределения тока по неизолированному проводящему тросу, движущемуся в магнитном поле Земли, был определен в работе [6]. В соответствии с этой работой распределение тока определяется при решении следующих дифференциальных уравнений

$$\frac{dj}{d\xi} = \frac{3}{4}\sqrt{\phi}, \quad \frac{d\phi}{d\xi} = j - 1 \tag{14}$$

где $j = I / I_*$, $\phi = \Delta V / V_*$ – безразмерные величины, определяющие ток и изменение потенциала вдоль троса в зависимости от относительной координаты $\xi = s / L_*$.

Характерные величины I_*, V_*, L_* определяются следующим образом [6]

$$L_* = \left(\frac{9\pi m_e \eta^2 E_m S_t}{128 |q_e^3| n^2} \right)^{1/3}, \; V_* = E_m L_*, \; I_* = \eta E_m S_t \tag{15}$$

где m_e и q_e – масса и заряд электрона, S_t – площадь поперечного сечения троса, η – электропроводимость материала троса, n – концентрация плазмы, зависящая от высоты орбиты; E_m – модуль напряженности электрического поля, возникающего при движении проводника в магнитном поле. Здесь ток I_* представляет собой ток короткого замыкания, то есть максимальный ток, поэтому $0 < j \leq 1$.

Вектор напряженности электрического поля определяется следующим образом [6]

$$\mathbf{E}_m = \mathbf{V}_r \times \mathbf{B} \tag{16}$$

где $\mathbf{V}_r$ – скорость элемента троса относительно магнитного поля Земли. Здесь предполагается, что магнитное поле вращается вместе с Землей. Для уравнений движения троса (2), (4.1)–(4.6) скорость $\mathbf{V}_r$ определяется в центре масс ЭДТС.

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{V}_c - \boldsymbol{\omega}_e \times \mathbf{R}_c \tag{17}$$

где $\mathbf{V}_c$ – абсолютная скорость центра масс, $\boldsymbol{\omega}_e$ – вектор угловой скорости Земли.

При постоянных величинах (15) уравнения (14) можно проинтегрировать [6] в квадратурах методом разделения переменных. При этом получается следующие формулы, которые определяют алгоритм вычисления распределения тока по тросу

$$j(\phi) = 1 - \left[1 + \left(\phi^{3/2} - \phi_a^{3/2} \right) \right]^{1/2} \tag{18}$$

$$\xi(\phi) = \int_{\phi}^{\phi_a} \left[1 + \left(\phi^{3/2} - \phi_a^{3/2} \right) \right]^{1/2} d\phi \tag{19}$$

где $\phi_a = \left(2 j_o - j_o^2 \right)^{2/3}$ – относительная разность потенциалов на аноде, j_o – относительная величина тока в точке нулевого потенциала $\phi = 0$. Здесь (19) определяет распределение разности потенциалов по длине троса ξ, в соответствии с которым вычисляется распределение тока (18). При этом величина j_o рассматривается как заданный параметр, характеризующий свойства анода.

Величина тока в точке A (аноде, верхнем теле) $j_a = 0$ и увеличивается с увеличением расстояния до точки D – точке нулевого потенциала $\phi = 0$, положение которой определяется из соотношения (18) при $\phi = 0$, то есть $\xi_d = \xi(0)$. При $\xi_d \leq \xi \leq \xi_b$, где $\xi_b = L / L_*$ – безразмерная длина троса, ток можно принять приблизительно постоянным [6]. При достаточно большой длине троса $0 < \xi_d \leq \xi_b$, иначе максимальная величина тока достигается в точке B (на катоде, нижнем теле) в соответствии с распределением тока (18). Типичное распределение тока по тросу $I(s)$ (в Амперах) в зависимости от длины троса (в километрах) показано на рис.2, где приняты следующие исходные данные: высота круговой орбиты и ее наклонение 300км и $i = 0$, длина троса и его диаметр 2км и 1мм, электропроводимость материала $\eta = 3.4 \cdot 10^7$ ом$^{-1}$м$^{-1}$ (алюминий), концентрация плазмы $n = 10^{11}$ м$^{-3}$.

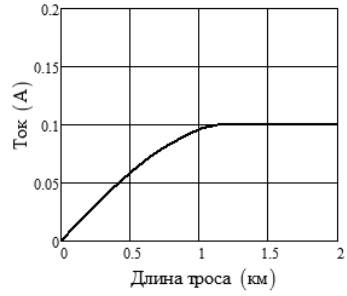


Рис. 2. Характерное распределение тока по длине троса

IV. Математическая модель движения системы, учитывающая деформацию троса

Для оценки влияния многих допущений, принятых при построении модели (2), используется более полная модель, которую можно назвать моделью с распределенными параметрами. В этом случае трос представляется дискретной совокупностью материальных точек, связанных между собой упругими односторонними механическими связями. Подобные модели использовались во многих работах, например, в [8,11,12]

$$m_k \ddot{\mathbf{r}}_k = \mathbf{G}_k + \mathbf{F}_k + \mathbf{R}_k + \mathbf{T}_k - \mathbf{T}_{k+1},\ k = 1,2,...N \qquad (20)$$

где $\mathbf{r}_k$ и m_k – радиус-вектор и масса k –ой материальной точки; $\mathbf{F}_k$ – сила Ампера, действующая на k –ую материальную точку; $\mathbf{T}_k$ – силы натяжения троса, действующие между k – ой и $k+1$ – ой точками и приложенные к k –ой точке; $\mathbf{G}_k$ – гравитационные силы; $\mathbf{R}_k$ – аэродинамическая сила, действующая на k –ую материальную точку. При записи системы (20) полагается, что $m_1 = m_a$, $m_N = m_b$.

Для определения $\mathbf{F}_k$ сначала вычисляются силы Ампера, действующие на k –ый участок троса

$$\Delta\mathbf{F}_k = I_k \left|\mathbf{r}_{k-1} - \mathbf{r}_k\right| \left(\boldsymbol{\tau}_k \times \mathbf{B}_k\right),\ \ k = 1,2,...N \qquad (20)$$

где I_k – величина тока на k – ом участке троса, $\mathbf{B}_k$ - вектор магнитной индукции, определенный середине отрезка троса; $\boldsymbol{\tau}_k = \left(\mathbf{r}_{k+1} - \mathbf{r}_k\right) / \left|\mathbf{r}_{k+1} - \mathbf{r}_k\right|$.

Распределение сил $\Delta\mathbf{F}_k$ по материальным точкам ЭДТС осуществляется следующим образом

$$\mathbf{F}_1 = \frac{\Delta\mathbf{F}_1}{2},\ \mathbf{F}_N = \frac{\Delta\mathbf{F}_{N-1}}{2},\ \mathbf{F}_k = \frac{1}{2}\left(\Delta\mathbf{F}_{k-1} + \Delta\mathbf{F}_k\right) \qquad (20)$$

где $k = 2,3,...N-1$.

При интегрировании системы (20) распределение тока по тросу вычисляется в соответствии формулами (18–19) так же, как для прямолинейного троса, то есть предполагается, что изгиб троса относительно мал.

По аналогичному алгоритму вычисляются аэродинамические силы $\mathbf{R}_k$. Аэродинамическая сила, действующая на k –ый участок троса, равна

$$\Delta\mathbf{R}_k = -C_t \rho_{ak} D_t \left|\mathbf{r}_{k-1} - \mathbf{r}_k\right| V_{rck} \mathbf{V}_{rck} / 2 \qquad (21)$$

где ρ_{ak} и $\mathbf{V}_{rck} = \left(\mathbf{V}_{r,k+1} + \mathbf{V}_{r,k}\right)/2$ – плотность атмосферы и вектор скорости относительно атмосферы, определенные для середины участка троса; $\mathbf{V}_{r,k} = \mathbf{V}_k - \boldsymbol{\omega}_e \times \mathbf{r}_k$, $\mathbf{V}_k = d\mathbf{r}_k / dt$.

Тогда

$$\mathbf{R}_1 = \Delta\mathbf{R}_1 / 2,\ \mathbf{R}_N = \Delta\mathbf{R}_{N-1} / 2,\ \mathbf{R}_k = \left(\Delta\mathbf{R}_{k-1} + \Delta\mathbf{R}_k\right) / 2 \qquad (22)$$

где $k = 2,3,...N-1$.

При использовании системы (20) гравитационные силы $\mathbf{G}_k$ (центральное ньютоновское поле) и силы натяжения троса $\mathbf{T}_k$ определяются так же, как в работе [8], где при растяжении применялся закон Гука, и рассматривалась односторонняя механическая связь между точками.

V. Моделирование движения ЭДТС

При моделировании были приняты параметры тросовой системы, приведенные в таблице I.

ТАБЛИЦА I. Параметры тросовой системы и орбит

Параметры	Значения
m_a, m_b	6 кг, 2 кг
L	2 км
Линейная плотность троса	0.2 кг/км
Жесткость троса	7000 Н
Высота начальной орбиты или перигея	1000 км
Эксцентриситет	0, 0.01
Наклонение	0, $\pi/3$
Диаметр троса	0.6 мм

Приращения большой полуоси за пять витков центра масс системы вокруг Земли для различных эксцентриситетов и наклонений орбит, вычисленных с использованием моделей (2) и (20) приводятся в таблице II.

ТАБЛИЦА II. Приращения большой полуоси орбиты

Параметры орбиты	Модель движения	
	(2)	(20)
$e = 0$ $i = 0$	-20.49 км	-22.61 км
$e = 0$ $i = \pi/3$	-10.49 км	-10.39 км
$e = 0.01$ $i = 0$	-20.05 км	-22.43 км
$e = 0.01$ $i = \pi/3$	-10.47 км	-10.10 км

Из анализа результатов моделирования (таблица II) следует, что модель движения, которая использует предположение о прямолинейности троса (2), позволяет оценивать приращение большой полуоси орбиты с погрешностью порядка 1% для орбит с наклонением $\pi/3$, и с погрешностью порядка 10% для экваториальных орбит. При этом эксцентриситет и другие параметры орбиты слабо изменяются. Однако здесь надо иметь в виду, что представленные расчеты относятся к сравнительно небольшим интервалам

времени (несколько витков). При рассмотрении больших интервалов времени необходимо учитывать неустойчивость движения ЭДТС относительно центра масс [13], которая не описывается моделью (2). В этом случае можно использовать модель, приближенно учитывающую деформацию троса [7] или модель с распределенными параметрами (20). Кроме того, необходимо применять методы стабилизации движения ЭДТС, основанные на различных подходах (пассивные или активные) [14–16]. Можно отметить, что зависимость большой полуоси от времени в рассматриваемых случаях носит линейный характер.

При движении ЭДТС относительно центра масс трос совершает изгибные колебания под действием распределенных нагрузок от сил Ампера и аэродинамических сил, периодически изгибаясь (в одном направлении) и выпрямляясь. В качестве примера на рис.3 показаны два предельных положений троса: положение, близкое к прямой, и с максимальным изгибом. Здесь необходимо отметить, что в отдельных случаях возможна синхронизация изгибных колебаний троса и его маятниковых колебаний относительно вертикали, что можно рассматривать как реализацию некоторого резонансного режима движения ЭДТС.

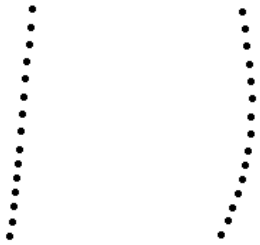


Рис. 3. Предельные положения троса в процессе колебаний

Представление об относительном влиянии рассматриваемых нагрузок для концевых тел системы небольшой массы (2 и 6 кг) и при длине троса 2 км дает рис.4, где приводится отношение модулей векторов аэродинамических сил и сил Ампера в зависимости от высоты круговой орбиты. На высоте 500 км сила Ампера приблизительно в пять раз больше аэродинамической силы, обратное отношение 1/5 имеет место на высоте 280 км (рис.4).

VI. Заключение

В работе проведен анализ процесса торможения наноспутников с помощью ЭДТС с неизолированным проводящим тросом. Для сравнения используются две модели с разной степенью детализации описывающие движение ЭДТС. Получены оценки приращений большой полуоси орбиты системы и показано, что модель с прямолинейным тросом можно использовать только на сравнительно небольших интервалах времени (несколько витков вокруг Земли). Произведено сравнение относительных значений аэродинамических и электродинамических сил, действующих на систему, в зависимости от высоты круговой орбиты.

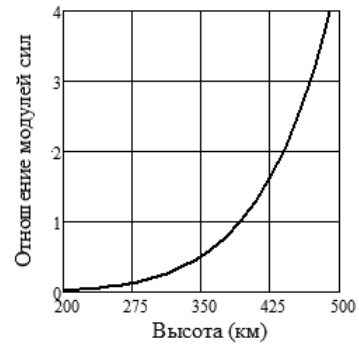


Рис. 4. Предельные положения троса в процессе колебаний

Список литературы

[1] Белецкий В.В., Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем. - М.: Наука, 1990. - 336 с.

[2] Levin E. M. Dynamic analysis of space tether missions. - San Diego: American Astronautical Society, 2007. - 453 p.

[3] Zhong R., Zhu Z.H. Dynamics of Nanosatellite Deorbit by Bare Electrodynamic Tether in Low Earth Orbit // J. of Spacecraft and Rockets, 2013. Vol. 50. № 3. - p.691-700.

[4] Zhong R., Zhu Z.H. Optimal Control of Nanosatellite Fast Deorbit Using Electrodynamic Tether // J. of Guidance, Control, and Dynamics, 2014. Vol. 37. № 4. - p.1182-1194.

[5] Bombardelli C., Zanutto D., Lorenzini E. Deorbiting performance of bare electrodynamic tethers in inclined orbits // J. of Guidance, Control, and DynamicsVolume,2013. Vol. 36. Issue 5. – p.1550-1555.

[6] Sánchez-Arriaga G., Bombardelli C., Chen X. Impact of Nonideal Effects on Bare Electrodynamic Tether Performance // J. of Propulsion and Power, 2015. Vol.31(3). – p.951-955.

[7] Воеводин П. С., Заболотнов, Ю. М., Моделирование и и анализ колебаний электродинамической тросовой системы на орбите спутника Земли // Матем. моделирование, 2017. №29(6). – с. 21–34.

[8] Заболотнов Ю.М. Управление развертыванием орбитальной тросовой системы, состоящей из двух малых космических аппаратов // Космич. исслед., 2017. Т.55. №3. - с.236–246.

[9] Аржанников Н.С., Садекова Г.С. Аэродинамика летательных аппаратов. - М.: Высшая школа, 1983. - 359 с.

[10] Охоцимский Д.Е., Сихарулидзе Ю.Г. Основы механики космического полета. - М.: Наука, 1990. - 448 с.

[11] Дигнат Ф., Шилен В. Управление колебаниями орбитальной тросовой системы // Прикладная математика и механика, 2000. Т.64. № 5. - с.747–754.

[12] Заболотнов Ю.М., Фефелов Д.И. Динамика движения капсулы с тросом на внеатмосферном участке спуска с орбиты // Известия СНЦ РАН, 2006. Т.8. № 3. - с.841–848.

[13] Pelaez J., Lorenzini T.C., Lopez-Rebollal O., Ruiz M. A new Kind of Dynamic Instability in Electrodynamic Tethers // J. Astronautical Sciences, 2000. Vol. 48(4). - p.449–476.

[14] Mantellato R., Pertile M., Colombatti G., Lorenzini E.C. Analysis of Passive System to Damp the Libration of Electrodynamic Tethers for Deorbiting // AIAA SPACE 2013 Conf. and Exposition. San Diego: AIAA, 2013. - p.1–9.

[15] Iñarrea M., Lanchares V., Pascual A.I., Salas J.P. Attitude Stabilization of Electrodynamic Tethers in Elliptic Orbits by Time–delay Feedback Control // Acta Astronautica, 2014. Vol .96. - p.280–295.

[16] Воеводин П.С., Заболотнов Ю.М. К задаче о стабилизации движения низкоорбитальной электродинамической тросовой системы // Известия РАН. Теория и системы управления, 2019. № 2. - с. 125–140.

Оптимальное оценивание линейного функционала переменных состояния динамической системы

Волков В.Г.
Научно-технический центр
ПАО «КАМАЗ»
Набережные Челны, Россия
vgvolkov93@mail.ru

Демьянов Д.Н.
Набережночелнинский институт
(филиал) ФГАОУ ВО «Казанский
(Приволжский) федеральный университет»
Набережные Челны, Россия
demyanovdn@mail.ru

***Abstract* — In the present paper, we consider the problem of constructing an observer that ensures optimal estimation of the linear functional of the state variables of a dynamic system. At the same time, the degree of influence of unknown initial conditions on the integral error of observation in the absence of an external disturbance (the level of initial disturbance rejection in the system) acts as a minimized criterion. We show that when a number of constraints are fulfilled, an observer can be used to solve the problem posed, the order of which is equal to the order of the estimated functional. We determine the conditions for the existence of such an observer and formulate linear matrix inequalities, the solution of which allows determining its matrix coefficients.**

Ключевые слова — динамическая система, переменные состояния, линейный функционал, ненулевые начальные условия, оптимальное оценивание, канонизация матриц, линейные матричные неравенства.

I. Введение

Одним из важнейших условий эффективного функционирования сложных систем автоматического управления является непрерывный контроль текущего состояния объекта управления. Достаточно часто для решения этой задачи используются различного рода наблюдатели состояния (если непосредственное измерение каких-либо переменных состояния слишком сложно или требует слишком больших затрат) или фильтры (если на систему действуют неизвестные внешние возмущения или показания датчиков существенно зашумлены). Кроме того, в ряде случаев наблюдатели состояния используются для косвенной оценки измеряемой величины: сопоставление измеренного и расчетного значений переменных позволяет сделать вывод о существенном изменении параметров системы или выходе из строя каких-либо датчиков [1].

Теория линейных асимптотических наблюдателей состояния в настоящее время достаточно хорошо разработана и подробно описана в соответствующей литературе [2, 3]. Чаще всего при расчете коэффициентов наблюдателя используются методы модального управления: подбираемая матрица наблюдений должна обеспечивать заданное расположение на комплексной плоскости собственных чисел матрицы динамики. Однако, с практической точки зрения такой подход не всегда является наиболее рациональным, так как при этом ненулевые начальные условия объекта могут существенно исказить формируемые оценки на начальном этапе. Для решения этой проблемы был предложен оптимизационный подход к проектированию наблюдателей, в рамках которого матрица наблюдений определяется исходя из условия минимизации влияния начальных возмущений на процесс оценивания [4, 5].

В настоящее время известны методики проектирования оптимальных наблюдателей полного порядка и наблюдателей Люенбергера. В рамках данной работы указанные результаты применены к задаче проектирования функциональных наблюдателей минимального порядка, используемых в тех случаях, когда оценивание полного вектора состояния системы по каким-либо причинам не требуется [6, 7].

II. Постановка задачи

Рассмотрим динамическую систему, заданную моделью в пространстве состояний:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu; \;\; x(0) = x_0; \\ y = Cx; \\ z = Kx. \end{cases} \tag{1}$$

Здесь $x \in R^n$ – вектор состояния; $u \in R^r$ – входной сигнал; $y \in R^m$ – измеряемый выход; $z \in R^p$ – целевой выход; A, B, C, K – заданные числовые матрицы.

Не умаляя общности, будем полагать, что $\operatorname{rank} C = m$, $\operatorname{rank} K = p$, $n > m + p$ (в противном случае использование функционального наблюдателя не имеет практического смысла – его порядок будет не меньше порядка наблюдателя Люенбергера).

Для формирования оценки целевого выхода $\hat{z}$ используется асимптотический функциональный наблюдатель, ошибка оценивания которого определяется по формуле:

$$\varepsilon(t) = \hat{z}(t) - z(t); \;\; \varepsilon(0) = \varepsilon_0 .$$

Для определения качества оценивания по аналогии с известными работами [4, 5] будем использовать

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 17-08-00516).

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

показатель γ_0 – уровень гашения начального возмущения, определяемый по формуле:

$$\gamma_0 = \sup_{\|\varepsilon_0\|\neq 0} \frac{\|\varepsilon\|}{\sqrt{\varepsilon_0^T R \varepsilon_0}}.$$

Здесь $R = R^T > 0$ – заданная весовая матрица.

Требуется: сформировать для системы (1) асимптотический функциональный наблюдатель порядка $p^* \le p$, обеспечивающий минимально возможное значение показателя γ_0.

III. Предварительные соотношения

Покажем, что задача построения функционального наблюдателя для оценки вектора z может быть сведена к построению функционального наблюдателя для оценки вектора z^* размерности $p^* \le p$ такого, что:

$$\begin{cases} z^* = K^* x; \\ \operatorname{rank}\begin{pmatrix} C \\ K^* \end{pmatrix} = m + p^*. \end{cases}$$

Пусть строки матриц C и K линейно-независимы, т.е. выполняется условие:

$$\operatorname{rank}\begin{pmatrix} C \\ K \end{pmatrix} = m + p. \qquad (2)$$

Очевидно, что в этом случае $p^* \equiv p$, $z^* \equiv z$.

Пусть условие (2) не выполняется, т.е. строки матриц C и K являются линейно-зависимыми:

$$\operatorname{rank}\begin{pmatrix} C \\ K \end{pmatrix} = m + p^*; \;\; p^* < p. \qquad (3)$$

Рассмотрим обобщенный вектор выхода Y системы (1), определяемый выражением:

$$Y = \begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C \\ K \end{pmatrix} x = \begin{pmatrix} C \\ K_1 \\ K_2 \end{pmatrix} x = \begin{pmatrix} C_K \\ K_2 \end{pmatrix} x. \qquad (4)$$

Здесь K_1 – первые p^* строк матрицы K; K_2 – оставшиеся $p - p^*$ строк матрицы K.

Осуществим невырожденное преобразование выходного сигнала:

$$Y^* = PY = \begin{pmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ P_1 & P_2 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C \\ K_1 \\ K_2 \end{pmatrix} x = \begin{pmatrix} C \\ K_1 \\ 0 \end{pmatrix} x = \begin{pmatrix} y \\ z_1 \\ 0 \end{pmatrix}. \qquad (5)$$

Здесь $z_1 = K_1 x$, а P – матрица преобразования, блоки P_1 и P_2 которой определяются из условия:

$$P_1 C + P_2 K_1 + K_2 = 0. \qquad (6)$$

Для решения полученного линейного матричного уравнения воспользуемся технологией канонизации матриц и методами решения линейных матричных уравнений произвольной размерности [8].

Общее решение уравнения (6) имеет вид:

$$\begin{pmatrix} P_1 & P_2 \end{pmatrix} = -K_2 \widetilde{C}_K + \delta \overline{C}_K^L. \qquad (7)$$

Здесь символом δ обозначена произвольная матрица соответствующей размерности.

Отметим, что решение (7) существует, только если выполняется условие разрешимости задачи:

$$C_K \overline{K}_2^R = 0. \qquad (8)$$

В выражениях (7), (8) и далее для произвольной матрицы M размера $m \times n$ и ранга r символом $\widetilde{M}^L$ обозначается ее левый канонизатор, $\overline{M}^L$ – левый делитель нуля, $\widetilde{M}^R$ – правый канонизатор, $\overline{M}^R$ – правый делитель нуля. Произведение $\widetilde{M}^R \widetilde{M}^L$ называется сводным канонизатором и обозначается $\widetilde{M}$. Совокупность матриц $\widetilde{M}^L$, $\overline{M}^L$, $\widetilde{M}^R$, $\overline{M}^R$ удовлетворяет равенству:

$$\begin{pmatrix} \widetilde{M}^L_{r,m} \\ \overline{M}^L_{m-r,m} \end{pmatrix} M \begin{pmatrix} \widetilde{M}^R_{n,r} & \overline{M}^R_{n,n-r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{r,r} & 0_{r,n-r} \\ 0_{m-r,r} & 0_{m-r,n-r} \end{pmatrix}.$$

Описание канонизаторов и делителей нуля подробно изложено в соответствующей литературе [8].

Используя свойства матричных делителей нуля максимального ранга, условие (3) и принятые ранее допущения о свойствах матриц C и K, можно показать, что условие (8) будет выполняться всегда, а левого делителя нуля матрицы C_K не существует (в противном случае более $p - p^*$ строк обобщенного выхода (4) будут линейно-зависимыми). Следовательно, формула (7) определяет единственное решение уравнения (6):

$$\begin{pmatrix} P_1 & P_2 \end{pmatrix} = -K_2 \widetilde{C}_K. \qquad (9)$$

Таким образом, можно определить невырожденное преобразование, после применения которого обобщенный выход системы будет включать в себя наблюдаемый выход и линейно-независимую часть целевого выхода. В этом случае $p^* < p$, $z^* \equiv z_1$.

Для перехода к исходному вектору обобщенного выхода может быть использована обратная матрица преобразования:

$$Y = P^{-1}Y^* = \begin{pmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ -P_1 & -P_2 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ z_1 \\ 0 \end{pmatrix}. \qquad (10)$$

Из соотношений (5) и (10) следует, что при выполнении условия (3) для оценивания вектора z достаточно оценивать лишь его составляющую z_1 с помощью функционального наблюдателя порядка p^*. Остальные компоненты целевого выхода могут быть найдены из соотношений (6) и (9):

$$z = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -P_1 & -P_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ z_1 \end{pmatrix}. \qquad (11)$$

В дальнейшем для упрощения записи будем предполагать, что для системы (1) выполняется условие (2). Если это условие не выполняется, то с помощью невырожденного преобразования выходов (5) можно свести задачу к требуемой постановке, сформировать асимптотический функциональный наблюдатель, а затем пересчитать оценку исходного целевого выхода, используя формулу (11).

IV. Формирование уравнений наблюдателя

Для построения функционального наблюдателя осуществим невырожденное преобразование переменных состояния системы (1). При этом матрицы преобразования будут определяться по формулам [7]:

$$\begin{cases} T = \begin{pmatrix} \widetilde{C} & \overline{C}^R \widetilde{K}_C & \overline{C}^R \overline{K}_C^R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1 & T_2 & T_3 \end{pmatrix}; \\ V = T^{-1} = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix}; \quad K_C = K\overline{C}^R. \end{cases} \qquad (12)$$

В новых координатах, определяемых преобразованием (12), вектор состояния может быть представлен в виде совокупности трех составляющих: измеряемый выход и два вспомогательных вектора, из которых только один необходим для определения целевого выхода. Динамика системы (1) в новых координатах описывается уравнением:

$$\begin{pmatrix} \dot{y} \\ \dot{\mu} \\ \dot{\eta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1AT_1 & V_1AT_2 & V_1AT_3 \\ V_2AT_1 & V_2AT_2 & V_2AT_3 \\ V_3AT_1 & V_3AT_2 & V_3AT_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \mu \\ \eta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_1B \\ V_2B \\ V_3B \end{pmatrix} u \,. \qquad (13)$$

При этом значение целевого выхода определяется соотношением:

$$z = K\widetilde{C}y + \mu \,.$$

Сформируем уравнение наблюдателя, взяв за основу второе уравнение системы (13) и дополнив его слагаемым, пропорциональным разности истинного значения вектора μ и его оценки:

$$\dot{\hat{\mu}} = V_2AT_1y + V_2AT_2\hat{\mu} + V_2AT_3\eta + V_2B + L\left(V_1AT_2\mu - V_1AT_2\hat{\mu}\right).$$

Истинное значение слагаемого, пропорционального вектору μ, определим из первого уравнения системы (13), а для исключения влияния вектора η на процесс оценивания будем выбирать матрицу L из условия:

$$\left(V_2 - LV_1\right)AT_3 = 0 \,.$$

Для исключения дифференцирования выходного сигнала, введем в рассмотрение вспомогательную переменную χ, определяемую выражением:

$$\chi = \hat{\mu} - Ly \,.$$

После проведения соответствующих преобразований запишем уравнение динамики функционального наблюдателя, не требующего дифференцирования выходного сигнала, и выражение для оценки вектора z:

$$\dot{\chi} = V^*AT_2\chi + V^*A\left(T_1 + T_2L\right)y + V^*Bu \,. \qquad (14)$$

$$\hat{z} = \left(K\widetilde{C} + L\right)y + \chi \,. \qquad (15)$$

Следует отметить, что построение функционального наблюдателя (14) – (15) возможно только в случае, когда выполняется условие:

$$V_2AT_3\overline{F}^R = 0 \,. \qquad (16)$$

В соотношениях (14) – (16) обозначено:

$$\begin{cases} V^* = V_2 - LV_1; \; F = V_1AT_3; \\ L = V_2AT_3\widetilde{F} + \pi\overline{F}^L. \end{cases} \qquad (17)$$

Здесь π – некоторая матрица соответствующей размерности, определяющая динамику процесса оценивания. Построение функционального наблюдателя (14) – (15) по своей сути сводится к определению коэффициентов матрицы π исходя из требований, предъявляемых к процессу оценивания.

С практической точки зрения выполнения условия (16) чаще всего соответствует ситуации, когда размерность наблюдаемого выхода превосходит размерность не измеряемого и не оцениваемого вспомогательного вектора. В этом случае путем выбора коэффициентов матрицы наблюдений по специальному алгоритму можно исключить влияние указанного вектора на процесс оценивания целевого выхода.

Объединив соотношения (14), (16) и (17), найдем выражение для динамики ошибки оценивания вектора z:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon} = (A_1 + \pi A_2)\varepsilon \ ; \\ \varepsilon(0) = LCx_0 + \chi(0); \\ A_1 = V_2 A T_2 - V_2 A T_3 \widetilde{F} V_1 A T_2 \ ; \ A_2 = -\overline{F}^L V_1 A T_2 \ . \end{cases} \quad (18)$$

Тогда исходная задача может быть формализована следующим образом: требуется построить функциональный наблюдатель вида (14) – (15), при котором уровень гашения начальных возмущений в системе (18) будет меньше заданного числа γ:

$$\gamma_0(R;\pi) = \sup_{\|\varepsilon_0\| \neq 0} \frac{\|\varepsilon\|}{\sqrt{\varepsilon_0^T R \varepsilon_0}} < \gamma \ ,$$

а также γ_0-оптимальный функциональный наблюдатель с матрицей параметров π_*, при которой этот показатель принимает минимальное значение, т.е.:

$$\gamma_0(R;\pi_*) = \inf_{\pi} \gamma_0(R;\pi).$$

V. Определение матрицы наблюдений

Для определения оптимального значения показателя γ_0 воспользуемся известными результатами в области проектирования γ_0-оптимальных наблюдателей полного порядка и наблюдателей Люенбергера [5].

Теорема: для того, чтобы при заданном $\gamma > 0$ существовал функциональный наблюдатель вида (14) – (15), при котором $\gamma_0(R;\pi) < \gamma$, необходимо и достаточно, чтобы линейные матричные неравенства

$$\begin{cases} A_1^T X + X A_1 + A_2^T Z^T + Z A_2 + I < 0; \\ X < \gamma^2 R. \end{cases} \quad (19)$$

были разрешимы относительно матрицы $X = X^T > 0$, матрицы Z и скаляра $\gamma^2 > 0$.

Тогда матрицу π можно определить по формуле:

$$\pi = X^{-1} Z \ .$$

Для доказательства приведенной теоремы достаточно применить к первому уравнению системы (18) известную лемму об уровне гашения начального возмущения и преобразовать полученное линейное матричное неравенство с учетом известных правил оперирования блочными матрицами [9].

Следствие: Параметры оптимального наблюдателя минимального порядка находятся как $\pi_* = X_*^{-1} Z_*$, где X_*, Z_* – решение задачи:

$$\left(\inf_{(19)} \gamma^2 \right)^{1/2} = \gamma_0(R;\pi_*). \quad (20)$$

Очевидно, что решение задач (19) и (20) существует только в том случае, когда пара $(A_1; A_2)$ является детектируемой. К сожалению, на данный момент невозможно сформулировать конструктивные условия выполнения указанного ограничения.

Запишем общий алгоритм синтеза функционального наблюдателя, обеспечивающего оптимальное гашение начальных возмущений.

1) Проверить выполнение условия (2). Если оно не выполняется, то следует провести невырожденное преобразование выходов (5) и перейти к оцениванию функционала меньшей размерности.
2) Вычислить по формулам (12) и (17) матрицы вспомогательных коэффициентов и проверить выполнение условия (16). Если это условие не выполняется, то предлагаемый метод не применим к решению исходной задачи.
3) Вычислить по формуле (18) матрицы A_1 и A_2, проверить детектируемость пары $(A_1; A_2)$.
4) Найти решение задачи (20) и определить матрицу параметров π_*.
5) Вычислить матрицу L по формуле (17) и сформировать уравнения наблюдателя (14) – (15).

Предложенный пошаговый алгоритм построения функционального наблюдателя является достаточно простым и может быть легко реализован на ЭВМ.

VI. Заключение

В представленной работе показано, что известные результаты в области проектирования γ_0-оптимальных наблюдателей полного порядка и γ_0-оптимальных наблюдателей Люенбергера могут быть использованы также для синтеза функциональных наблюдателей, обеспечивающих оптимальное гашение начальных возмущений. В дальнейшем планируется аналогичным образом расширить теорию обобщенной H_∞-оптимальной фильтрации и применить ее к построению фильтров минимального порядка для систем с внешними возмущениями и ненулевыми начальными условиями.

Список литературы

[1] O'Reilly J. Observers for Linear Systems. - Academic Press, 1983.

[2] Коровин С. К., Фомичев В. В. Наблюдатели состояния для линейных систем с неопределенностью. - М.: Физматлит, 2007. - 224 с.

[3] Ilchmann A., Reis T. Surveys in Differential-Algebraic Equations II. - Springer International Publishing, 2015.

[4] Баландин Д.В., Коган М.М. Обобщенная H_∞-оптимальная фильтрация при внешнем и начальном возмущениях // Дифференциальные уравнения, 2012. Т. 48. № 11. - С. 1507-1514.

[5] Баландин Д.В., Коган М.М. Минимаксная фильтрация: γ_0-оптимальные наблюдатели и обобщенные H_∞-оптимальные фильтры // Автоматика и телемеханика, 2013. № 4. - С. 43-58.

[6] Asanov A.Z., Dem'Yanov D.N. Analytical synthesis of functional observers // Russian Aeronautics, 2013. Vol. 56. Is. 4. - pp. 335-343.

[7] Asanov A.Z., Dem'Yanov D.N. Analytical synthesis of functional low-order observers // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2015. Vol. 54. Is. 4. - pp. 505-513.

[8] Буков В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. - Калуга: Изд. научной лит. Н. Ф. Бочкаревой, 2006. - 720 с.

[9] Баландин Д.В., Коган М.М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. - М.: Физматлит, 2007. - 280 с.

Управление функционированием аппаратно-программных комплексов на основе прогнозирования количества обращений пользователей

Галимов Р.Р.
ОАО «БЭТО»
Уфа, Россия
rrgalimov@gmail.com

Гвоздев В.Е.
Кафедра технической кибернетики
ФГБОУ ВО «УГАТУ»
Уфа, Россия
wega55@mail.ru

Гузаиров М.Б.
Кафедра вычислительной техники и защиты информации
ФГБОУ ВО «УГАТУ»
Уфа, Россия
guzairov@ugatu.su

Давлиева А.С.
Кафедра технической кибернетики
ФГБОУ ВО «УГАТУ»
Уфа, Россия
aliyasr21@gmail.com

***Abstract* — In order to fulfill the requirements of the "Yarovoi Law", it is necessary to keep a record of all telephone conversations and their storage for six months. A defect in the described system is considered to be a failure in connecting subscribers, the cause of which may be station overload or failure of the system parts. In order to reduce the negative consequences caused by the manifestation of the mentioned defect, an approach is proposed, the conceptual basis of which is the management of the vulnerability of technical systems. The proposed approach is based on controlling the operation of hardware and software systems based on the prediction of the number of user requests in the event of a disruption in the normal functioning of a telephone exchange, or a prerequisite for the occurrence of a violation. In practice, this boils down to the forced limitation of the duration of negotiations with prior notice to subscribers The proposed approach is focused on providing the ability to record the maximum number of calls of subscribers. The novelty of the proposed approach is to take into account the psychological characteristics of subscribers as a factor in improving the efficiency of the system.**

Ключевые слова — аппаратно-программный комплекс, эффективность, прогнозирование, психологические особенности абонентов

I. Введение

С целью предотвращения террористических актов на основании Федерального закона от 7 июля 2003 г. №126-ФЗ «О связи»; п. 2.2 статьи 13 Федерального закона от 6 июля 2016 г. №374-ФЗ «О внесении изменений в Федерального закона «О противодействии терроризму»»; п. 4 Правил взаимодействия операторов связи с уполномоченными органами, осуществляющими оперативно-розыскную деятельность от 25 сентября 2018 г. (изменение от 6 октября 2018 г.); Приказа Министерства связи и массовых коммуникаций Российской Федерации №146 от 03.04.2018г. предписывается запись всех телефонных разговоров и их хранение в течение полугода.

Современные стационарные телефонные станции представляют собою сложные аппаратно-программные комплексы (АПК), режимы функционирования которых зависят как от интенсивности обращений абонентов и времени, в течение которого они занимают телефонный канал связи, так и от работоспособности аппаратно-программных компонент [1-3]. С точки зрения выполнения закона в части записи разговоров абонентов, полнота выполнения требования зависит от того, сколько абонентов получили отказ в обслуживании из-за отсутствия свободных каналов связи [4]. Отказы в обслуживании могут быть обусловлены превышением количества обращений абонентов над пропускной способностью станции. Либо отказами оборудования телефонной станции (АПК), следствием чего является сокращение предоставляемых ею каналов связи. Либо одновременно обоими выше обозначенными причинами.

Обеспечение эффективного функционирования телефонной станции с точки зрения записи всех разговоров в «пиковом» режиме может быть обеспечено либо за счет аппаратной избыточности, т.е. включения в состав станции дополнительных устройств, отключаемых во время функционирования станции в штатном режиме [5-7]. Либо за счет ограничения длительности разговоров абонентов, что эквивалентно повышению интенсивности обслуживания абонентов.

Повышение эффективности за счет аппаратной избыточности на практике встречает серьезные трудности, во-первых, из-за того, что это потребует внесения изменений не только в аппаратную составляющую и технологию ее производства, но и в программное обеспечение, управляющее функционированием АПК в режиме реального времени [8-9].

В настоящей работе рассматривается подход, ориентированный на обеспечение возможности записи максимального количества разговоров абонентов, основанный на прогнозных оценках среднего числа ожидаемых обращений абонентов; актуальных данных о числе работоспособных каналов связи; психологических особенностях абонентов.

II. Идея подхода

Идея предлагаемого подхода заключается в наложении ограничений на допустимую длительность разговоров абонентов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-07-00351 «Методологические основы обеспечения гарантоспособности систем передачи телеметрической информации о состоянии бортовых авиационных систем с использованием технологий интеллектуального анализа данных».

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

Учет психологических особенностей абонентов заключается в том, что если их информируют о том, что разговор будет принудительно прерван через определенный интервал времени, они стремятся до истечении означенного интервала сообщить наиболее существенную информацию, ради которой они осуществляли звонок.

Существенным моментом в реализации предлагаемого подхода является задача определения допустимой длительности разговора. Решение этой задачи опирается на проактивный подход к управлению сложными системами [10-12]. Проактивный подход основан на прогнозировании интенсивностей потока заявок, исходя из чего налагаются ограничения на длительность переговоров с тем, чтобы обеспечить запись возможно большего числа разговоров.

III. Модели функционирования аппаратно-программных комплексов

Основу моделей, соответствующих проактивному подходу к управлению АПК, составляет постулируемое положение о том, что поток заявок, поступающих на телефонную станцию, является простейшим [13].

Предположим, что в единицу времени на телефонную станцию поступает N заявок на соединение. Средняя длительность обслуживания одной заявки, которая занимает отдельный канал, составляет τ единиц времени. Следовательно, в единицу времени одним каналом обслуживается $n = 1/\tau$ заявок, где τ – среднее время обслуживания одной заявки. При числе доступных каналов k, в единицу времени будут обслуживаться $n_k = k/\tau$ обращений абонентов. Таким образом, эффективность функционирования телефонной станции с точки зрения записи разговоров может характеризоваться выражением:

$$(1-\frac{n_k}{N}) \to \min_{\tau}, \qquad (1)$$

что соответствует стремлению в среднем обеспечить 100%-ую запись всех переговоров. Выражение (1) может быть преобразовано к виду (задача (2)):

$$(1-\frac{k}{\tau \cdot N}) \to \min_{\tau}, \qquad (2)$$

где N – число заявок, τ – среднее время обслуживания одной заявки, k – число доступных каналов.

В случае проактивного подхода к управлению значение N представляет собою прогнозируемое среднее число обращений в единицу времени при известном числе обслуживающих каналов k (т.е. неизменном состоянии оборудования телефонной станции).

Приведем описание укрупненных алгоритмов управления записью разговоров абонентов телефонной станции.

Проактивный подход:

Шаг 1. По значениям среднего числа заявок $N_i(\Delta t)$, соответствующих i-м интервалам времени Δt ($i = 1; L$), в результате решения задачи краткосрочного прогнозирования рассчитывается значение среднего числа заявок на (L+1)-м интервале.

$$A^{(1)} : \{N_i(\Delta t)\}_1^L \to N_{L+1}(\Delta t)$$

Физически величина Δt равнялась принятой единице времени.

Шаг 2. В результате решения задачи (2) определяется значение допустимой длительности времени разговора абонента $\tau_{доп}$ на интервале Δt_{L+1}.

$$A^{(2)} : \{N_{L+1}(\Delta t), k\}_1^L \to \tau_{доп}.$$

Шаг 3. С начала интервала времени L+2 для каждого абонента фиксируется время начала разговора $t_{нач}$ и при достижении времени оповещения

$$t_{оп} = t_{нач} + \beta\, \tau_{доп},$$

абоненту сообщается, что через время $(1 - \beta)\tau_{доп}$ разговор будет прерван и через время $t_k = t_{нач} + \tau_{доп}$ разговор прерывается.

Из литературных источников [14-15] известно, что информативная беседа длится около 180-300 секунд. Можно сказать, что минимально возможным временем разговора будет 180 секунд. Исходя из психологических особенностей человека, функцию «Уведомить абонентов о прерывании беседы» необходимо выполнять за 60 секунд [16-17].

Эффективность системы записи разговоров за время Δt определяется отношением записанных разговоров $n_ф(\Delta t)$ к числу обращений абонентов $N_ф(\Delta t)$:

$$Э_{зап}^{(\Delta t)} = \frac{n_ф(\Delta t)}{N_ф(\Delta t)}, \qquad (3)$$

соотносимых интервалом времени Δt.

IV. Вычислительный эксперимент

Основу проведения вычислительного эксперимента составляют следующие положения.

1) Число обращений абонентов в течение единицы времени Δt $N_ф(\Delta t)$ является равномерно распределенной дискретной случайной величиной

$$N_ф(\Delta t) \in [N_{L+1}(1-\alpha); N_{L+1}(1+\alpha)],$$

где $\alpha \in [0;1]$. Нижеприведенным результатам соответствует $\alpha = 0.1$.

2) Ограничение на среднюю длительность разговора $\tau_{ср}$ в единицу времени Δt определялось соотношением

$$\tau_{ср}(\Delta t) = \frac{k}{N_{ф}(\Delta t)}, \qquad (4)$$

где k – число доступных каналов телефонной станции.

3) Длительность η-го разговора абонента $\tau^{\eta}_{разг}$ считается величиной случайной, для которой известна функция распределения $f(\tau_{разг})$. В ходе исследований $f(\tau_{разг})$ ставились в соответствие равномерный и нормальный законы распределения случайной величины.

4) Полагаются известными границы на минимальную τ_{min} и максимальную τ_{max} длительность разговоров. Значение τ_{min} представляет собой минимальное время, необходимое для сообщения информации. τ_{min} определялось на основе рекомендаций, изложенных в [17]. Значение τ_{max} в эксперименте выбиралось в случае (а) равным $\tau_{ср}(\Delta t)$; в случае (б) – равным $2\tau_{ср}(\Delta t)$.

5) Считается, что следующий абонент начинает обслуживаться сразу же после завершения обслуживания предыдущего абонента.

На рис. 1-2 представлены дифференциальные функции распределения показателя эффективности записи разговоров, полученные в результате проведения эксперимента для случая, когда $\tau_{разг}$ = [180; $2\tau_{ср}$] распределено по равномерному, нормальному законам распределения случайной величины. Представленные результаты соответствуют случаю $N_{ф}(\Delta t) = 100$, $k = 16$.

Параметры, представленные в работе, носят демонстрационный характер и не соответствуют характеристикам реальной телефонной станции. В качестве Δt принимался один астрономический час, что соответствует 3600 секундам. τ_{min} на основе рекомендаций, изложенных в [16-17] принималось равным 180 секундам, что соответствует $0.05\Delta t$.

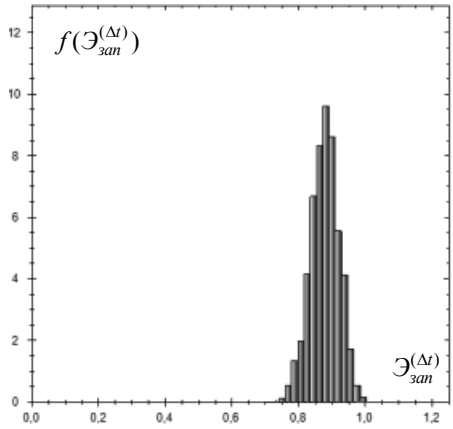


Рис. 1. Плотность распределения показателя эффективности записи разговоров для случая равномерного распределения длительности разговоров

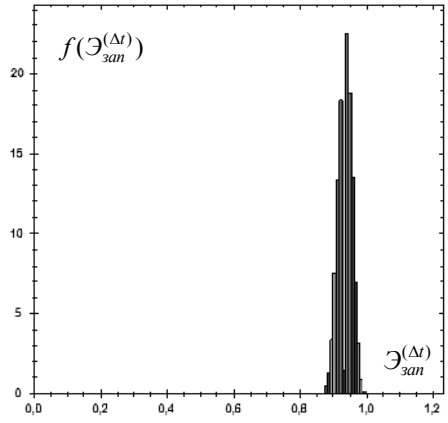


Рис. 2. Плотность распределения показателя эффективности записи разговоров для случая нормального распределения длительности разговоров

По результатам исследований средняя эффективность записи в случае равномерного закона распределения длительности разговоров оказалась равной 0.87, в случае нормального распределения – 0.91.

V. Заключение

В работе предлагается подход, ориентированный на обеспечение возможности записи максимального количества разговоров абонентов. Особенностью предлагаемого подхода является то, что при определении допустимой длительности переговоров учитываются психологические особенности человека, а именно то, что уведомление абонентов о сокращении длительности разговора вынуждает их формулировать те обстоятельства, которые послужили причиной контакта. Подход основан на прогнозных оценках среднего числа ожидаемых обращений абонентов в течение единицы времени.

В рамках настоящей статьи постулировались законы распределения длительности разговоров. Объективное оценивание закона распределения длительности разговоров является задачей самостоятельного исследования. В работе этот вопрос не рассматривался.

Список литературы

[1] Липаев В.В. Функциональная безопасность программных средств// Информационный бюллетень «Jet Info». 2004. № 8 (135). 28 с.

[2] Махутов Н.А., Резников Д.О. Оценка уязвимости технических систем и ее место в процедуре анализа риска// Проблемы анализа риска. 2008. Т. 5. № 3. С. 72-85.

[3] Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. – Спб.: Питер, 2005. – 479 с.

[4] Шарипов Ю.К., Кобляков В.К. Отечественные электронные АТС. Изд.2-е. – М.: Логос, 2002. – 416 с.

[5] Кубарев А.В. Подход к формализации уязвимостей информационных систем на основе их классификационных признаков// Вопросы кибербезопасности. 2013. №2. С. 29-33.

[6] Гвоздев В.Е., Блинова Д.В., Давлиева А.С. Анализ функциональной пригодности аппаратно-программных комплексов на основе аппарата статистических индексов //

Вестник СамГТУ, Серия «Технические науки». 2017. № 2 (54). С. 13-23.

[7] Дедков В.К., Водолазский В.И., Мухин А.В., Фесечко А.И. Живучесть и безопасность сложных технических систем// Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. 2002. №4. С. 63-79.

[8] Антамошкин, А. Н. Моргунова О. Н., Моргунов Е. П. Методика исследования эффективности сложных иерархических систем // Вестник Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та. 2006. Вып. 2 (9). С. 9-13.

[9] Gvozdev V.E., Guzairov M.B., Davlieva A.S., Teslenko V.V. Analysis of properties hardware-software system in efficiency index under uncertainty component structures // Critical infrastructures: Contingency management, Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber security: proceedings of the Vth International workshop (IWCI). – 2018. – P. 73-77.

[10] Haapanen Pentti, Helminen Atte. Failure Mode and Effects Analysis of Software-Based Automation Systems // STUK-YTO-TR 190 / August 2002. – 36 p.

[11] Hatem A. Khater, A. Baith Mohamed, and Sara M. Kamel. A Proposed Technique for Software Development Risks Identification by using FTA Model // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Computer and Information Engineering. Vol. 7, No. 1, 2013. – Pp.105-111.

[12] Каплан Р. С. Организация, ориентированная на стратегию. Как в 383 новой бизнес-среде преуспевают организации, применяющие сбалансированную систему показателей / Р. С. Каплан, Д. И. Нортон. – М. : ОлимпБизнес, 2004. – 416 с.

[13] Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. 2-е изд. М.:Наука,1988. – 208 с.

[14] Мякушкин Д.Е. Искусство разговора по телефону: Учебное пособие. - Челябинск, Издательство ЮУрГУ, 2007.

[15] Ильин Е.П. Психология общения и межличностных отношений Изд. Питер, 2013 г. – 576 с.

[16] Абульханова-Славская К. А. Личностный аспект проблемы общения // Проблемы общения в психологии. М., 1981. С. 218-241.

[17] Батаршев А. В. Психология личности и общения : учебное пособие для вузов / А. В. Батаршев. – Москва: ВЛАДОС, 2004. – 248 с.

Компьютерное моделирование динамики энергозатрат при обжиге керамзита

Галицков С.Я.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
maes@samgtu.ru

Галицков К.С.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
ksgal@yandex.ru

Самохвалов О.В.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
indexcitir@gmail.com

***Abstract* — High-strength expanded clay is widely used in the construction industry in the construction of high-rise buildings, the construction of bridges and tension-reinforced structures, the construction of roads and airfield pavements, in the construction of oil platforms. The use of expanded clay as a filler reduces the weight of structures, increase their frost resistance and durability. The manufacture of high strength structural expanded clay is a complex, time consuming and energy consuming process. In the structure of the cost of the finished product, the share of fuel costs is about a third. Therefore, one of the main indicators determining the economic efficiency of the manufacture of expanded clay, in addition to performance, is the ratio of the volume consumption of fuel to the volume of 1 m^3 of produced expanded clay. Energy-efficient manufacturing of expanded clay may be carried out by automatic control of the curve of burning of expanded clay with a multidimensional system of automatic control of the kiln rotation speed, the amount of raw clay loading into the kiln and the volumetric heat output of the burner. This approach allows us to exclude errors inherent in the operator with the "manual" burning control based on heuristic algorithms, and thereby ensure rational fuel consumption. In this paper, we consider a generalized process control structure for the burning of expanded clay in a rotary kiln, focused on modeling both "manual" and automatic control of the kiln. The created model allows you to track the dynamics of fuel costs for the manufacture of 1 m^3 of expanded clay of various grades by strength. A method for determining the coordinates of working points in the three-dimensional space of the output coordinates of the control object $OT_FT_AT_C$ temperature-strength characteristic, which allows to predict the strength of the resulting expanded clay during automatic burning control. A technique has been developed for the formulation of numerical modeling of rational curves for burning expanded clay, aimed at minimizing energy consumption. A comparison of fuel consumption is carried out with the "manual" and automatic control of the burning process.**

Ключевые слова — вращающаяся печь, керамзит, многомерная система автоматического управления, энергозатраты

I. Постановка задачи

Керамзит широко применяется при возведении зданий, сооружении мостов и напряжённо-армированных конструкций, прокладке автодорог и аэродромных покрытий, в строительстве нефтяных платформ [1-9]. Для обжига керамзита, в основном, применяют вращающуюся печь 2,5×40м [10,11], управление которой осуществляется тремя воздействиями [12]: скоростью вращения печи $\omega_п$, величиной загрузки сырца керамзита в печь $q_З$ и объёмной тепловой мощностью горелки $Q_г$ (рис. 1).

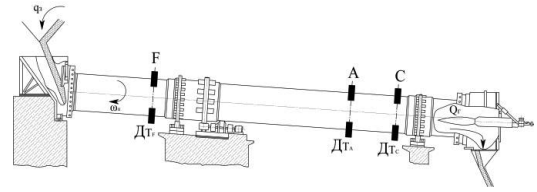


Рис. 1. Вращающаяся печь 2,5×40м для производства керамзита

Прочность R керамзита определяется, главным образом, кривой обжига (рис. 2), характеристику которой можно в первом приближении определить значениями температуры керамзита в трёх опорных сечениях (F, A и C) по длине печи. Показано [13], что эти значения (T_F, T_A ,T_C) регулируются тремя управляющими воздействиями $\omega_п$, $q_З$, $Q_г$.

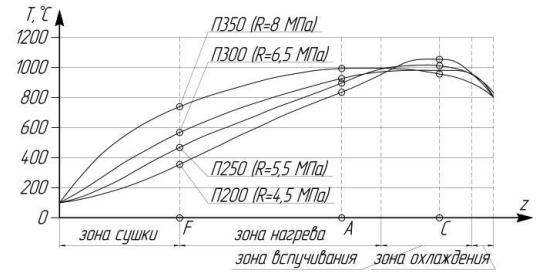


Рис. 2. Кривые обжига для получения марок П250 – П350 керамзита

Выполненные исследования [14,15] по выявлению зависимостей прочности R керамзита от T_F, T_A ,T_C позволили рассматривать задачу формирования вектора $T_З = [T_{FЗ}, T_{AЗ}, T_{CЗ}]^T$ задающих воздействий многомерной системы автоматического управления (МСАУ) печью с помощью температурно-прочностной характеристики $R = f(T_F, T_A, T_C)$ в пространстве $OT_FT_AT_C$ (рис. 3).

Согласно ГОСТ 32496-2013 при производстве керамзита известной марки допускается разброс значений его прочности (табл. 1). Это вызвано, прежде всего, известными трудностями стабилизации кривой обжига в условиях действия существенных возмущений, обусловленных нестационарностью характеристик исходного сырья, нелинейностью в режиме работы горелки, изменением температур окружающей среды и т.п.

Границы допустимых отклонений кривой обжига можно отобразить в трёхмерном пространстве выходных координат объекта управления $OT_FT_AT_C$ в виде параллелепипеда KLMNK'L'M'N' (на рис. 3 показаны эти объёмы применительно к четырём маркам

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

керамзита). Размер рёбер параллелепипеда соответствует допустимому отклонению T_F, T_A ,T_C при производстве керамзита заданной марки и ориентирован, прежде всего, на «ручное» управление обжигом.

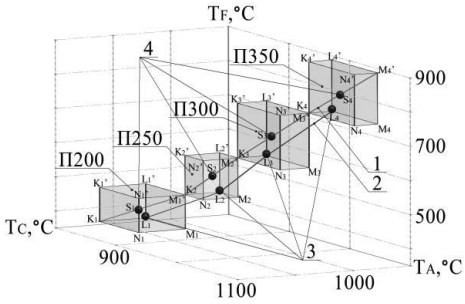


Рис. 3. Температурно-прочностная характеристика и марки керамзита в пространстве OTFTATC: 1 – температурно-прочностная характеристика (ТПХ), 2 – энергоэффективная ТПХ, 3 – сферы при управлении МСАУ ТПОК, 4 – сферы при «ручном» управлении на производстве

ТАБЛИЦА I. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМЗИТА

Насыпная плотность, кг/м³	**Марка по насыпной плотности**	**Марка по прочности**	**Предел прочности при сдавливании в цилиндре, МПа**
100-150	М150	П15	До 0,5
150-200	М200	П15	До 0,5
200-250	М250	П25	0,5 - 0,7
250-300	М300	П35	0,7 - 1
300-350	М350	П50	1 - 1,5
350-400	М400	П50	1 - 1,5
400-450	М450	П75	1,5 - 2
450-500	М500	П100	2 - 2,5
500-600	М600	П125	2,5 - 3,3
600-700	М700	П150	3,3 - 4,5
700-800	М800	П200	4,5 - 5,5
800-900	М900	П250	5,5 - 6,5
900-1000	М1000	П300	6,5 - 8
900-1000	М1000	П350	8 - 10

Рассмотрим 2 варианта управления печью.

1) Традиционное, широко используемое, «ручное» управление загрузкой $q_з$ и объёмной тепловой мощностью $Q_г$ горелки оператором-обжигальщиком (при неизменной скорости $\omega_п$) по температуре в сечениях А и С печи. Температура измеряется с помощью пирометра. Практика обжига керамзита в промышленных печах 2,5×40м, показывает, что в этом случае отклонение прочности керамзита от заданного значения составляет $\Delta R = \pm 1{,}05 \div 1{,}82$МПа. Такой существенный разброс R может привести к смене марки выпускаемого керамзита. Для предотвращения появления брака обжигальщик эвристически выбирает такой режим работы печи, который с точки зрения рассматриваемого объёма KLMNK'L'M'N' соответствует положению рабочей точки в окрестности центра S_i этого параллелепипеда. Это далеко не всегда позволяет получить значительную экономию топлива.

2) Автоматическое управление. Оно осуществляется трёхмерной САУ в режиме стабилизации температуры в сечениях F, A и C печи. Допускаем, что каждый из каналов этой многомерной системы обеспечивает автоматическое поддержание температуры керамзита в соответствующем сечении печи с погрешностью не больше величины $\Delta T = \pm 1{,}23$°C (точность термопары составляет ±1°C [16], а погрешность преобразователя ±0,23°C [17]). Рабочая точка будет находится в центре сферы радиусом ΔT/2 (рис. 3). При этом погрешность по прочности составит $\Delta R = \pm 0{,}126$МПа.

Исследования рабочего пространства САУ [14,15] показали, что для обеспечения наименьших энергозатрат производства керамзита требуемой марки по прочности необходимо, чтобы рабочая точка находилась в ε - окрестности L_i. Здесь технико-экономический эффект обусловлен тем, что эта точка соответствует наименьшему расходу газа $G_г$, а значение скорости $\omega_п$ и загрузка $q_з$ имеют наибольшее значение (соответственно, больше производительность),

В структуре себестоимости готового продукта на долю газа (топлива) приходится 16–27% [10]. Известно, что удельный расход условного топлива на 1м³ керамзита составляет 55 кг/м³ [10,18] (или 45,45 м³/м³). Расход газа зависит от производимой марки, теплопотерь с отходящими из печи газами, квалификации обжигальщика и др. Поэтому одной из основных характеристик определения экономической эффективности производства керамзита является расход газа на обжиг 1м³ керамзита $G_{гк} = G_г/G_к$, где $G_г$, $G_к$ – расход газа и керамзита, соответственно.

II. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Для определения значения $G_{гк}$ в различных режимах управления печью разработана обобщённая структура управления технологическим процессом обжига керамзита (ТПОК) во вращающейся печи. Она включает в себя следующие блоки (рис. 4):

Б1 – модель процесса обжига керамзита как объекта управления;

Б2 – задающее устройство, формирует требуемое значение прочности Rтр керамзита;

Б3 – модель управляющего устройства многомерной САУ ТПОК;

Б4 – модель, имитирующая действия оператора-обжигальщика при ручном управлении печью;

Б5 – блок выбора типа управления печью (ручное или автоматическое) ;

Б6 – блок вычисления энергетических показателей процесса обжига.

Блок Б1 представляет собой модель процесса обжига как объекта управления с распределёнными параметрами, здесь вектор выходных координат включает в себя собственно кривую обжига T(z) и

значения этой кривой в трёх точках T_F, T_A ,T_C. Вектор управляющих воздействий $\bar{u} = [u_1, u_2, u_3]^T$ представляет собой входные сигналы на приводы управления вращением печи, загрузкой сырца и газовой горелкой.

Блок Б3 включает в себя формирователь задающих сигналов (ФЗС) на три канала САУ, в нём реализован, разработанный в [14] алгоритм, учитывающий характеристики сырья, конструкцию печи и формирование температурно-прочностной характеристики $R = f(T_F, T_A, T_C)$; $ИУ_1$, $ИУ_2$, $ИУ_3$ – исполнительные устройства приводов печи, загрузочного устройства и горелки соответственно; $ДТ_F$, $ДТ_A$, $ДТ_C$ – датчики температуры (термопары) в сечениях F, A, C; регуляторы R_{11}, R_{22}, R_{33}.

Блок Б5 формально представляет собой блок ключей K_1, K_2, K_3.

Входными сигналами блока Б6 являются $G_г$, $q_з$, и $\omega_п$, здесь для нахождения расхода $G_к$ выпускаемого керамзита вводится коэффициент вспучивания K_B и плотность сырца ρ_C.

На основании структуры (рис. 4) разработана в программной среде MATLAB вычислительная модель (рис. 5), позволяющая определять коэффициент $G_{гк}$, как в статическом, так и в динамическом режимах работы печи.

Проведём компьютерное моделирование на вычислительной модели (рис. 5) МСАУ ТПОК для оценки относительных затрат газа на обжиг 1м^3 керамзита в установившемся и переходных режимах.

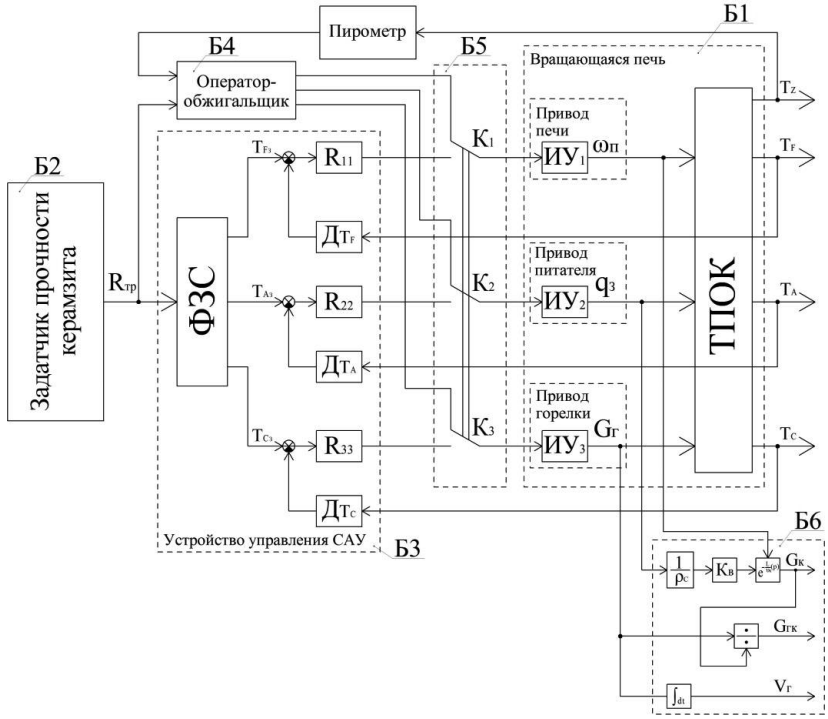


Рис. 4. Обобщённая структура управления технологическим процессом обжига керамзита

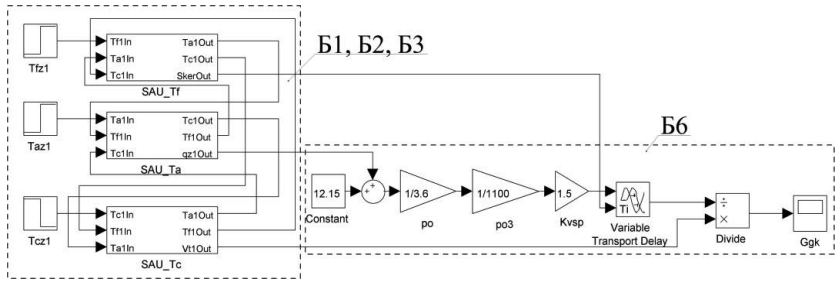


Рис. 5. Вычислительная модель МСАУ ТПОК для определения затрат газа на обжиг 1м^3 керамзита

Для оценки энергоэффективности режима обжига керамзита в точке L_i рабочего пространства по сравнению с точкой S_i определены первоначально, путём использования алгоритма ФЗС, элементы вектора задающих сигналов многомерной САУ (4-6 колонки табл. 2), на втором этапе исследована динамика САУ ТПОК на модели (рис. 5), в результате получены энергетические характеристики процесса (два правых столбца табл. 2), из анализа полученных результатов можно сделать заключение, во-первых увеличение требуемой прочности керамзита сопровождается возрастанием коэффициента $G_{гк}$ (рис. 6), во-вторых эффективность использования точки L_1 для керамзита П200 составляет 7,8%, а точки L_4 для керамзита П350 – 11,8%.

Моделирование динамики энергозатрат выполнено для двух режимов работы печи. Первый заключается в выполнении перевода режима обжига с производства керамзита одной марки по прочности на производство керамзита другой марки. Здесь рассмотрены два режима работы, первый – ручное управление. Оно осуществляется в соответствии с типовой инструкцией обжигальщика, алгоритм управления соответствует длительности режима перевода – 1 час [10,11]. Установлено, что в этом случае, например, при переходе с керамзита П200 на П250 расходуется 638 м^3 газа [19,20] и при этом происходит выпуск керамзита промежуточной марки. Моделирование автоматического управления перевода печи с П200 на П250 [21] (табл. 3 и рис. 7) показало, что продолжительность перехода составляет 0,6 часа при этом при производстве промежуточной марки П200-П250 расходуется 318 м^3 газа.

Рис. 6. Зависимости коэффициента Gгк для марок П200 – П350 в рабочих точках S (кривая 1) и L (кривая 2)

ТАБЛИЦА II. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОБЖИГА КЕРАМЗИТА МАРОК П200 – П350

			T_F, °C	T_A, °C	T_C, °C	$\omega_п$, рад/с	$q_з$, т/ч	$G_г$, м^3/с	$G_{гк}$, м^3/м^3
П200	R = 4,7	Точка L_1	375	825	1035	0,23	12,15	0,1805	38,4
	R = 5	Точка S_1	425	857,5	1055	0,193	11,48	0,1865	41,4
П250	R = 5,7	Точка L_2	475	890	1005	0,165	10,79	0,1715	41
	R = 6	Точка S_2	532,5	905	1020	0,134	10,32	0,176	43,3
П300	R = 6,8	Точка L_3	590	920	980	0,12	9,84	0,164	43,08
	R = 7,25	Точка S_3	670	955	992,5	0,1036	8,75	0,1677	47,28
П350	R = 8,4	Точка L_4	750	990	960	0,0927	7,64	0,158	49,1
	R = 9	Точка S_4	805	1027,5	970	0,086	6,08	0,161	54,9

ТАБЛИЦА III. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОБЖИГА ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕХОДА С ПРОИЗВОДСТВА ОДНОЙ МАРКИ НА ДРУГУЮ (ДЛЯ МАРОК П200 – П350)

		ΔT_F, °C	ΔT_A, °C	ΔT_C, °C	$\Delta\omega_п$, рад/с	$\Delta q_з$, т/ч	$\Delta G_г$, м^3/с	$\Delta G_{гк}$, м^3/м^3
П200–П250	Точка L_1–L_2	100	65	-30	0,065	1,36	-0,009	2,6
	Точка S_1–S_2	107,5	47,5	-35	0,059	1,16	-0,0105	1,9
П250–П300	Точка L_2–L_3	115	30	-25	0,045	0,95	-0,0075	2,08
	Точка S_2–S_3	137,5	50	-27,5	0,03	1,57	-0,0083	3,98
П300–П350	Точка L_3–L_4	160	70	-20	0,0273	2,2	-0,006	6,02
	Точка S_3–S_4	135	72,5	-22,5	0,0176	2,67	-0,0067	7,62

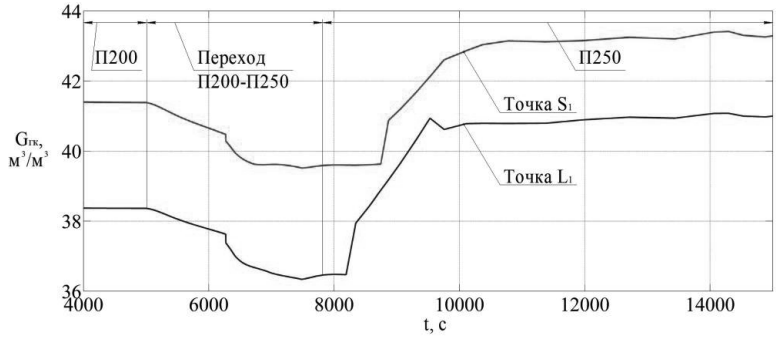


Рис. 7. Динамика коэффициента Gгк при переходе с марки П200 на П250

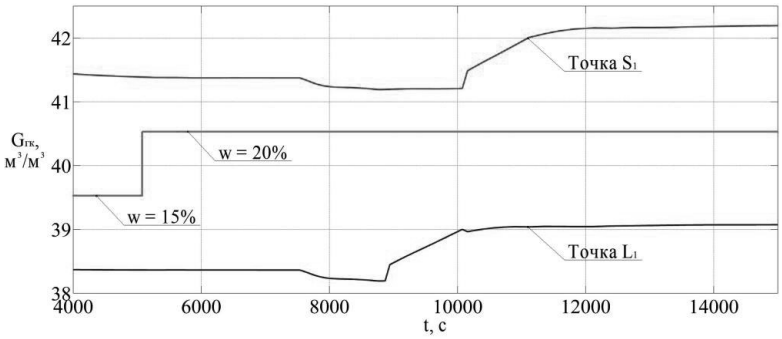


Рис. 8. Динамика коэффициента Gгк при изменении возмущающего воздействия Δw = 5%

Второй динамический режим – это исследование влияния основного возмущения (изменение влажности сырца на коэффициент $G_{гк}$) выполнено по отношению к скачкообразному изменению влажности Δw. В качестве примера рассматривалось производство керамзита П200, а изменение влажности w моделировалось от 15% до 20%. Анализ динамических характеристик (рис. 8 и табл. 4) показывает существенное возрастание коэффициента $G_{гк}$, от действия этого возмущения, с увеличением марки по прочности.

ТАБЛИЦА IV. ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА $G_{гк}$ ОТ ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ W ДЛЯ МАРОК П200 – П350

			Δw, %	**$\Delta G_{гк}$, м³/ м³**	**$\Delta G_{гк}$, %**
П200	R = 4,7	Точка L_1	5	0,8	2
	R = 5	Точка S_1		0,85	2
П250	R = 5,7	Точка L_2		0,9	2,2
	R = 6	Точка S_2		0,95	2,2
П300	R = 6,8	Точка L_3		0,96	2,2
	R = 7,25	Точка S_3		1,15	2,4
П350	R = 8,4	Точка L_4		1,35	2,75
	R = 9	Точка S_4		1,7	3,1

III. Выводы

1. Разработана обобщённая структура управления технологическим процессом обжига керамзита проблемно ориентированная на исследования энергозатрат при «ручном» и автоматическом управлении процессом обжига. Эта структура положена в основу вычислительной модели удельных энергозатрат.

2. Выполнено исследование энергозатрат в статических режимах обжига применительно к двум рабочим точкам в пространстве $OT_FT_AT_C$ температурно-прочностной характеристики керамзита. Показана энергоэффективность обжига в точке L_i. Здесь в зависимости от марки керамзита снижение энергозатрат лежит в диапазоне 7,8% – 11,8%.

3. Моделирование режимов перехода производства с одной марки на другую выявило существенную эффективность автоматизации этого процесса. Показано, что по сравнению с ручным управлением процесс перехода сокращается вдвое, при этом значительно сокращается расход газа на этот динамический процесс.

4. Исследование динамики многомерной САУ ТПОК по отношению к основному возмущению (изменение влажности сырца) показало стабильность поддержания кривой обжига в этом режиме и существенное возрастание коэффициента $G_{гк}$ особенно при производстве керамзита высокой прочности П350.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Azhani Zukri, Ramli Nazir, Khairun Nissa Mat Said and Hossein Moayedi Physical and Mechanical Properties of Lightweight Expanded Clay Aggregate (LECA) // The 12 International Civil Engineering Post Graduate Conference (SEPKA) – The 3rd International Symposium on Expertise of Engineering Design (ISEED) (SEPKA-ISEED 2018), p. 18

[2] Alaa M.Rashad Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview // Construction and Building Materials Volume 170, 2018, pp. 757-775

[3] Yoon M., Kim G., Choe G.C., Lee Y., Lee T. Effect of coarse aggregate type and loading level on the high temperature properties of concrete / Constr. Build. Mater., 78 (2015), pp. 26-33

[4] Liu G. & Li H. Offshore platform integration and floatover technology. Beijing: Science press (2017). 280 p

[5] Ben Jamaa, Haithem & Kemama, Adel & El-Ghezal, Latifa & Guiras, Houda & Jamei, Mehrez. Experimental study of crushable expanded clay // 3rd International Symposium on Unsaturated Soils UNSATBatna 2015, At Batna, Algeria, Volume: 3

[6] Vaiana R., Capiluppi G.F., Gallelli V., Iuele T., Minani V. Pavement Surface Performances Evolution: an Experimental Application // Procedia - Social and Behavioral Sciences. Volume 53, 3 October 2012, Pages 1149–1160

[7] Pavithra A., Jerosia De Rose D. Application of Light Expanded Clay Aggregate as Replacement of Coarse Aggregate in Concrete Pavement. International Journal of Engineering & Technology. Volume 7, No 4.2, 2018 pp. 1-4

[8] Pavithra A., Jerosia De Rose D. Application of Light Expanded Clay Aggregate as Replacement of Coarse Aggregate in Concrete Pavement. International Journal of Engineering & Technology. Volume 7, No 4.2, 2018 pp. 1-4

[9] Петров В.П. Пористые заполнители высокой прочности // Бетон и железобетон – пути развития: научные труды конференции в пяти книгах / Москва, 2005. – С. 118 – 127

[10] Онацкий, С.П. Производство керамзита. – 3-е изд., перераб. и доп. / С.П. Онацкий – М.: Стройиздат, 1987. – 333 с., ил.

[11] Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология. Книга 1. М.: Теплотехник 2004. 688 с.

[12] Galitskov S.Ya., Galitskov K.S., Samokhvalov O.V. Modelling Operating Area of Condition and Management of High Strength Bloating Clay, Stoving in a Rotary Kiln // Procedia Engineering, XXV P-R-S Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (25PRS), TFoCE 2016, ISSN: 18777058, – Vol. 153, – 2016, – pp. 609 – 612

[13] Galitskov S.Ya., Galitskov K.S., Samokhvalov O.V., Fadeev A.S. Optimal control of ceramsite burning in a rotary kiln // MATEC Web Conferences, 5th International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education”, – Vol. 86, – 2016, Pages 1 – 5

[14] Galitskov K.S., Samokhvalov O.V., Fadeev A.S. Optimization of burning production process of ceramsite with specified density // Environment. Technology. Resources, Volume 3 – Rezekne, 2017, Pages 57 – 61

[15] Галицков К.С., Самохвалов О.В. Выбор элементов вектора задающих сигналов многомерной САУ обжигом керамзита с заданной прочностью // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии: сборник статей [Электронный ресурс] / СГАСУ. Самара, 2016. С. 461 – 465

[16] Датчики температуры Rosemount / www.rosemeter.nt-rt.ru

[17] Беспроводной измерительный преобразователь Rosemount 648 – техническое описание. – 20с.

[18] Отдельное технологическое оборудование для производства керамзита // strommash.ru / URL: http://www.strommash.ru/catalog/ /otdelnoe-tekhnologicheskoe-oborudovanie-dlya-proizvodstva-keramzita (дата обращения: 12.04.2019)

[19] Зайцев В.В., Скиба Б.В., Еркина Н.И., Айтеков Э.К. Методические указания по нормированию расхода топлива и электроэнергии на производство керамзитового гравия – Куйбышев.: НИИКерамзит, 1983. – 51 с.

[20] Галицков С.Я., Фадеев А.С. Оценка снижения энергозатрат на производство керамзита при использовании алгоритма согласованного управления печью // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура: научно-технический журнал/СГАСУ. – Самара, 2013. –Вып. №4 (12). – С 95–98.

[21] Галицков К.С., Галицков С.Я., Самохвалов О.В. Исследования динамики многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита // Вестник Самарского государственного технического университета, Серия «Технические науки», №2 (58) СамГТУ. - Самара, 2018. – С. 7 – 15

Формальный аппарат многоуровневого представления знаний в системах мониторинга состояния протяженных объектов

Губанов Н.Г.
ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
nick_g_gubanov@mail.ru

Мельникова Д.А.
ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
melnikovada1988@mail.ru

Гашенко Ю.В.
ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
juliasarbitova@gmail.com

***Abstract* — the article discusses the methods of forming the information space and issues of monitoring the state of extended objects. Examples of the use of the categorical-functor apparatus are presented.**

Ключевые слова — протяженный объект, категорно-функторный аппарат, многомодельный комплекс, многоуровневый процесс

I. Введение

Трубопроводы являются основными «артериями» в нефтяной и газовой промышленности. В то же время магистральные нефте- и газопроводы относятся к объектам повышенной опасности. Поэтому в процессе эксплуатации протяженных объектов необходим комплексный мониторинг в режиме реального времени.

Современные требования к информационным системам управления в промышленности, активное развитие информационно-коммуникационной среды, а также тенденции к интеграции данных систем управления во многом обуславливают активные работы по созданию интеллектуальных систем управления крупномасштабных предприятий [1].

Такие проекты как умное предприятие, интеллектуальные транспортные системы, умный город, умные сети требуют новых принципов системного анализа, управления, моделирования.

Данные проекты во многом переживают этап становления, что объясняет многообразие предлагаемых подходов и методологий для их поддержки. Однако прослеживаются некоторые тенденции в построении и эксплуатации данных систем, такие как активное использование знаний в процессах принятия решений, единство подходов и комплексная поддержка на всех этапах жизненного цикла системы от анализа предметной области, проектирования до целевой эксплуатации и адаптации (обучения); сценарный подход в процессах управления и принятия решений.

Интегрированные многоуровневые системы поддержки принятия решений (напр. OLAP - online analysis processing) производственными процессами, технологическим оборудованием, транспортно–логистической системой, инженерными и коммуникационными сетями, бизнес процессами, конструторско–технологической документацией требуют системной модели объекта анализа, которая в силу характеристик ОА также является сложной системой [2].

В данных условиях можно выделить информационно-аналитические системы анализа состояния крупномасштабных инфраструктурных промышленных систем (ИАС КИПС), являющиеся основным средством и инструментом системных исследований в данной области.

Соответственно существенной научной проблемой является построение единых подходов, методологии и комплекса прикладных методов и алгоритмов поддержки систем данного класса на основных этапах её жизненного цикла: анализа, проектировании, эксплуатации.

Кроме того, современные требования к характеристикам систем данного класса, когда эффективное формирование и отбор технических и организационных решений требует анализа десятков тысяч параметров [1], кроме того зачастую необходима не просто оценка отдельных параметров, а некоторая топологическая структура, что накладывает дополнительные сложности, показывают, что методы так или иначе связанные с упрощением (усреднением) общесистемных характеристик не приносят приемлемых практических результатов.

II. Методологические основы формирования инфрмационного пространства

В настоящее время активно развиваются методы и алгоритмы системного анализа, моделирования и управления системами, в основе которых лежит подход к локальной организации систем (труды В.Л. Стефанюка, А.В. Жожикашвилли). В частности активно внедряются в различных областях от бизнес-логистики до космической техники мультиагентные системы, вопросам разработки и внедрения посвящены труды учёных (П.О. Скобелева, Г.А. Ржевского и др.). На основе данного подхода системная модель представляется как сеть взаимодействующих моделей, формирующая активную систему знаний ОА.

В качестве некоторого обобщения основных источников, формирующих информационное пространство, можно назвать: данные на выходе ИИС; известные закономерности – заложенные в техдокументации, где данными являются объективные

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-08-01008)

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

законы реального мира, накопленные в фактографических и документальных системах; выявленные закономерности, в частности имитационные модели. Каждый из источников в настоящее время является информационной основой для соответствующих направлений системного анализа, моделирования и управления сложными системами. Однако каждый вид ресурса обладает рядом принципиальных ограничений, существенно сужающих область его применения, в тоже время есть существенные предпосылки для системной интеграции перечисленных ресурсов. Методологической основой для некоторого упорядочивания входной информации может быть подход, основанный на дедуктивном и индуктивном логических выводах, данным вопросам посвящены труды А.С. Потапова, Г.Н.Загоруйко и др., однако применение данных методов «в готовом» виде наталкивается на принципиальные проблемы [2].

Дело в том, что при общей научной концепции индуктивного вывода - подбор модели под имеющиеся данные, методическая их реализация весьма различна в зависимости: от уровня представления информации (высокоуровневые и низкоуровневые задачи индуктивного вывода); информационной полноты; наличия структуры данных.

Уникальность и единичность изготовления систем данного класса, принципиальная многоуровневость процессов, происходящих в системе, её высокая размерность требует поиска новых подходов по комплексированию разнородных, разноуровневых моделей. Эта задача тесно связана с вопросами поиска универсальных критериев оценки моделей, процедур квалиметрии моделей, таких как построение порядка, сравнение моделей и т.п., а также поиска конструктивного формального аппарата унифицирующего описание моделей, а также являющегося основой для процедур структурирования, формирования баз знаний, отбора моделей [3].

III. Использование категорно-функторного аппарата для формирования многомодельных комплексов

В статье приведен обзор коммерческих приложений ИАС КИПС для различных предметных областей, в общем виде *кипс*=<*i,s,p*>, где *i*- потребители инфраструктуры, *s*-транспортная сеть, *p*-поток. Комбинация отношений между данными структурами определяет вид задач управления на различных этапах жизненного цикла (оперативного управления, реконструкции, развития, модернизации). Ученые и практики в данной области указывают на тенденцию к доминированию концепции управления КИПС как комплексную систему поддержки жизненного цикла [4].

Различным целям, дисциплинам и системным уровням моделирования и управления КИПС посвящено множество работ. Большинство из них связаны, так или иначе, с некоторыми усредненными данными, однако удовлетворительные результаты одного уровня подготовки и принятия решений не вполне соответствуют другому, встают вопросы согласования моделей. В этой связи современные ИАС КИПС являются основным инструментарием анализа системного состояния и управления, в основе которых лежит имитационная модель *Skunc*. Анализ инструментальных приложений ведущих мировых компаний в данной области демонстрирует сложившуюся, на сегодняшний день, практику, заключающуюся в единовременной трансляции измерительных и фактографических данных в вычислительную модель. Наблюдение за системным состоянием КИПС сводится к наблюдению за состоянием вычислительного процесса в *Skunc* ИАС КИПС. Однако такие свойства ОА как постоянный дрейф параметров, объективное множество неиндефицируемых воздействий, ограниченность ресурсов получения данных, приводит к тому что требуются постоянные мероприятия по поддержанию системы в актуальном состоянии. На таких масштабах для поддержания соответствия модели и ОА приводит к существенному росту числа точек контроля. Прослежена тенденция к эволюции от вычислительной модели к обучающейся системе [4].

Обзор тенденций развития интеллектуальных систем управления демонстрирует, что одним из перспективных путей развития ИАС КИПС являются сложные системы распознавания. Системы данного класса широко применяются в системах распознавания сенсорной информации, где анализируются многомодальные данные, в частности речевая и текстовая информация; анализ семантической информации, системы очувствления и т.д. Практика реализации данных систем основана на достаточно проработанных научных методологиях совместного распознавания данных различных модальностей. В работе приводится анализ ряда реализованных систем подобного класса. Несмотря на возможность проследить методологические параллели между данными системами и КИПС, последняя имеет существенную специфику. Возникает научная проблема создания ИАС КИПС как сложной системы распознавания. Под термином “сложная система распознавания” учеными понимается многоуровневая интегрированная система индуктивного вывода разнородных данных. В этой связи определены задачи создания методов адаптивной декомпозиции, обобщения выделенных фрагментов и методов формирования модели. Сложность решения данных задач обуславливается индивидуальностью КИПС с одной стороны, когда идентичные фрагменты могут иметь совершенно разное поведение, однако такие свойства КИПС как большая размерность, модульность, демонстрируют принципиальную возможность поиска регулярности на различных уровнях системы [5].

Проблема конструктивного аппарата представления знаний является одной из центральных при создании интеллектуальных систем. Она тесно связана с вопросами выбора концепций системного моделирования, применяемых интеллектуальных технологий обработки данных, специфики объекта и целей моделирования. Анализ существующих, на данный момент, разработок в этой области демонстрирует тренд на интеграцию методов представления знаний.

Целый ряд работ посвящён различным комбинациям методов представления знаний, основанных на синтезе: нейросетевых технологий; нечётких моделей; продукционных систем; семантических сетей и т.д.. В частности, в предыдущих исследованиях, автором был

разработан метод представления и обработки знаний, основанный на синтезе продукционных и фреймовых моделей, где в формальной продукционной системе, в качестве множества входных и выходных литералов используется динамическая, иерархически организованная фреймовая сеть. Научно-методологические и технологические тенденции к интеграции информации определяют поиск научных подходов, позволяющих с единых позиций подходить к вопросам моделирования систем. Ряд работ посвящен структурно-множественному подходу формирования и обработки системных моделей, заключающийся в представлении модели, либо её элементов в виде множеств и отношений между ними. При таком подходе изучение алгебраических свойств моделей сводится, в том числе к изучению свойств отношений [5].

Анализ средств представления данных для формирования многомодельных комплексов показал перспективу использования категорно-функторного аппарата, который основываясь на гомоморфном (структурно эквивалентном) отображении, позволяет описывать объекты инвариантно их внутренней структуре через морфизмы (отличия) их друг от друга.

В категориях свойства объектов могут быть сформулированы целиком на языке гомоморфизмов. Для того чтобы задать категорию необходимо: задать класс объектов категории $Ob(X)$; для каждой пары объектов X и Y и определить множество морфизмов $Hom\ (X,Y)$; для любой тройки объектов X, Y и Z и морфизмов $\propto\in Hom(X,Y)$ и $\beta \in\ Hom\ (X,Y)$ определить композицию $\propto \beta \in\ Hom\ (X,Y)$ для каждого объекта X определить единичный морфизм, а также требовать выполнения следующих условий: для любых объектов X, Y, Z, W и морфизмов $\propto\in Hom(X,Y)$, $\beta \in\ Hom\ (Y,Z)$, $\chi \in\ Hom\ (Z,W)$, должно выполнятся $(\alpha\beta)\chi = \alpha(\beta\chi)$, а также для X, Y и $\propto\in Hom(X,Y)$ должно выполнятся $1_X\alpha =\propto 1_Y =\propto$.

Анализ категорийных структур направлен на выявление свойств различных классов, объектов, категорий (моделей) посредством функторных преобразований; сведение исследования объектов одного класса к исследованию объектов другого класса. Известны пренебрегающие (забывающие) и конструктивные функторы, позволяющие осуществлять обогащение или упрощение логической структуры объектов, решая задачу композиции или декомпозиции [6].

Описанная в ряде работ теория категорных продукционных систем позволяет формировать в терминах категорий понятийную систему ситуационного описания предметной области, представлен аппарат обработки и преобразования и выстраивания порядка в системах продукций. Данная методология помогает концептуально подвести методическую базу под формальные определения многоуровневого описания состояний системы, инкапсулировать множества состояний, а также выстраивать порядок на множестве образцов. В то же время полноценное решение, поставленных в работе научно-технических задач предполагает обогащение концептуальных методик многоуровневыми моделями крупномасштабных инфраструктурных систем, методами и алгоритмами их трансформации и взаимодействия [6].

Ряд работ посвящен формированию сетевых структур, в частности нейросетей, представляют интерес подходы, модульной организации и многоуровневой организации к системному проектированию на основе иерархического семейства стратифицированных моделей.

Анализ имеющихся научных источников показал, что одним из наиболее перспективных путей разрешения системного противоречия является использование регулярных модульных сетей. Модульность ограничивает топологическое разнообразие сетей, но одновременно дает возможность построить простые модели для анализа и синтеза структуры системы. Регулярность позволяет наиболее полно обеспечить выполнение технологических ограничений при технической реализации сети.

Ряд публикаций посвящён методологии и интеллектуальным технологиям систем мониторинга и управления протяженными объектами, на основе анализа структурной динамики в реальном масштабе времени. Результат интерпретации мониторинга сложных технических систем основан на анализе структурной динамики вычислительных моделей и предполагает, эксплуатацию модели предметной области, полученной от экспертов, однако, в данном исследовании получение системной модели является научной задачей и предполагает её генерацию метасистемой знаний об объекте [7].

Многоуровневость предполагает выстраивание порядка на структуре объектов. Методы и алгоритмы индуктивного вывода существенного отличаются друг от друга в зависимости от уровня обрабатываемых данных.

В самом общем виде интеллектуальную систему можно представить в виде информационной базы и машины логического вывода. Информационная база (ИБ) включает в себя базы знаний, базы правил, базы данных, а также соответствующие механизмы формирования, обработки и релевантного вывода данных ресурсов.

Дедуктивный вывод, рассматриваемый в классической логике как вывод от общего к частному, в настоящее время хорошо изучен и исследован. В русле данного подхода построены методы решающих широкий ряд прикладных задач. В частности направление автоматического доказательства теорем, лежит в основе экспертных систем, построенных на симбиозе человека и машины в решении сложноструктурированных, трудноформализуемых задач, где экспертом задаётся стратегия решения, выполняются функции декомпозиции сложной проблемы на составляющие, сокращение пространства поиска, отбором нужных эвристик, а вычислительная система осуществляет вывод релевантных знаний.

Анализ развития современных систем логического вывода показывает перспективность использования в рамках одной системы комплексного подхода, включающего абдукции для получения гипотез, объясняющих наблюдения за параметрами системы состоянием среды, индукции для формирования и оценки правил вывода, и дедукции для прогнозирования перспективного состояния системы [7].

Индуктивный вывод, в сложных системах позволяет строить обобщенные модели знаний, основан на построении некоторого общего правила на основании анализа конечного множества наблюдаемых фактов. Качество обобщённых моделей зависит от полноты набора фактов, которым он пользуется при формировании гипотез. Процедурно, процесс индуктивного вывода сложноформализуем и заключается в машинном построении новых гипотез на основе наблюдаемых фактов.

Категорный математический аппарат многоуровневого представления, для анализа и обработки разнородных данных и моделей, на параметрическом, структурном и семантическом уровнях для всех этапов функционирования от измерения телеметрируемых параметров, обработки измерительной информации, формирования алгоритмов вычисления целевых параметров до формирования моделей баз знаний и баз данных. Предложены методы построения стратифицированных системных моделей, удовлетворяющих требованиям математических категорий. В рамках данного аппарата предложен ряд конструктивных заключений и методов, позволяющих автоматически формировать множество категорных моделей, выявлять структуру и свойства отношений на моделях данных и знаний, формировать алгоритмы формальной декомпозиции и агрегирования на элементах структур данных [8].

Комплексная обработка информации в современных информационно-вычислительных системах проходит в несколько этапов: сбор априорной информации и формирование модели данных; структуризация собранных моделей и формирования баз знаний; формирование многомодельной структуры объекта анализа; формирование множества алгоритмов вычисления целевых параметров.

В соответствии с целями исследования построен формально-математический аппарат на основе категорного подхода, инвариантный к видам обрабатываемой информации и этапам обработки данных.

Как было отмечено в предыдущей главе, конструктивным путём снижения неопределённости в процессах предварительной подготовки данных процедур поддержки принятия решений является синтез дедуктивных, индуктивных и абдуктивных методов логического вывода. Данные методы основаны на, таких общенаучных понятиях, как отношения «общее-частное» [8].

Структура и функционирование аналитических систем – S зависит от следующих информационных сущностей: объекта анализа (протяженного объекта) - Q; цели функционирования аналитической системы - G, определяемой конкретной задачей принятия решения; полимодельного комплекса, задающего структуру системы - M; среды, определяющей параметры системы - C, а также отношений между данными структурами $R = \left(r_{Q,M}, r_{Q,C}, r_{Q,G}, r_{M,C}, r_{Q,M}, r_{Q,C}\right)$.

Заполнителями слотов могут быть знания как декларативного, так и процедурного характера. Знания декларативного характера содержат факты, знания процедурного характера содержат правила формирования и использования знаний. При использовании в качестве заполнителей слотов только декларативных знаний, необходимо использовать внешнюю управляющую структуру.

Опираясь на научную концепцию обработки знаний в интеллектуальных системах, основанную на системном взаимодействии системных ситуаций и системных образцов.

Задача индуктивного вывода формулируется как замена системных ситуаций системным образцом вида:

$$S^{Obj} = \left(s^{Obj}_{\langle n_1\rangle}, s^{Obj}_{\langle n_2\rangle}, \dots s^{Obj}_{\langle n_k\rangle}\right) \rightarrow E^{Obj}_{\langle n\rangle} = \left(M^{Obj}_{\langle n\rangle}, D^{Obj}_{\langle n\rangle}\right) | n \in \{\langle name\rangle\}; Obj \in \{\text{Кипс}\}$$

где S^{Obj}-набор системных ситуаций; $E^{Obj}_{\langle n\rangle}$ - системный образец;$M^{Obj}_{\langle n\rangle}$ - модель; $D^{Obj}_{\langle n\rangle}$ - невязки системной модели. Подставив в выражение данные собственного количества информации, сформирован критерий отбора модели $h = \arg\min[I(h) + I\langle D|h\rangle], h \in H$ который эксплуатирует методические направления индуктивного вывода, основанные на принципах минимальной длины описания [8].

Концептуально, функционирование интеллектуальной системы, основанной на знаниях, заключается во взаимодействии трех информационных структур (модельных описаний): детализация системы знаний, содержащей комплекс образцов модельных описаний, при помощи системы измерительной информации, генерируется экземпляр состояния системы с последующей его, автоматизированной или экспертной интерпретацией. В ряде работ обосновывается утверждение, которое поддерживается спецификой ИАС КИПС, что структурно, данные информационные структуры эквивалентны, т.к. являются вариантом образа одного физического объекта (КИПС/фрагмент КИПС) соответственно вышеизложенную схему взаимодействия можно интерпретировать как обработку экземпляров состояния системы.

Соответственно модельное описание системного состояния α: $I \rightarrow S$ считается сопоставимой образцом модельного описания φ: $X \rightarrow S$, при условии, если существует морфизм β: $I \rightarrow X$, удовлетворяющий условию $\alpha=\beta\varphi$. Системой образцов модельных описаний называется подкатегория категории множеств, в которой выделен некоторый класс морфизмов, называемых модельным описанием системных состояний, при этом должно выполняться условие: если α, β, φ - морфизмы, такие, что $\alpha=\beta\varphi$, то морфизм.α является ситуацией в том и только в том случае, когда ситуацией является морфизм β.

Образцом называется тройка (X, S, φ), где X, S-объекты категории, а φ: $X \rightarrow S$ - морфизм. Ситуация α: $I \rightarrow S$ считается сопоставимой с образцом φ: $X \rightarrow S$, если существует морфизм β: $I \rightarrow X$, удовлетворяющий условию $\alpha=\beta\varphi$. Продукцией из S в T, где S и T - объекты категории, называется пара образцов (X, S, φ), (X, T, ψ), т.е. продукция задается парой морфизмов φ: $X \rightarrow S$ и ψ: $X \rightarrow T$. Продукция считается применимой к ситуации α: $I \rightarrow$

S, если для некоторого морфизма β: $I \to X$ имеем $\alpha=\beta\varphi$. Результатом применения продукции к ситуации α будет морфизм $\beta\psi$: $I \to T$, являющийся ситуацией.

Объектами категорной модели являются вычислительные модели, определенные множествами входных параметров и выходных и выходных параметров. В стратифицированном семействе моделей переход на следующий иерархический уровень модельных представлений связан с выделением инвариантов для модели текущего уровня. Для категории параметрического уровня, инвариантами являются отношения порядка, определенные на терминальных параметрах модулей. Отношения порядка однозначно определяют топологию межмодульных связей. Обработка элементов данной категории основано на подходах связанных с топологическими пространствами, когда изучаются их отношения взаимного расположения и включения, элементы сравниваются, когда один из них является частью другого [9].

IV. Заключение

В данном исследовании задача анализа базируется на реализации жизненного цикла обработки знаний и заключается в поэтапной процедуре выделения, обобщения, отчуждения и последующего использования знаний КИПС. Задачи индуктивного вывода реализуются на системной модели ИАС КИПС, и заключаются в процедурах формирования (отбора) системных образцов заданного уровня и заданного показателя обобщения в результате обобщения системных ситуаций заданного уровня. Специфика данной процедуры с точки зрения распознавания, как научного направления, определяется особенностями предметной области и заключается в высокой вычислительной мощности задачи, необходимостью введения интерпретирующих процедур индуктивных алгоритмов разного рода. Стратегия решения перечисленных задач в данном исследовании сводится в искусственному выстраиванию сложноорганизованной, многоуровневой иерархической структуры, что, в итоге, приводит к переходу от экспоненциальной сложности к полиноминальной. Дано формальное определение задач индуктивного вывода на категорных моделях ИАС КИПС.

Список литературы

[1] Батищев В.И. Методы автоматизации формирования информационных систем транспортного моделирования [Текст] / В.И. Батищев, Н.Г. Губанов // Актуальные проблемы автотранспортного комплекса: межвузовский сб. научных статей. – Самара: Самар. гос. тех. ун-т. 2010. С. 182 – 185.

[2] Батищев В.И. Аппроксимационные методы и системы промышленных измерений, контроля, испытаний, диагностики [Текст] / В.И.Батищев, В.С.Мелентьев. -М.: Машиностроение-1, 2007. - 393 с.

[3] Охтилев М. Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов [Текст] / М. Ю. Охтилев, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов. - М.: Наука, 2006. - 410 с.

[4] Батищев В.И. Аппликативно-категорные методы адаптивного формирования информационных систем анализа состояния сложных технических объектов [Текст] / В.И. Батищев, Н.Г. Губанов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XI Международ. конф. – Самара: СНЦ РАН, 2008. – С. 186-190.

[5] Батищев В.И. Методы адаптивного формирования информационных систем анализа состояния сложных технических объектов [Текст] / В.И. Батищев, Н.Г. Губанов Прикладная информатика №6(24) 2009, С. 152 - 156.

[6] Батищев В.И. Категорные методы комплексного представления и структуризации разнородных данных в информационных системах анализа сложных объектов [Текст] / В.И. Батищев, Н.Г. Губанов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XII Международ. конф. – Самара: СНЦ РАН, 2010. – С. 263-267.

[7] Потапов А.С. – Распознавание образов и машинное восприятие: Общий подход на основе принципа минимальной длины описания [Текст] / А.С. Потапов. – СПб.: Политехника, 2007. – 548 с.: ил.

[8] Губанов Н.Г. Категорный подход при формировании полимодельных комплексов сложных систем [Текст] / Н.Г. Губанов // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2008. Вып. 1 (21) С. 183 - 185.

[9] Батищев В.И. Методология оперативной реструктуризации информационных систем анализа состояния сложных технических объектов [Текст] / В.И. Батищев, Н.Г. Губанов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. X Международ. конф. – Самара: СНЦ РАН, 2008. – С. 176-180.

Об одном методе решения нестационарных задач теплопроводности с постоянными во времени внутренними источниками теплоты

Губарева К.В.
Теплоэнергетический факультет
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
Самара, Россия
r.kristina2017@mail.ru

Попов А.И.
Теплоэнергетическийфакультет
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
Самара, Россия
pixinot@icloud.com

Краснова Н.П.
Теплоэнергетическийфакультет
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
Самара, Россия
krasnova–pt@yandex.ru

Трубицын К.В.
Теплоэнергетическийфакультет
ФГБОУВО «СамГТУ»
Самара, Россия
tef–samgtu@yandex.ru

Ткачев В.К.
Теплоэнергетическийфакультет
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
Самара, Россия
tvk93@yandex.ru

***Abstract*—The mathematical description of the heat transfer in bodies with internal heat sources processes presents serious difficulties. To obtain solutions of boundary-value problems describing these processes, exact (Fourier method, integral transformations, etc.), approximate (collocation, Galerkin method) analytical methods are used, as well as numerical methods (finite differences, finite elements, etc.). The solutions obtained by using exact analytical methods are expressed by complex functional dependencies and are unsuitable for engineering. The most significant difficulties are problems with nonlinear sources of heat, periodic action, etc. The use of classical analytical methods to solve them is extremely difficult, and in some cases impossible. Despite all these circumstances, analytical solutions have a number of serious advantages over numerical ones, since they allow performing parametric analysis of the studied processes. Based on the integral heat balance method and additional boundary conditions (characteristics) use, a numerical - analytical solution of the heat conduction problem for an infinitely long plate under symmetric first kind border conditions with constant power internal sources is obtained. The physical meaning of the boundary conditions consists in the fulfillment of the initial differential equation at the boundary points of the system under consideration - at the points where the first kind boundary condition is specified. By introducing into consideration a new sought-for function, heat flux on the plate surface, a simple form analytical solution of the problem was obtained. It is shown that with an increase in the number of approximations, the discrepancy of the equation being solved decreases, which indirectly indicates the convergence of the method. It is also noted that the approach proposed can be used to solve partial differential equations that exclude the separation of variables.**

***Ключевые слова*—аналитическое решение, скорость распространения теплоты, внутренние источники теплоты, граничные условия первого рода, приближенное решение, интеграл теплового баланса.**

I. ВВЕДЕНИЕ

Внутренние источники теплоты могут возникать внутри твердых тел вследствие различных факторов. В инженерной практике действие внутренних источников теплоты, как правило, обусловлено протеканием в объеме тела экзотермических реакций, воздействием электромагнитных полей и др. При течении жидкостей наличие источников теплоты связано с диссипативными процессами выделения энергии вследствие внутреннего трения [9].В зависимости от соотношения мощности источников теплоты и граничных условий температура тела с течением времени может либо неограниченно возрастать (тепловое воспламенение), либо устанавливаться на некотором уровне.

В данной работе представлены результаты разработки численно – аналитического метода решения краевых задач теплопроводности, основанного на совместном использовании дополнительных граничных условий в интегральном методе теплового баланса и дополнительной искомой функции. В частности, рассмотрена задача теплопроводности в пластине (стержне) с постоянными теплофизическими свойствами и внутренним источником теплоты. Допущение о постоянстве свойств материала ($a = const$) справедливо при исследовании процессов переноса теплоты в относительно узком диапазоне изменения температур. В этом случае принятое допущение не оказывает существенного влияния на точность получаемых решений.

Разработанный метод позволяет получать решения задач теплопереноса в аналитической форме. Такие решения информативнее численных и позволяют выполнять параметрический анализ системы, а также параметрическую идентификацию – определение числовых параметров математической модели, при которых решение задачи соответствовало бы экспериментальным данным.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основные положения метода рассмотрим на примере решения задачи теплопроводности для бесконечно протяженной пластины с внутренним источником теплоты при симметричных граничных условиях первого рода. Математическая постановка данной задачи с учетом симметрии (для половины пластины) имеет вид [1]

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 18–79–00171 и Совета по грантам Президента РФ в рамках научного проекта МК–2614.2019.8.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

$$\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 T(x,\tau)}{\partial x^2} + \frac{\omega}{c\gamma}, \quad (\tau > 0; \quad 0 < x < \delta); \quad (1)$$

$$T(x, 0) = T_0; \quad (2)$$

$$T(0, \tau) = T_{ст}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T(\delta, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

где T – температура, K; x – координата, $м$; τ – время, c; $a = \lambda/(c\rho)$ – коэффициент температуропроводности, $м^2/c$; λ – коэффициент теплопроводности; ρ – плотность, $кг/м^3 \cdot$; c – удельная теплоемкость, $Дж/(кг \cdot K)$; ω – удельная мощность внутреннего источника теплоты, $Вт/м^3$; T_0 – начальная температура, K; $T_{ст}$ – температура стенки, K; δ – половина толщины пластины, $м$.

Задача (1) – (4) может быть представлена в безразмерном виде [1]

$$\frac{\partial \Theta(\xi, \mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}} = \frac{\partial^2 \Theta(\xi, \mathrm{Fo})}{\partial \xi^2} + \mathrm{Po}, \quad (5)$$

$$(\mathrm{Fo} > 0; \quad 0 < \xi < 1);$$

$$\Theta(\xi, 0) = 0; \quad (6)$$

$$\Theta(0, \mathrm{Fo}) = 1; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Theta(1, \mathrm{Fo})}{\partial \xi} = 0, \quad (8)$$

где $\Theta = (T - T_{ст})/(T_0 - T_{ст})$ – безразмерная температура; $\xi = x/\delta$ – безразмерная координата; $\mathrm{Fo} = a\tau/\delta^2$ – критерий Фурье (безразмерное время); $\mathrm{Po} = \omega\delta^2/[\lambda(T_{ср} - T_0)]$ – критерий Померанцева.

III. Решение задачи

В соответствии с предлагаемым методом, введем в рассмотрение новую искомую функцию времени

$$\varphi(\mathrm{Fo}) = \frac{\partial \Theta(0, \mathrm{Fo})}{\partial \xi} = tg\,\alpha, \quad (9)$$

где α – угол между касательной к графику функции $\Theta(\xi, \mathrm{Fo})$ в точке $\xi = 0$ и координатной осью (см. рис. 1). На рис. 1 показаны кривые распределения температуры в пластине в различные моменты времени. Вследствие действия внутреннего источника теплоты безразмерная температура пластины может принимать значения $\Theta(\xi, 0) > 1$, что, согласно принятым обозначениям, свидетельствует о повышении температуры внутри пластины выше температуры стенки $T > T_{ст}$. Таким образом, при краевых условиях задачи (5) – (8), угол α изменяется в диапазоне $-\pi/2 < \alpha < \alpha_{max}$, где $\alpha_{max} \to 0$ при $\mathrm{Po} = 0$ и $\alpha_{max} \to \pi/2$ при $\mathrm{Po} \to \infty$. В общем случае, область определения новой искомой функции будет

$$-\infty < \varphi(\mathrm{Fo}) < \infty. \quad (10)$$

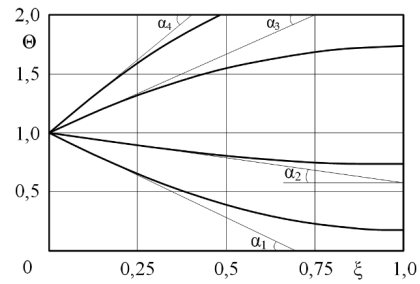


Рис. 1. Графики распределения температуры в пластине с внутренним источником теплоты

Возвращаясь к размерным величинам, выражение (9) может быть записано в виде

$$\varphi(\tau) = \frac{\delta}{T_{ст} - T_0}\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x}. \quad (11)$$

На поверхности пластины плотность теплового потока по закону Фурье определяется выражением

$$q(\tau) = -\lambda\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x}. \quad (12)$$

С учетом (12), соотношение (11) будет

$$\varphi(\tau) = \frac{\delta}{\lambda(T_0 - T_{ст})}q(\tau) = k\,q(\tau), \quad (13)$$

где $k = const$ – некоторый коэффициент, определяемый масштабом системы. Таким образом, новая искомая представляет собой плотность теплового потока в точке приложения граничного условия первого рода в произведении с константой.

Решение задачи (5) – (8) представим в виде полинома n – ой степени

$$\Theta(\xi, \mathrm{Fo}) = \sum_{i=1}^{n} b_i(\mathrm{Fo})\,\xi^{i-1}, \quad (14)$$

где $n \in N$ – натуральное число, соответствующее количеству членов ряда (14); $b_i(\mathrm{Fo})$ – неизвестные коэффициенты, зависящие от безразмерного времени.

Для получения решения задачи (5) – (8) в первом приближении ограничимся тремя слагаемыми (n=3) в выражении (14). Для определения неизвестных коэффициентов $b_i(\mathrm{Fo})$ подставим соотношение (14) в

(7), (8), а также в дополнительное условие (9). В результате подстановки получим

$$\begin{cases} b_1 = 1; \\ b_2 + 2b_3 = 0; \\ b_2 - \varphi(\mathrm{Fo}) = 0. \end{cases}$$

Из решения системы алгебраических уравнений определим

$$b_1(\mathrm{Fo}) = 1; \quad b_2(\mathrm{Fo}) = \varphi(\mathrm{Fo}); \quad b_3(\mathrm{Fo}) = -\frac{\varphi(\mathrm{Fo})}{2}.$$

Соотношение (14) с учетом найденных коэффициентов запишется в виде

$$\Theta(\xi, \mathrm{Fo}) = f_1(\xi)\,\varphi(\mathrm{Fo}) + 1, \qquad (15)$$

где $f_1(\xi) = \xi\,(1 - 0{,}5\,\xi)$ – координатная функция. Полученное соотношение удовлетворяет граничным условиям (7), (8), а также дополнительному условию (9) при любых значениях функции $\varphi(\mathrm{Fo})$.

Для приближенного удовлетворения исходного дифференциального уравнение (5) составим интеграл теплового баланса [8]

$$\int_0^1 \frac{\partial \Theta(\xi, \mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}}\, d\xi = \int_0^1 \left(\frac{\partial^2 \Theta(\xi, \mathrm{Fo})}{\partial \xi^2} + \mathrm{Po} \right) d\xi. \qquad (16)$$

Удовлетворение искомым решением интеграла теплового баланса – осредненного в пределах изменения пространственной переменной уравнения (5), позволяет свести решение исходного дифференциального уравнения в частных производных к интегрированию обыкновенного дифференциального уравнения относительно новой искомой функции.

Вычисляя интеграл (16), получаем обыкновенное дифференциальное уравнение вида

$$\frac{d\varphi(\mathrm{Fo})}{d\mathrm{Fo}} + 3\varphi(\mathrm{Fo}) - 3\mathrm{Po} = 0, \qquad (17)$$

из решения, которого находим

$$\varphi(\mathrm{Fo}) = C_1 e^{-3\mathrm{Fo}} + \mathrm{Po}, \qquad (18)$$

где C_1 – константа интегрирования.

Подставляя (18) в (15), получаем

$$\Theta(\xi, \mathrm{Fo}) = f_1(\xi)(\, C_1 e^{-3\mathrm{Fo}} + \mathrm{Po}) + 1. \qquad (19)$$

Для выполнения начального условия (6) составим его невязку и потребуем ортогональности невязки к координатной функции $f_1(\xi)$

$$\int_0^1 [\Theta(\xi, 0)] f_1(\xi)\, d\xi = 2C_1 + 5 + 2\mathrm{Po} = 0. \qquad (20)$$

Из решения уравнения (20) определим константу интегрирования $C_1 = -2{,}5 - \mathrm{Po}$. Выражение (19) с учетом найденного значения C_1 представляет решение задачи (5) – (8) в первом приближении и может быть записано в виде

$$\Theta(\xi, \mathrm{Fo}) = ((-2{,}5 - \mathrm{Po})\, e^{-3\mathrm{Fo}} + \mathrm{Po})\xi(1 - 0{,}5\xi) + 1. \qquad (21)$$

Результаты расчетов температуры по формуле (21) приведены на рис. 2, 3.

Невысокая точность полученного в первом приближении решения обусловлена недостаточным числом членов ряда (14). Во втором приближении будем использовать шесть слагаемых в (14). При определении неизвестных коэффициентов $b_i(\mathrm{Fo})$ в выражении (14) помимо условий (7), (8), (9) будут использоваться дополнительные граничные условия [7, 8], физический смысл которых состоит в выполнении исходного дифференциального уравнения (5) и выражений, полученных после его дифференцирования в точках $\xi = 0$ и $\xi = 1$. Отметим, что в работах [3] показано, что выполнение уравнения лишь в граничных точках приводит к его выполнению и внутри области.

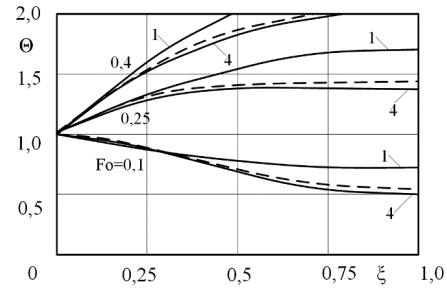


Рис. 2. Распределение безразмерной температуры в пластине: —— – приближенное решение, – – – – точное решение; 1, 4 – номер приближения; Po = 5

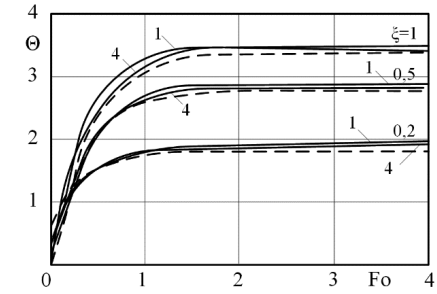


Рис. 3. Распределение безразмерной температуры в пластине. —— – приближенное решение; – – – – – точное решение;1, 4 – номер приближения; Po = 5

Для получения решения задачи (5) – (8) во втором приближении будем использовать шесть членов ряда (14) ($n = 6$). В этом случае, для определения неизвестных коэффициентов $b_i(\mathrm{Fo})$ помимо условий (7), (8), (9) будем использовать три дополнительных

условия, два из которых будут записаны для точки $\xi = 0$ и одно для $\xi = 1$ [8].

Первое дополнительное граничное условие получим, записав уравнение (5) в точке $\xi = 0$

$$\frac{\partial^2 \Theta(\xi, \mathrm{Fo})}{\partial \xi^2} + \mathrm{Po} = 0 . \qquad (22)$$

Для получения второго дополнительного условия продифференцируем исходное дифференциальное уравнение по пространственной переменной ξ

$$\frac{\partial^2 \Theta(\xi, \mathrm{Fo})}{\partial \xi \partial \mathrm{Fo}} = \frac{\partial^3 \Theta(\xi, \mathrm{Fo})}{\partial \xi^3} . \qquad (23)$$

Записывая соотношение (23) в точке $\xi = 0$ с учетом (9), получаем второе дополнительное условие

$$\frac{\partial \varphi(\mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}} = \frac{\partial^3 \Theta(0, \mathrm{Fo})}{\partial \xi^3} . \qquad (24)$$

Третье граничное условие может быть получено путем однократного дифференцирования исходного уравнения (5) по пространственной переменной применительно к точке $\xi = 1$. С учетом граничного условия (8) оно принимает вид

$$\frac{\partial^3 \Theta(1, \mathrm{Fo})}{\partial \xi^3} = 0 . \qquad (25)$$

Подставляя (14) в (7), (8), (9) и дополнительные условия (22), (24), (25). Получаем систему шести алгебраических уравнений, из решения которой определяем неизвестные коэффициенты $b_i(\mathrm{Fo})$ ($n = 6$)

$$b_1(\mathrm{Fo}) = 1; \quad b_2(\mathrm{Fo}) = \varphi(\mathrm{Fo}); \quad b_3(\mathrm{Fo}) = -\frac{\mathrm{Po}}{2};$$

$$b_4(\mathrm{Fo}) = \frac{1}{6}\frac{d\varphi(\mathrm{Fo})}{d\mathrm{Fo}};$$

$$b_5(\mathrm{Fo}) = -\frac{5}{24}\frac{d\varphi(\mathrm{Fo})}{d\mathrm{Fo}} - \frac{1}{2}\varphi(\mathrm{Fo}) - \frac{1}{2}\mathrm{Po};$$

$$b_6(\mathrm{Fo}) = \frac{1}{15}\frac{dq(\mathrm{Fo})}{d\mathrm{Fo}} + \frac{1}{5}\varphi(\mathrm{Fo}) - \frac{1}{5}\mathrm{Po}$$

После подстановки выражения (14) в интеграл теплового баланса (16) с учетом найденных коэффициентов получим однородное дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{d^2\varphi(\mathrm{Fo})}{d\mathrm{Fo}^2} + 39\frac{d\varphi(\mathrm{Fo})}{d\mathrm{Fo}} + 90\varphi(\mathrm{Fo}) - 90\mathrm{Po} = 0 . \qquad (26)$$

Его решение имеет вид

$$\varphi(\mathrm{Fo}) = C_1 \exp(K_1 \mathrm{Fo}) + C_2 \exp(K_2 \mathrm{Fo}) + \mathrm{Po} , \qquad (27)$$

где $K_1 = 2{,}4633$; $K_2 = 36{,}5370$.

Выражение (14) после подстановки в него (27) может быть представлено в виде

$$\Theta(\xi, \mathrm{Fo}) = f_1(\xi)\, C_1 \exp(K_1 \mathrm{Fo}) + $$

$$+ f_2(\xi)\, C_2 \exp(K_2 \mathrm{Fo}) + 1 , \qquad (28)$$

где

$$f_1(\xi) = \left(\frac{K_1}{15} + \frac{1}{5}\right)\xi^5 - \left(\frac{5K_1}{24} + \frac{1}{2}\right)\xi^4 + \frac{K_1}{6}\xi^3 + \xi ;$$

$$f_2(\xi) = \left(\frac{K_2}{15} + \frac{1}{5}\right)\xi^5 - \left(\frac{5K_2}{24} + \frac{1}{2}\right)\xi^4 + \frac{K_2}{6}\xi^3 + \xi .$$

Составляя невязку начального условия и требуя ортогональности невязки к каждой координатной функции $f_1(\xi)$ и $f_2(\xi)$, получаем систему двух алгебраических уравнений

$$\begin{cases} \int_0^1 \Theta(\xi, 0) f_1(\xi)\, d\xi = 0, \\ \int_0^1 \Theta(\xi, 0) f_2(\xi)\, d\xi = 0. \end{cases}$$

из решения, которой найдем

$$C_1 = -0{,}1\mathrm{Po} - 2{,}0 ; \quad C_2 = -0{,}8\mathrm{Po} - 2{,}0 .$$

Выражение (28) с учетом найденных констант интегрирования представляет решение задачи (5) – (8) во втором приближении. Для дальнейшего повышения точности необходимо увеличивать число членов ряда (14). Так, в третьем приближении будем использовать девять членов ряда, в четвертом – двенадцать и так далее. Для нахождения неизвестных коэффициентов будем использовать дополнительные граничные условия. Общие формулы для их определения имеют вид

$$\frac{\partial^{2k}\Theta(0, \mathrm{Fo})}{\partial \xi^{2k}} = 0 ; \; \frac{\partial^k \varphi(\mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}^k} = \frac{\partial^{2k+1}\Theta(0, \mathrm{Fo})}{\partial \xi^{2k+1}} ;$$

$$\frac{\partial^{2k+1}\Theta(1, \mathrm{Fo})}{\partial \xi^{2k+1}} = 0 ,$$

где $k = 1, 2, 3 \ldots$ – номер приближения.

Результаты расчётов температуры в четвертом приближении в сравнении с численным решением представлены на рис. 2, 3. Из их анализа следует, что в диапазоне $0{,}1 \le \mathrm{Fo} < \infty$ расхождение полученных результатов не превышает 3%.

На рис. 4, 5 представлены графики функции $\varphi(\mathrm{Fo})$. Отмечается, что точность определения искомой функции $\varphi(\mathrm{Fo})$ (теплового потока на поверхности) значительно

выше точности определения температуры. Расхождение результатов расчетов теплового потока φ(Fo) по формуле (9) с численным решением в диапазоне безразмерного времени $0{,}1 \le \mathrm{Fo} < \infty$ не превышает 5% уже в первом приближении.

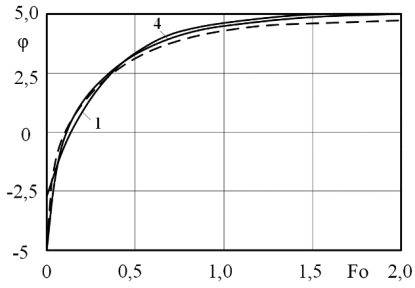


Рис. 4. Графики изменения функции $\varphi(\mathrm{Fo})$:——— – приближенное решение; – – – – – точное решение; 1, 4 номер приближения; Po = 5

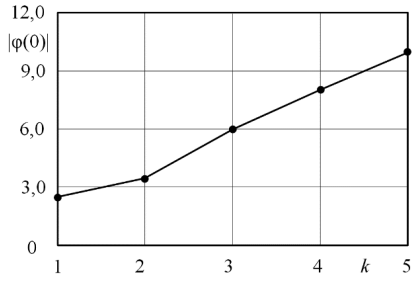


Рис. 5. Графики изменения функции $\varphi(\mathrm{Fo})$ при $\mathrm{Fo} = 0$ в зависимости от числа приближений

Из анализа рис. 5 следует также, что абсолютное значение функции φ(Fo) в момент времени $\mathrm{Fo} = 0$ возрастает с увеличением числа приближений, что полностью согласуется с гипотезой о бесконечной скорости распространения теплоты, лежащей в основе вывода классического параболического уравнения теплопроводности (5)[2, 4 – 6]. Из анализа точного аналитического решения параболического уравнения теплопроводности известно, что тепловой поток на поверхности тела при задании граничного условия первого рода устремляется к бесконечному значению в момент времени $\mathrm{Fo} = 0$. Таким образом, в предлагаемом методе величина теплового потока в начальный момент времени ограничена некоторым конечным значением, возрастающим с увеличением числа приближений.

Сходимость метода и его точность можно оценить также на основе анализа невязки $\varepsilon(\xi, \mathrm{Fo})$ уравнения (5)

$$\varepsilon(\xi, \mathrm{Fo}) = \frac{\partial \Theta(\xi, \mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}} - \frac{\partial^2 \Theta(\xi, \mathrm{Fo})}{\partial \xi^2} - \mathrm{Po} \qquad (29)$$

Из анализа кривых, представленных на рис. 6, следует, что с увеличением числа приближений невязка уравнения уменьшается, что свидетельствует о сходимости метода.

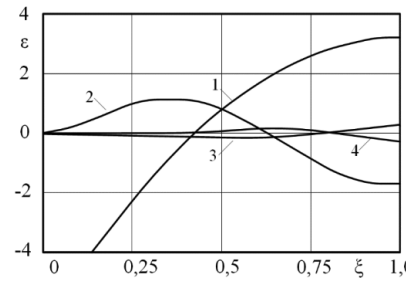


Рис. 6. Невязка уравнения (5); 1,2,3,4 – номер приближения; Fo = 0,5; Po = 5

IV. Выводы

1. На основе метода введения новой искомой функции и дополнительных граничных условий получено приближенное аналитические решение задачи теплопроводности для бесконечной пластины с внутренним источником теплоты при граничных условиях первого рода.

2. Показано, что с увеличением числа приближений абсолютное значение функции φ(Fo) в момент времени $\mathrm{Fo} = 0$ возрастает, что свидетельствует о повышении точности получаемого решения. Невязка исходного дифференциального уравнения $\varepsilon(\xi, \mathrm{Fo})$ при этом уменьшается.

3. Разработанный метод особенно эффективен при определении плотности теплового потока на поверхности тела, погрешность определения которого в диапазоне времени $0{,}1 \le \mathrm{Fo} < \infty$ составляет не более 5% уже в первом приближении.

Список литературы

[1] Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.

[2] Лыков А.В. Применение методов термодинамики необратимых процессов к исследованию тепло – и массообмена // Инженерно – физический журнал. Т. 9, № 3. 1956. С. 287 – 304.J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.

[3] Фёдоров Ф.М. Граничный метод решения прикладных задач математической физики. Новосибирск. Наука. 2000. 220 с.

[4] KudinovV.A., Eremin, A.V., Stefanyuk, E.V.Critical conditions for thermal explosion in a plate with a nonlinear heat source // Journal of Machinery Manufacture and Reliability45(1). 2016 p. 38 – 43.

[5] Kudinov, V.A., Eremin, A.V., Zhukov, V.V. Mathematical Models of Heat Ignition and Explosion Considering Local Non–Equilibrium of Processes // Journal of Physics: Conference Series. 2017. 891(1).

[6] Kudinov, V.A., Eremin, A.V., Kudinov, I.V., Zhukov, V.V. Strongly Nonequilibrium Model of Thermal Ignition with Account for Space–Time Nonlocality // Combustion, Explosion and Shock Waves. 2018. 54(6).

[7] Кудинов В.А., Еремин А.В., Стефанюк Е.В. Критические условия теплового взрыва в пластине с нелинейным источником теплоты // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 1. С. 44-49.

[8] Кудинов В.А., Карташов Э.М., Калашников В.В. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций. Учеб. пос. для вузов. М.: Высшая школа, 2005. 340 с.

[9] Eremin, A.V., Kudinov, I.V., Dovgyallo, A.I., Kudinov, V.A. Heat Exchange in a Liquid with Energy Dissipation // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. 90(5), p. 1234-1242.

Численно-аналитическая модель теплообмена для потока с переменной скоростью

Данилушкин И.А.
Самарский государственный технический университет
г. Самара, Российская Федерация
idanilushkin@mail.ru

***Abstract* — The heat exchange process between the medium and a constant rate flow for a certain class of problems is described with sufficient accuracy by a one-dimensional first-order hyperbolic partial differential equation. Such equation has an exact solution that can be represented as a block diagram with typical transfer functions. When formulating a problem with a time-varying rate flow, there is no exact solution to the hyperbolic equation. The paper considers an approach in which a numerical model of a heat exchange process between the medium and a time-varying rate flow is based on an exact solution of the heat exchange problem between the medium and the constant rate flow. The structural theory of distributed systems allows obtaining the transfer function for heating process of a constant rate flow, which block diagram includes a transport delay block. As the main element of the numerical model of heat exchange with a variable flow rate, a block of simulation a variable transport delay is used. The signal from the block input passes on to the output with a time delay, which duration is determined as the ratio between the length of the heat exchange section and an integral of the flow rate. The paper proposes a numerical-analytical model of the heat exchange process when a medium temperature is the same along the length of the heat exchange section and varies arbitrarily with the time. The developed model is compared with the exact solution for the special case of a step variation of the flow rate. The results of computer simulation are given. The proposed approach simplifies the model block diagram with a moderate decrease in the accuracy of transient process modeling. In addition, the behavior of the model in statics is fully consistent with the analytical solution for a constant flow rate.**

Ключевые слова — численно-аналитическая модель, поток с переменной скоростью, теплообмен, гиперболическое уравнение, объект с распределёнными параметрами

I. Введение

Процесс теплообмена материального потока с окружающей средой часто рассматривается как типовая модель физического процесса: теплообменные аппараты, проходные нагревательные печи, проточные химические установки и т.п. [1–4]. В тех случаях, когда необходимо учитывать изменение температуры потока по длине теплообменного аппарата, процесс описывается в виде одномерного гиперболического уравнения первого порядка. При постоянной скорости потока уравнение имеет аналитическое решение. Это решение для любой фиксированной точки по длине нагревателя может быть представлено в виде структурной схемы из типовых звеньев с сосредоточенными параметрами. В случае, когда скорость потока произвольно изменяется в течение времени, решение носит приближённый характер и может быть получено разными способами: путём линеаризации исходного уравнения [1, 2, 4, 5], численными методами решения дифференциальных уравнений в частных производных [6], с помощью разложения уравнения в ряд Фурье по базису ортонормированных функций [7, 8]. Решение, полученное на базе линеаризации, удовлетворительно ведёт себя при незначительных отклонениях скорости от выбранного установившегося режима. Численные методы, а также разложение в ряд Фурье позволяют получить любую точность, необходимую при решении практических задач. Сложность их использования заключается в высокой вычислительной ёмкости получаемых решений.

В данной работе предложен способ построения модели теплообмена для потока с переменной скоростью на базе типового алгоритма моделирования переменного транспортного запаздывания, применяющегося в современных средах компьютерного моделирования динамических систем с сосредоточенными параметрами (Simulink, VisSim, SimInTech, и т.п.).

II. Основная часть

Поведение температурного поля потока с переменной скоростью описывается одномерным гиперболическим уравнением первого порядка:

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} + v(t)\cdot\frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = \beta\cdot\left(T_{cp}(t) - Q(x,t)\right), \quad (1)$$
$$0 \le x \le L, \quad t > 0;$$

с граничными и начальными условиями (2):

$$Q(x,0) = Q_0(x), \quad Q(0,t) = g(t), \quad (2)$$

где $v(t)$ – скорость потока; β – коэффициент теплообмена; $T_{cp}(t)$ – температура внешней среды, принята одинаковой по всей длине нагревателя; L – длина нагревателя; $Q_0(x)$ – начальное распределение температуры; $g(t)$ – функция изменения температуры потока на входе нагревателя.

В случае постоянной скорости потока, $v(t) = v_0 = \text{const}$, при нулевых начальных условиях, $Q_0(x) = 0$, уравнение (1) имеет аналитическое решение [1]:

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №18-08-00048, №18-08-00565

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

$$Q(x,p) = g(p)\cdot exp\left(-(p+\beta)x/v_0\right) + \\ +T_{cp}(p)\cdot\frac{\beta}{p+\beta}\cdot\left[1-exp\left(-(p+\beta)x/v_0\right)\right], \quad (3)$$

где p – оператор преобразования Лапласа по временной координате. Задавшись фиксированным значением x, можно получить решение для температуры в конкретной точке нагревателя, которое может быть представлено в виде структуры из типовых блоков в современных средах компьютерного моделирования динамических систем. При $x=L$ выражение (3) определяет поведение температуры потока на выходе нагревателя.

Решение (3) несёт следующий смысл: первое слагаемое определяет насколько остынет элементарный объём потока с температурой $g(t)$ на входе, к моменту, когда окажется в точке x нагревателя, при нулевой температуре среды. Второе слагаемое определяет насколько нагреется элементарный объём потока при прохождении от начала нагревателя к точке x, если на входе его температура была равна нулю. Длительность переходного процесса определяется отношением x/v_0. Во время переходного процесса, в точку x поступает объём, который находился внутри нагревателя, в момент начала переходного процесса. По истечении этого времени каждый элементарный объём потока проводит одно и то же время в нагревателе и достигает одного и того же значения температуры.

В ситуации, когда при установившемся режиме скорость потока мгновенно изменяется на некоторую величину, происходит следующее: текущее температурное распределение по длине нагревателя становится начальным распределением для потока, который движется с новой скоростью. Влияние начального распределения на температуру на выходе будет продолжаться в течение времени прохождения нагревателя при новой скорости потока v_1 [9].

Вклад первого слагаемого (3) в температуру на выходе нагревателя, при мгновенном изменении скорости потока и постоянном значении температуры на входе $g(t) = g_c = const$ определяется следующим образом. При скорости v_0 его значение равно $g_c\,exp(-\beta\tau_0)$, где $\tau_0 = L/v_0$. После завершения переходного процесса, вклад первого слагаемого будет определяться значением $g_c\,exp(-\beta\tau_1)$, где $\tau_1 = L/v_1$. Температурное распределение потока по длине нагревателя в момент изменения скорости потока будет определяться следующим выражением [9]:

$$Q_g(x) = g_c\,exp\left(-\beta x/v_0\right). \quad (4)$$

Во время переходного процесса объём потока, находящийся в нагревателе будет последовательно поступать на выход. Момент времени, в котором на выходе окажется элементарный объём с координатой x, определяется расстоянием от точки x до выхода, отнесённым к новой скорости потока:

$$t = (L-x)/v_1. \quad (5)$$

Во время движения в нагревателе, элементарный объём с температурой $Q_g(x)$ остынет в $exp(-\beta t)$ раз и его температура будет равна

$$Q_1(t) = Q_g(x)\cdot exp(-\beta t). \quad (6)$$

Выразив из (5) x, можно получить для $Q_g(x)$ зависимость от t. Тогда подстановка (4) в (6) даёт, в конечном итоге, выражение для влияния температуры потока на входе нагревателя на температуру на выходе во время переходного процесса:

$$Q_1(t) = g_c\,exp(-\beta\tau_0)\cdot exp\left(-\beta t(1-\tau_0/\tau_1)\right), \quad (7)$$

в котором время t изменяется от момента начала переходного процесса, до его окончания: $t \in [0, \tau_1]$.

Аналогичные рассуждения можно провести для второго слагаемого выражения (3), которое определяет влияние температуры среды, $T_{cp}(t) = T_c = const$, на температуру потока при смене скорости. Температурное распределение потока по длине нагревателя в момент изменения скорости потока будет определяться выражением [9]

$$Q_T(x) = T_c\left(1-exp\left(-\beta x/v_0\right)\right). \quad (8)$$

Насколько нагреется элементарный объём за время движения в нагревателе, определяется его температурой, температурой среды и длительностью нахождения в нагревателе (5). С учётом (8) получено выражение для влияния температуры среды на температуру на выходе нагревателя во время переходного процесса:

$$Q_2(t) = T_c\left(1-exp\left(-\beta t(1-\tau_0/\tau_1)\right)\right) + \\ +T_c\,exp\left(-\beta t(1-\tau_0/\tau_1)\right)\cdot\left(1-exp(-\beta t)\right). \quad (9)$$

Структурное представление модели для постоянной скорости потока представлено на рис. 1.

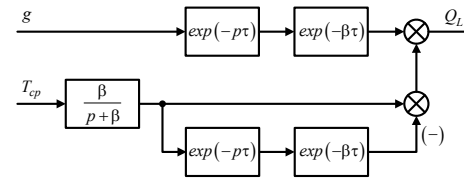


Рис. 1. Структурная схема модели с постоянной скоростью потока

Если взять эту структуру за основу для реализации модели с переменной скоростью потока, то при изменении скорости потока должно измениться значение времени задержки. При этом необходимо обеспечить «последействие» – переходный процесс в течение нового времени запаздывания. Таким образом, модель нагрева

потока с переменной скоростью должна решать две задачи:

1) переключение времени звена запаздывания;

2) обеспечение изменения температуры по каждому каналу согласно зависимостям (7), (9).

На рис. 2, 3 представлены графики изменения температуры во время переходных процессов для первого (7) и второго (9) слагаемого выражения (3) в зависимости от соотношения времён запаздывания. Значение β везде принято неизменным, $\beta/\tau_0 = 0.02$, что соответствует типовым характеристикам проточных нагревателей. Графики наглядно иллюстрируют, что при $\tau_0/\tau_1 > 0.33$, изменение температуры по обоим каналам можно принять линейно зависящим от времени. В таком случае при изменении скорости потока модель должна обеспечивать равномерное изменение температур по каждому каналу в течение времени переходного процесса.

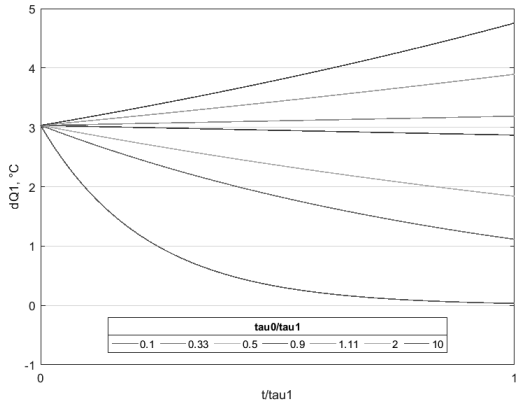


Рис. 2. Переходный процесс по каналу «Температура на входе» – «Температура на выходе» при разных отношениях времён запаздывания до и после изменения скорости потока

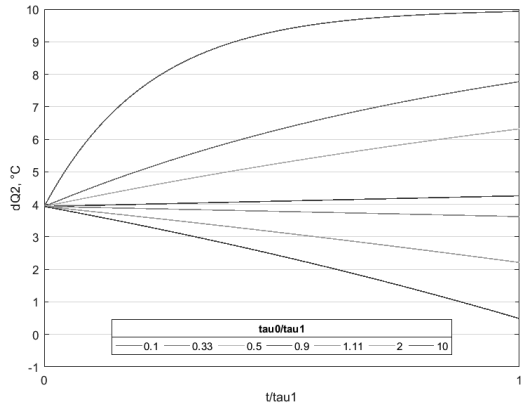


Рис. 3. Переходный процесс по каналу «Температура внешней среды» – «Температура на выходе» при разных отношениях времён запаздывания до и после изменения скорости потока

Структурная схема модели, обеспечивающая желаемое изменение температур, представлена на рис. 4. Звено переменного запаздывания имеет два входа: первый – сигнальный, второй – параметрический. Звенья с постоянным коэффициентом усиления $exp(-\beta\tau)$, (рис. 1), заменены подсистемой, реализующих алгоритм расчёта коэффициентов. Текущее значение коэффициента усиления формируется на выходе интегрирующего звена подсистемы. В момент изменения запаздывания τ, вычисляется новое значение коэффициента усиления, которое поступает на входы звена дифференцирования и подсистемы с отрицательной обратной связью. По фронту сигнала с выхода звена дифференцирования запоминается значение разности между новым и текущим значениями коэффициента усиления. Далее это значение используется для формирования сигнала на входе интегрирующего звена. Сигнал на входе интегрирующего звена должен быть постоянным, чтобы обеспечить равномерное изменение сигнала на выходе и удерживаться в течение времени переходного процесса – времени нового значения запаздывания. Для этого запомненное значение рассогласования делится на новое время запаздывания и сигнал поступает на вход интеграла. Трёхпозиционное реле используется для прекращения интегрирования, когда значение на выходе интегратора достигнет нового значения коэффициента.

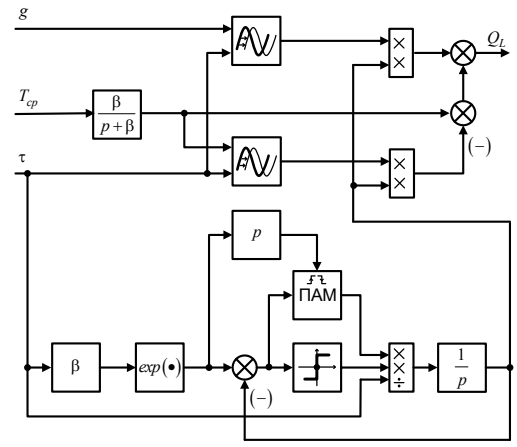


Рис. 4. Структурная схема модели с переменной скоростью потока

Предложенная структура может быть упрощена с некоторым уменьшением точности, если подсистему с обратной связью заменить апериодическим звеном (рис. 5). В этом случае переходный процесс моделируется с большей погрешностью, однако длится в течение времени τ. По окончании переходного процесса, значение коэффициента точно соответствует значению, рассчитанному аналитически.

На рис. 6, 7 представлены графики переходных процессов при снижении скорости потока в два раза и при увеличении скорости в два раза для трёх случаев:

1) точное решение задачи [9];

2) результат моделирования с помощью структуры, представленной на рис. 4;

3) результат моделирования с помощью структуры на рис. 5.

Параметры моделируемого нагревателя: $\beta = 0.1$ с$^{-1}$, $\tau_0 = 5$ с, g=5 °С, $T_{ср}$=20 °С. Переключение скорости потока на обоих рисунках происходит в момент времени t=5 с.

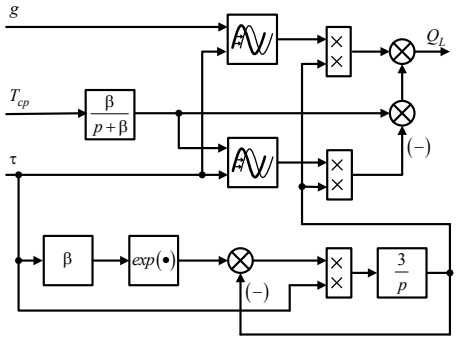


Рис. 5. Структурная схема модели с апериодическим звеном для расчёта коэффициента усиления во время переходного процесса

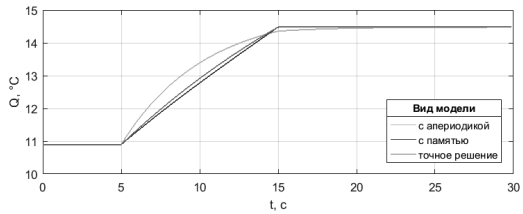


Рис. 6. Переходный процесс при уменьшении скорости потока

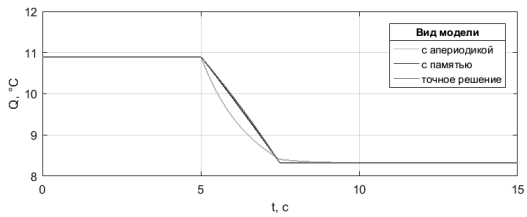


Рис. 7. Переходный процесс при увеличении скорости потока

На рис. 6 переходный процесс заканчивается за 10 с, что соответствует времени нахождения потока в нагревателе при снижении скорости потока в два раза. На рис. 7 переходный процесс заканчивается за 2.5 с, что также соответствует времени нахождения потока в нагревателе при увеличении скорости потока в два раза.

III. Заключение

Предложенная структура модели обладает следующими преимуществами:

1) используется точное решение гиперболического уравнения первого порядка, которое может быть реализовано в среде компьютерного моделирования динамических систем с сосредоточенными параметрами;

2) при постоянном значении времени запаздывания на входе, поведение температуры на выходе модели совпадает с точным решением.

К недостаткам предложенной структуры следует отнести погрешность, возникающую при моделировании переходных процессов по входу времени запаздывания, которая увеличивается тем сильнее, чем меньше становится скорость потока. При пусковых режимах, когда скорость потока настолько низкая, что он успевает прогреться практически до температуры внешней среды, предложенная структура обладает большой погрешностью. При значении расхода 30% от номинального и более, модель показывает достаточную точность для большинства задач синтеза и анализа систем автоматического управления.

Список литературы

[1] Данилушкин И.А., Россеев Н.Н. Синтез системы автоматического управления температурным полем трубчатого теплообменника// Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки». Выпуск 40: Самара: СамГТУ, 2006.– С. 5–11.

[2] Гусева М.А., Данилушкин И.А. Применение пространственной аппроксимации распределенных сигналов при моделировании теплообменных аппаратов// Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». Выпуск №7(28)–2010: Самара: СамГТУ, 2010. С. 151–157.

[3] Мандра А.Г. Математическое моделирование процесса диффузии как распределенного объекта управления с переменной структурой// Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки». Выпуск №4(32)–2011: Самара: СамГТУ, 2011. С. 229–232.

[4] Данилушкин А.И., Данилушкин И.А. Численно-аналитическая модель транспортировки газа по линейному участку газопровода// Известия Томского политехнического университета – 2015. – Т. 326. – № 12. – С. 96–103.

[5] Данилушкин А.И., Рапопорт Э.Я. Алгоритмы функционирования процесса непрерывно-последовательного индукционного нагрева// Алгоритмизация и автоматизация технологических процессов и промышленных установок. Межвузовский сборник научных трудов. Вып. VII. – Куйбышев: КПтИ, 1976. – С. 118–124.

[6] Дудников Е.Е. Универсальные программные пакеты для моделирования систем с распределенными параметрами// Автоматика и телемеханика, №1.– 2009.– С. 3–24

[7] Коваль В.А., Осенин В.Н., Суятинов С.И., Торгашова О.Ю. Синтез дискретного регулятора для построения распределенной системы управления температурным режимом проточного нагревателя нефтепродукта// Известия РАН. Теория и системы управления, № 4 – 2011, С. 132–147.

[8] Данилушкин И.А., Кавкаев К.В. Моделирование температурного поля потока с переменной скоростью в SIMULINK// Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». Выпуск №1(53)–2017: Самара: СамГТУ, 2017. С. 174–178.

[9] Данилушкин И.А. Моделирование температурного поля потока жидкости при параметрических возмущениях// Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королёва. Выпуск №2(22)–2010: Самара: СГАУ, 2010. С. 224–226.

Математическое моделирование деформирования нелинейных пластин и пологих оболочек

Дедов Н.И.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
nikolai_dedov@mail.ru

Исуткина В.Н..
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
vera_isutkina@mail.ru

***Abstract* — The article discusses the deformation of plates add shallow shells, taking into account the geometric nonlinearity and plastic deformations under variable loading. In the case of an elastoplastic material, unloading, secondary plastic deformations material compressibility are taken into account. Geometric and physical relations and solving nonlinear differential equations of the theory of flexible gentle shells of elastoplastic material are given for an arbitrary loading cycle. The relationship between the intensity of stresses and strains, using the generalized Mazing principle, allows us to investigate the deformation of flexible plates and shells of cyclically ideal, strengthened and softened materials. In the expressions for the internal forces and internal moments, additional forces and additional moments are taken into account,, taking into account the history of loading of plates and shells on the previous n-1-th loading.**

Ключевые слова — геометрическая нелинейность, упругопластическое деформирование, закритические деформации, разгрузка, вторичные пластические деформации, пластина, пологая оболочка, циклическое нагружение.

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие строительных, судостроительных, авиационных и других тонкостенных конструкций связано с широким применением пластин и оболочек, позволяющими проектировать надежные тонкостенные конструкции минимального веса. Реальные тонкостенные конструкции в процессе эксплуатации испытывают большие перемещения, пластические деформации при нагружении как в докритической, так и в закритической областях в случае потери устойчивости. Если при нагружении в конструкции возникают упругопластические деформации, то при разгрузке и нагружении силами обратного знака в материале возникают остаточные напряжения и возможно появление вторичных пластических деформаций. При пластическом деформировании материал приобретает наведенную деформационную анизотропию вследствие изменений при необратимых пластических деформациях. При циклическом нагружении после каждого цикла происходит перераспределение напряжений, а также меняется предел текучести соответствующий переходу материала из упругого состояния в пластическое. Различают материалы циклически идеальные, циклически упрочняющиеся и циклически разупрочняющиеся В случае циклически идеального материала пластические свойства при переменном нагружении не изменяются и описываются в соответствии с принципом Мазинга. В.В. Москвитин обобщил принцип Мазинга для описания свойств циклически упрочняющихся материалов и циклически разупрочняющихся. Учет геометрической и физической нелинейностей, сжимаемости материала, разгрузки, вторичных пластических деформаций позволяет построить математическую модель исследования нелинейных задач теории гибких пластин и пологих оболочек в процессе деформирования при циклическом нагружении. Таким образом, анализ упругопластических процессов деформирования в гибких пластинах и пологих оболочках основывается на решении нелинейных двумерных краевых задач. Решение таких задач стало возможным благодаря применению численных методов и современных вычислительных средств.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В работе [1] предложен метод, который позволяет исследовать докритические и закритические деформации упругопластических оболочек вращения с использованием теории течения. При исследовании закритического состояния отсутствуют данные о нижних критических нагрузках.

Напряженно-деформирование состояние при упругопластических деформациях прямоугольных пластин, нагруженных давлением, исследовано для различных материалов [2].

В работе [3] в геометрически нелинейной постановке, для нелинейно упругого материала, исследуются докритические и закритические деформации для пластин и пологих прямоугольных панелей. При численной реализации в процессе решения данной задачи ведущим параметром принималась нагрузка до верхнего критического значения, а после потери устойчивости за ведущий параметр принимался прогиб в характерной точке. С увеличением критерия нелинейности материала значения критической нагрузки уменьшается.

Численное решение большого числа геометрически нелинейных задач теории пластин и пологих оболочек приведено в [4,5]. Для решения нелинейных уравнений применен метод общей итерации, разработанный М.С. Корнишиным. Метод общей итерации имеет достаточно хорошую сходимость при исследовании докритических, закритических деформаций и при определении верхних и нижних критических нагрузок.

В работах [6–7] для решения нелинейных задач теории оболочек используется метод последовательных нагружений, разработанный В.В. Петровым. Было показано, что сходимость процесса решения нелинейных уравнений заметно ухудшается при подходе к значениям критической нагрузке.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

В данной работе рассматривается упругопластическое деформирование гибких пластин и пологих оболочек на прямоугольном плане, включая закритические деформации при циклическом нагружении наружным давлением. При исследовании упругопластического деформирования, в случае циклического нагружения, необходимо учитывать изменения упругопластических свойств материала для каждого цикла нагружения. Должны быть известны диаграммы циклического деформирования для всего процесса многократного нагружения. На рис.1 приведены диаграммы при первом нагружении *OAN*, при разгрузке, последующем сжатии и вторичных пластических деформациях *NPR* и повторном нагружении *RST* .

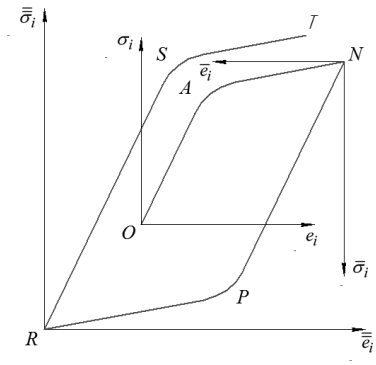


Рис. 1. Диаграммы при первом нагружении *OAN*, при разгрузке, последующем сжатии и вторичных пластических деформациях *NPR* и повторном нагружении *RST*.

В зависимости от законов изменения механических свойств, при циклических нагружениях, различают циклически идеальные материалы у которых упругопластические свойства не зависят от числа циклов нагружения. У циклически разупрочняемых материалов упругопластические свойства материалов уменьшаются, а у циклически упрочняющихся – увеличиваются.

Если при первом нагружении наступление предела текучести материала определяется величинами σ_T и ε_T, то в соответствии с принципом Мазинга при циклическом нагружении наступление текучести определяется величиами $\bar{\sigma}_T = 2\sigma_T$ и $\bar{\varepsilon}_T = 2e_T$. Принцип Мазинга удовлетворительно описывает свойства лишь циклически идеальных материалов. Введя экспериментальный параметр α_n , В.В. Москвитин обобщил принцип Мазинга [8]. В этом случае наступление предела текучести определяется значениями $\bar{\sigma}_{iT}^{(n)} = \alpha_n \sigma_T$ по напряжениям и $\bar{e}_{iT}^{(n)} = \alpha_n e_T$ по деформациям. Зависимость параметра α_n от количества циклов нагружения принимаем в виде $\alpha_n = \alpha_2 (n-1)^{\gamma}$, $\gamma < 1$. Постоянные α_n и γ определяются экспериментально. В случае циклически идеального материала $\alpha_2 = 2$, $\gamma = 0$. В случае циклически разупрочняемого материала $\alpha_2 = 2$, $\gamma < 0$, а в случае упрочняемого – $\alpha_2 = 2$, $\gamma > 0$.

При упругопластическом деформировании пластин и пологих оболочек на участке активного нагружения *OAN* компоненты девиатора напряжений связаны с компонентами девиатора деформаций соотношениями, которые по теории малых упругопластических деформаций имеют вид

$$\sigma_{ij} - \sigma_0 \delta_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{e_i} \left(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_0 \delta_{ij} \right),$$

где $K = \dfrac{E}{3(1-2\nu)}$ — модуль объемного сжатия, $\varepsilon_0 = \dfrac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}}{3}$ — средняя деформация, $\sigma_0 = \dfrac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3}$ — среднее напряжение, $\sigma_0 = 3K\varepsilon_0$ — зависимость среднего напряжения от — средней деформаций.

Зависимость между интенсивностями напряжений и деформаций принимается в виде, предложенном А.А. Ильюшиным [9]

$$\sigma_i = 3G(1-\omega_i) e_i ,$$

где $\omega_i = f(e_i)$ – функция А.А. Ильюшина.

Переход из упругого состояния в пластическое принимается в соответствии критерием Губера – Мизеса по интенсивности напряжений или деформаций

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 2 + \\ + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)} = \sigma_T$$

по интенсивности напряжений,

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + \\ + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + 6(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2)} = \varepsilon_T$$

по интенсивности деформаций.

При разгрузке на участке диаграммы *NPR,* включающем область вторичных пластических деформаций, связь между напряжениями и деформациями на плоскости $\bar{\sigma}_i - \bar{\varepsilon}_i$ имеет вид

$$\bar{\sigma}_{ij} - \bar{\sigma}_0 \delta_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}_i}{\bar{e}_i} \left(\bar{\varepsilon}_{ij} - \bar{\varepsilon}_0 \delta_{ij} \right), ..., i, j = 1,2,3 .$$

Здесь введены разности напряжений

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \varepsilon'_{ij} - \varepsilon_{ij} , \ \bar{\sigma}_{ij} = \sigma' - \sigma_{ij} , \qquad i, j = 1,2,3$$

где $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ – величины компонентов тензора напряжений и деформаций при разгрузке, $\sigma'_{ij}, \varepsilon'_{ij}$ – величины компонентов тензора напряжений и деформаций в конце первого нагружения. Остальные выражения для напряжений

и деформаций при разгрузке те же самые , что и при первом нагружении, отмечаются чертой сверху.

Используя общую теорему об упругопластической разгрузке, сформулированную В.В. Москвитиным, запишем связь между компонентами девиатора напряжений и компонентами девиатора деформаций при циклическом нагружении в виде [10]

$$\bar{\sigma}_{ij}^{(n)} = 3K\bar{\varepsilon}_o^n\delta_{ij} + \frac{2}{3}\frac{\bar{\sigma}_i^n}{\bar{e}_i^n}\left(\bar{\varepsilon}_{ij}^n - \bar{\varepsilon}_o^n\delta_{ij}\right),\ i,j = 1,2,3.$$

Здесь введены разности

$$\bar{\sigma}_{ij}^{(n)} = \sigma_{ij}^{(n-1)} - \sigma_{ij}^{(n)},\quad \bar{\varepsilon}_{ij}^{(n)} = \varepsilon_{ij}^{(n-1)} - \varepsilon_{ij}^{(n)},$$

$$i,j = 1,2,3$$

где $\sigma_{ij}^{(n)}, \varepsilon_{ij}^{(n)}$ – величины компонентов тензора напряжений и деформаций при n - ом нагружении, $\sigma_{ij}^{(n-1)}, \varepsilon_{ij}^{(n-1)}$ – величины компонентов тензора напряжений и деформаций в конце предыдущего (n-1) - го нагружения.

Аналогично уравнениям теории малых упругопластических деформаций при циклическом нагружении имеют место следующие соотношения

$$\bar{\sigma}_i^{(n)} = \frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{\left(\bar{\sigma}_{11}^{(n)} - \bar{\sigma}_{22}^{(n)}\right)^2 + \left(\bar{\sigma}_{22}^{(n)} - \bar{\sigma}_{33}^{(n)}\right)^2 + \left(\bar{\sigma}_{33}^{(n)} - \bar{\sigma}_{11}^{(n)}\right)^2 + 6\left(\bar{\sigma}_{12}^{(n)2} + \bar{\sigma}_{23}^{(n)2} + \bar{\sigma}_{31}^{(n)2}\right)}$$

интенсивность напряжений,

$$\bar{e}_i^{(n)} = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{\left(\bar{\varepsilon}_{11}^{(n)} - \bar{\varepsilon}_{22}^{(n)}\right)^2 + \left(\bar{\varepsilon}_{22}^{(n)} - \bar{\varepsilon}_{33}^{(n)}\right)^2 + \left(\bar{\varepsilon}_{33}^{(n)} - \bar{\varepsilon}_{11}^{(n)}\right)^2 + 6\left(\bar{\varepsilon}_{12}^{(n)2} + \bar{\varepsilon}_{23}^{(n)2} + \bar{\varepsilon}_{31}^{(n)2}\right)} = \varepsilon_T$$

интенсивность деформаций,

$\bar{\sigma}_o^{(n)} = \frac{\bar{\sigma}_{11}^{(n)} + \bar{\sigma}_{22}^{(n)} + \bar{\sigma}_{33}^{(n)}}{3}$ ––среднее напряжение,

$\bar{\varepsilon}_o^{(n)} = \frac{\bar{\varepsilon}_{11}^{(n)} + \bar{\varepsilon}_{22}^{(n)} + \bar{\varepsilon}_{33}^{(n)}}{3}$ – средняя деформация.

Связь между шаровыми составляющими тензора напряжений тензора деформаций имеет вид

$$\bar{\sigma}_o^{(n)} = 3K\bar{\varepsilon}_o^{(n)}.$$

Зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций при при n - ом нагружении принимает вид

$$\bar{\sigma}_i^{(n)} = 3G\left(1 - \bar{\omega}^{(n)}\right)\bar{e}_i^{(n)},$$

где $\bar{\omega}^{(n)} = f\left(\bar{e}_i^{(n)}\right)$ – функция А.А. Ильюшина при n - ом нагружении.

В течение полного цикла нагружения внешние силы могут принимать положительные и отрицательные значения. Выражения для компонент напряжений и деформаций при n - ом нагружении примут вид

$$\sigma_{ij}^{(n)} = \sigma_{ij}^{n-1} + (-1)^{n-1}\bar{\sigma}_{ij}^{(n)},\ \varepsilon_{ij}^{(n)} = \varepsilon_{ij}^{n-1} + (-1)^{n-1}\bar{\varepsilon}_{ij}^{(n)},$$
$$i,j = 1,2,3.$$

Преобразуем эти формулы составляя последовательно соотношения для определения напряжений и деформаций при произвольном n - ом нагружении через компоненты напряжений и деформаций при первом нагружении

$$\sigma_{ij}^{(n)} = \sigma' + \sum_{k=2}^{n}(-1)^{k-1}\bar{\sigma}_{ij}^{(k)},$$

$$\varepsilon_{ij}^{(n)} = \varepsilon_{ij}' + \sum_{k=2}^{n}(-1)^{k-1}\bar{\varepsilon}_{ij}^{(n)},\quad i,j = 1,2,3.$$

Как известно, при построении математической модели упругопластических сред недостаточно использовать только тензор полных деформаций. В большинстве современных работ, исследующих упругопластическое деформирование дважды нелинейных пластин и пологих оболочек, вводятся меры деформации, связанные отдельно с упругим и отдельно с пластическим деформированием.

При активном нагружении тонкостенных конструкций из упруго пластического материала напряжения представим в виде

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^y + \Delta\sigma_{ij},\quad i,j = 1,2,3.$$

где σ_{ij}^y – напряжения, возникающие в оболочке, если бы материал оболочки подчинялся закону Гука при истинных деформациях, $\Delta\sigma_{ij}$ – величина, учитывающая отклонение диаграммы материала оболочки от закона Гука.

При разгрузке упругопластического материала пологой оболочки, а также в области вторичных пластических деформаций запишем выражения для напряжений, используя теорему В.В. Москвитина об упругопластической разгрузке, в виде

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}' - \bar{\sigma}_{ij},\quad i,j = 1,2,3.$$

или, выделяя упругую часть напряжений, в виде

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^y + \Delta\sigma_{ij},\quad i,j = 1,2,3.$$

где $\Delta\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - \overline{\sigma}_{ij} - \sigma^{y}_{ij}$ дополнительные напряжения, учитывающие отклонение материала от закона Гука, наличие разгрузки и вторичных пластических деформаций.

На основании соотношений для напряжений можно представить выражения для внутренних усилий и моментов в сечениях пологой оболочки, показанных на рис.2, в виде

$$N_i = N_i^y + \Delta N_i \qquad T_{ij} = \int_{-0.5h}^{0.5h} \sigma_{ij} dz = T_{ij}^y + \Delta T_{ij},$$

$$M_{ij} = \int_{-0.5h}^{0.5h} \sigma_{ij} z dz = M_{ij}^y + \Delta M_{ij}, \quad i, j = 1,2$$

где N_i – поперечные силы, T_{ij} – усилия, действующие в срединной поверхности оболочки, M_{ij} – изгибающие и крутящие моменты.

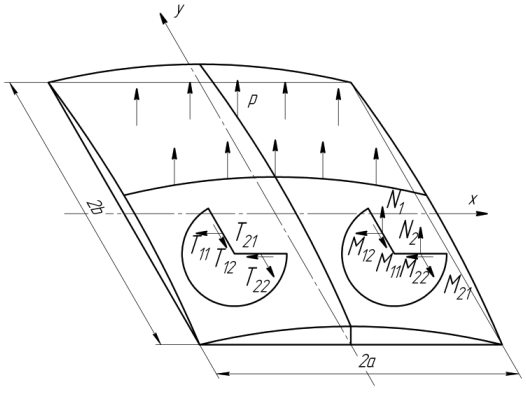


Рис. 2. Пологая оболочка на прямоугольном плане

При отсутствии внешних нагрузок, приложенных в плоскости оболочки (вдоль осей *x,y,* совпадающих с главными линиями кривизны), основная система дифференциальных уравнений теории тонких упругопластических оболочек с учетом разгрузки, вторичных пластических деформаций сжимаемости материала примет вид

$$D\nabla^2\nabla^2 w + \overline{F}(\phi) = L(w,\phi) + G(\Delta M_{ij}) + p,$$

$$\frac{1}{Eh}\nabla^2\nabla^2\phi + \overline{N}(w) = K(w) + H(\Delta T_{ij}).$$

Система дифференциальных уравнений построена в форме, удобной для решения геометрически и физически нелинейных задач в упругой, нелинейно упругой или упругопластической области.

Решение нелинейных уравнений проводится методом общей итерации. Значение корней системы алгебраических уравнений образуем по формуле

$$\overline{x_i^n} = x_i^{n-1} + \alpha_{cx}\left(x_i^n - x_i^{n-1}\right),$$

где α_{cx} – численные коэффициенты, которые должны быть определены так, чтобы процесс итераций сходился как можно быстрее. В процессе счета корректирующий коэффициент α_{cx} определяется автоматически по заранее заданной процедуре.

Для решения конкретной задачи система нелинейных уравнений должна быть проинтегрирована с учетом соответствующих граничных условий на контуре пластины или оболочки.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Предложенная математическая модель позволяет исследовать в уточненной постановке класс важных в теоретическом и практическом отношениях упругопластических пологих оболочек на прямоугольном плане при однократном и многократном циклическом нагружении.

2) Разработан алгоритм численной реализации расчета напряженно- деформированного состояния при исследовании докритического и закритического деформирования, определения верхней и нижней критических нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Бураго Н.Г.,Кукуджанов В.Н. Численный метод решения геометрически нелинейных задач для упругопластических оболочек вращения. - Строительная механика и расчет сооружений, 1976. №5, с.44-49.

[2] Zin T.H., Ho E. Elasto-plastic bending of rectangular plate- Journal of Engineering Mechanics Division. Proceedings of the ASCE, vol. 94, EM 1, 1968, pp. 199-210.

[3] Дедов Н.И., Корнишин М.С., Столяров Н.Н. Изгиб прямоугольных в плане гибких пластин и пологих оболочек из нелинейно упругого сжимаемого материала. - Труды VIII Всесоюзн. конф. по теории пластин и оболочек. Ростов на Дону, 1972, АН СССР.

[4] Корнишин М.С. Нелинейные задачи теории пластин и пологих оболочек и методы их решения.-М.: Наука, 1964. 192 с.

[5] Корнишин М.С., Столяров Н.Н., Дедов Н.И. Упругопластический изгиб гибких пологих оболочек под действием поперечной нагрузки распределенной по малой центральной площадке.- В кн.: Исследование по нелинейным задачам теории пластин и оболочек. Саратов, Саратовский ун-т, 1974, с.171-178.

[6] Петров В.В. Нелинейная инкрементальная строительная механика.- М.: Инфа-Инженерия, 2014.-480с.

[7] Петров В. В. Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластин и оболочек. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1975. 118 с.

[8] Москвитин В.В. Пластичность при переменных нагружениях. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1965. 263 с.

[9] Ильюшин А.А. Пластичность. М.: Гостехиздат,1948. 376 с.

[10] Москвитин В.В. Циклическое нагружение элементов конструкции. М.: Наука, 1981г. 344 .

Цифровые системы управления температурой в непрерывных линиях термообработки

Демидович В.Б.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
vbdemidovich@mail.ru

Перевалов Ю.Ю.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
yyperevalov@yandex.ru

Прокофьев Г.И.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
giprokofiev@yandex.ru

***Abstract* — Temperature control systems in continuous heat treatment lines are considered. A single-point temperature control system in a multi-section induction furnace for controlling the temperature of a metal billet exiting the furnace has been proposed and is being investigated. The furnace consists of at least three sections. The temperature is measured at a fixed point along the length of the second section on the surface of the workpiece and is compared with the set temperature. The power of the second section is regulated to maintain the required temperature at a fixed point, which ensures the required temperature of the metal part at the exit of the furnace. For linear heat engineering thin bodies, the position of a point and the temperature in it can be determined analytically. Such a control system can be used when heating steel bars in a modular induction heater.**

Ключевые слова - линия непрерывной термообработки, система управления температурой, индукционный нагрев, многозонный нагрев

I. Введение

Непрерывные линии термообработки металлических изделий могут состоять из нескольких газовых, радиационных и индукционных печей. Такие линии обладают высокой производительностью, а качество термообработки определяется точностью поддержания температуры изделий на выходе линии, требуемой технологическим процессом. В силу практической безинерционности передачи мощности в нагреваемый объект в индукционных печах по сравнению с газовыми и радиационными, они являются идеальными с точки зрения управления процессом нагрева. При использовании индукторов в качестве основных нагревательных агрегатов в крупных линиях гальванизации ленты (при производительности до 500 тыс. тонн в год) потребуются многие десятки мегаватт мощности индукционного оборудования, что экономически нецелесообразно. Поэтому индукторы в таких линиях, мощность которых может достигать 2 Мвт, используются как безинерционные регуляторы температуры [1].

В то же время известно большое количество непрерывных линий термообработки труб, прутков, проволоки с использованием только индукционного оборудования. Прогресс в разработках источников питания внес серьезные изменения в архитектуре и построении непрерывных индукционных нагревателей. Это связано с возможностью значительно уменьшить габариты источников питания, с резко возросшей удельной емкостью электротермических конденсаторов, снижением габаритов и повышением эффективности теплообменников. Управление нагревателем стало цифровым с возможностью реализации управления по модели [2]. Все это привело в настоящее время к тому, что у ведущих компаний, производящих индукционное оборудование, индукционный нагреватель состоит из набора модулей, каждый из которых включает в себя преобразователь частоты, индуктор, конденсаторную батарею, систему охлаждения [3,4,5].

Модульное построение индукционных установок имеет важное преимущество, заключающееся в гибком регулировании мощности и частоты тока каждого нагревательного модуля, что существенно повышает управляемость процесса нагрева в целом, и, следовательно, гибкость и надежность установки, приводит к повышению качества выпускаемой продукции. Однако все перечисленные преимущества возможны лишь в случае наличия развитой системы управления нагревателями.

Использование модульной многосекционной структуры нагревателей дает значительные преимущества в технологии нагрева, поскольку позволяет оптимизировать режимы работы оборудования по: потреблению энергии; формированию необходимого температурного профиля; образованию окалины; способности поддерживать требуемую температуру на выходе [6, 7, 8]. Безинерционное управление индукционными блоками делает их незаменимыми в непрерывных линиях нагрева. Чтобы полностью реализовать преимущества модульных индукционных блоков, система управления должна включать в себя алгоритмы управления для стационарных и нестационарных режимов работы нагревателя, которые возникают при первом запуске линии, остановке и перезапуске технологической линии, изменении ее производительности. Нестационарные режимы характеризуются большим изменением температурного поля нагрузки и электрических параметров нагревателя и потенциально могут привести к большому проценту брака изделий [4,5].

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

Можно выделить два наиболее характерных типа систем автоматического управления (САУ) нагревом в непрерывных индукционных нагревателях:

1. Разомкнутые САУ по температуре (с программным управлением).
2. Замкнутые САУ по температуре, измеряемой в одной или нескольких точек нагреваемого изделия.

Первый тип систем применяется при несущественных или предсказуемых возмущениях, воздействующих на систему. Получить программу управления можно основываясь на результатах моделирования, которые обладает достаточной адекватностью и точностью, или экспериментально во время пуско-наладочных работ. В стационарном режиме такая система обеспечивает качественный нагрев. В нестационарном режиме неучтенные возмущения приводят к нарушению требуемого теплового режима и большому количеству брака [5].

Второй тип систем управления с обратной связью по температуре контрольных точек нагреваемого изделия может обеспечить его качественный нагрев при достаточной точности измерения температуры в них и соответствующих требуемому качеству алгоритмах управления. Требуемые значения параметров нагрева могут быть получены в результате их вычисления с использованием модели физических процессов или экспериментальным путем.

Системы управления второго типа с несколькими точками контроля температуры, как правило, подразумевает наличие пирометрического контроля температуры после каждого модуля индукционного нагревателя. Такой подход позволяет контролировать процесс нагрева изделия вдоль его длины. Однако взаимное влияние соседних индукторов (посредством обратных связей и изменения температуры на входе последующего индуктора) негативно влияет на качество процесса регулирования и может приводить к его существенному замедлению. Высокопроизводительные нагревательные линии могут содержать десятки индукционных модулей, из-за чего система управления становится взаимосвязанной и сложной. В связи с этим в настоящей статье проводятся исследования с целью определения возможности снижения изменений температурного поля загрузки индукционного нагревателя на его выходе (снижения брака) с использованием САУ второго типа с одной точкой контроля температуры внутри многосекционного нагревателя.

II. Алгоритм управления нагревателем по одной точке

Для непрерывного нагрева теплотехнических тонких тел при их движении через тепловые модульные агрегаты с удельной мощностью p в линейной постановке легко получить температурные профили нагрева от начальной температуры T_0 до конечной температуры T_f. Типичные возмущения в системе связаны с изменением скорости перемещения тел и изменением теплотехнического размера тела (например, толщины ленты или толщины стенки трубы). При увеличении скорости или толщины (при постоянной удельной мощности агрегатов p_a и p_c , их длинах a и c) для того, чтобы на выходе получить конечную температуру T_f. необходимо увеличить удельную мощность среднего агрегата.

При всем допустимом диапазоне изменения скоростей или толщин они пересекаются в одной точке с координатами

$$x = \frac{b}{\left[1 + \left(c/a\right) \times \left(p_a/p_c\right)\right]} \qquad (1)$$

Температура в точке пересечения определяется по формуле:

$$T_s = T_0 + \frac{T_f - T_0}{\left[1 + \left(c/a\right) \times \left(p_a/p_c\right)\right]} \qquad (2)$$

В этих формулах отсутствует скорость и толщина. Это позволяет утверждать, что при практической безинерционности второго агрегата (индукционного нагревателя) можно обеспечить минимальное отклонение температуры на выходе из печи при смене толщины или режима нагрева (скорости). Чем больше установленная мощность индукционных нагревателей, тем для большей разницы толщин реализуются переходные процессы требуемого качества (только за счет изменения мощности индукторов).

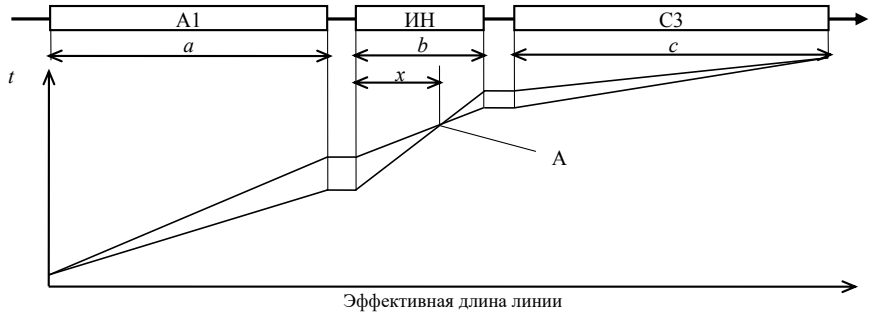


Рис. 1. Особая точка А в линии с индукторами (А1 – первый агрегат; ИН – индукционный нагреватель, второй агрегат ; С3 – третий агрегат)

Система управления по контролю температуры в одной точке может применяться как при переходных процессах с изменением только мощности индуктора, так и для «глубоких» переходных процессов (большого диапазона изменения скорости движения ленты и мощности индукторов). Для получения необходимой температуры в точке А (рис. 1) управляющие контуры должны изменять скорость движения изделия и мощности индукционных нагревателей технологической линии.

III. Принципы построения системы управления температурой ленты в непрерывных линиях термообработки

Технология непрерывной термообработки ленты находит широкое применение в различных металлургических производствах, в том числе горячего цинкования стальной ленты. Горячее цинкование – процесс нанесения защитного покрытия из цинка или соединений цинка на поверхность железа или стали посредством погружения их в ванну с расплавленным цинком.

Сталь для производства оцинкованной ленты поступает в линию после холодной или горячей прокатки в напряженном состоянии. Необходимо снять механические напряжения для придания оцинкованной продукции требуемых механических свойств. В последнее время для отжига ленты все больше используются прогрессивные непрерывные технологии с размоткой рулонов перед отжигом.

Смена сортамента ленты при непрерывном производстве приводит к частому изменению режима работы линии. На всех современных линиях непрерывного цинкования это может приводить к потере качества до 10-15% ленты [9]. Применение индукционного нагрева в линиях непрерывного цинкования существенно снижает брак, увеличивает производительность и рентабельность линии [10].

Перед горячем цинкованием стальная лента должна быть очищена от масла, грязи, смазочных материалов и других загрязнений поверхности. При использовании высокоэффективных методов очистки и подготовки поверхности ленты можно использовать любой тип нагрева: прямой газовый нагрев (DFF), радиационный нагрев (RTF) с использованием газа или электричества и индукционный нагрев (IF). Пламенные печи с восстановительной атмосферой успешно применяются не только для нагрева, но и очистки и подготовки поверхности ленты к цинкованию [10]. Обычно после них устанавливаются дополнительно радиационные газовые печи для завершения подготовки и нагрева ленты.

Значительная часть потери производительности и снижение качества происходит при смене размеров ленты или смене температурного цикла.

При длине технологических линий, достигающей нескольких сотен метров, большой инерционности газовых печей и нежелательности изменения режима их работы, ленты разной толщины будут перегреваться или не достигать нужной температуры до тех пор, пока не изменятся скорости их движения и переходный тепловой режим не придет к стационарному. В переходном режиме температура на значительной длине ленты не удовлетворяет требуемой, что и является причиной брака на этой длине ленты.

Введение в линию управляемых индукционных нагревателей, создает, наряду с каналом изменения скорости, дополнительный канал управления. Практическая безинерционность индукционных нагревателей позволяет получать необходимую температуру на выходе из радиационной печи RTF (T4) при смене ленты или температурного цикла, а также работать с различными толщинами ленты на одной скорости без изменений в настройке воздушных ножей, обеспечивающих стабильную величину покрытия цинком. Все это ведет к повышению качества продукции. На рис. 2 показаны температурные профили лент с различной толщиной, которые двигаются в линии с одинаковой скоростью. Лента с большей толщиной после прохождения газовой печи прямого нагрева имеют меньшую температуру, чем ленты с меньшей толщиной.

Изменение мощности индукционных нагревателей позволяет получить такую температуру на выходе из индуктора для каждой толщины ленты, чтобы после дальнейшего прохождения через радиационную печь на выходе иметь требуемую технологией температуру.

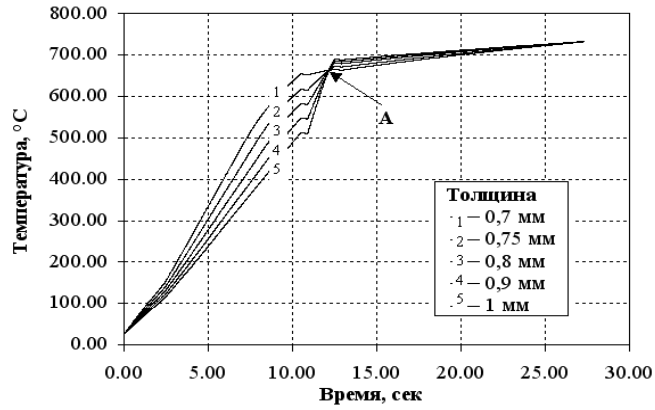


Рис. 2. Температурные режимы CQ цикла для лент с различной толщиной при скорости 91 м/мин

Естественно, чем больше установленная мощность индукционных нагревателей, тем для большего диапазона толщин ленты можно реализовывать переходные процессы без изменения скорости, только за счет изменения отдаваемой мощности индукторов. Зная ограничения на максимальную разницу в размерах ленты, которая допускается при сварке двух лент (обычно она составляет 20%), можно определить необходимую мощность индукторов для реализации переходных процессов. Система управления может использоваться для реализации переходных процессов не только за счет изменения мощности индукционных нагревателей, но и для “глубоких” переходных процессов (изменение мощности индукторов и скорости движения ленты или трубы) [11, 12]. Каскадный управляющий контур сначала изменяет мощность индукторов, затем – скорость движения ленты для получения необходимой температуры в точке А.

Другой особенностью этих переходных процессов является то, что температурные кривые пересекаются в одной особой точке – точке А (рис. 2). Расположение этой точки и уровень температуры в ней для каждого цикла не меняется при различных толщинах ленты и скорости линии. Эти данные получены с помощью нелинейной модели расчета температурных режимов нагрева ленты.

Предложенная система особенно эффективна при работе линии без изменения цикла обработки и при частой смене размеров ленты, когда газовые печи работают в одном режиме (при одной рабочей температуре, которая поддерживается локальной системой управления). При изменении цикла обработки необходимо перенастраивать печи, точка управления А изменится и будет утеряно основное преимущество этой системы управления – простота.

Преимущество применения индукционного нагрева при “глубоких” переходных процессах показано на рис. 3, где приводятся отклонения температуры ленты на выходе из RTF (T4) от температуры 735 °C (CQ цикл) при изменении толщины ленты с 0.9 мм до 1.5 мм. Без индукторов для ленты толщиной 0.9 мм необходима скорость 68.8 м/мин, а для ленты толщиной 1.5 мм – 41.3 м/мин. При использовании управляемых индукторов необходимая скорость ленты с толщиной 0.9 мм – 86.8 м/мин, для ленты с толщиной 1.5 мм – 54.8 м/мин.

Использование управляемых индукторов позволяет существенно снизить колебания температуры ленты в переходных процессах. Более глубокое изменение мощности индукторов улучшает тепловые переходные процессы.

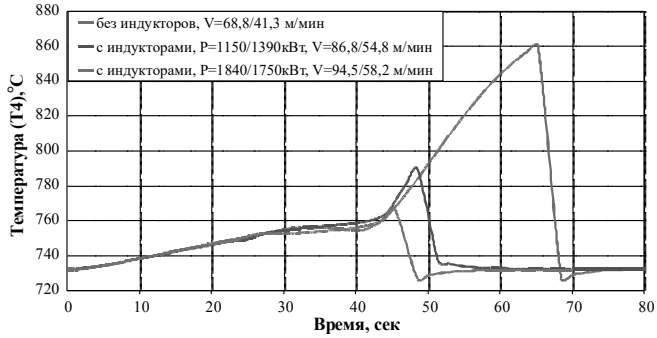


Рис. 3. Переходные процессы при смене ленты с толщиной 0,9 мм на ленту с толщиной 1,5мм

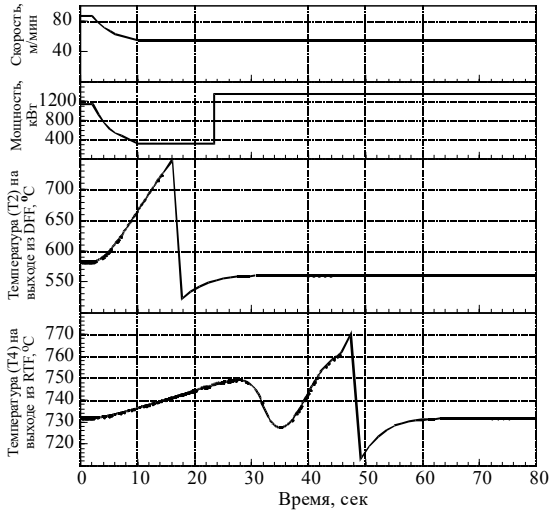


Рис. 4. Переходные процессы при смене ленты с толщиной 0,9 мм на ленту с толщиной 1,5мм с использованием индукторов

Допустимые результаты при “глубоких” переходных процессах могут быть получены с помощью простых алгоритмов. Например, изменение скорости входящей ленты происходит при входе сварного шва в предварительный нагреватель, а мощность индукторов изменяется при входе сварного шва в индукторы (рис. 4)

A. Управление температурой в непрерывном индукционном нагревателе

В программной среде Universal2D [6] проведено моделирование нагрева стального прутка в проходном модульном индукционном нагревателе.

Модульная структура позволяет применять различные алгоритмы задания мощности на каждом участке линии нагрева независимо друг от друга, что в сочетании с малой инерционностью индукционной системы позволяет эффективно отработать возникшие в процессе нагрева возмущения, тем самым минимизируя количество брака при нагреве.

Результаты численного моделирования процесса нагрева цилиндрических заготовок с использованием нескольких модулей с независимыми преобразователями частоты показали высокую эффективность такой конфигурации. Она дает возможность создания высокоэффективной и надежной системы управления кузнечным индукционным нагревателем на базе трех и более модулей.

В установке из трех модулей управление нагревом заготовки по пирометру происходит только на втором модуле («активная зона»). При этом точка измерения температуры располагается внутри второго индуктора. На первом и третьем индукторе поддерживается заданная мощность на постоянном уровне (рис. 5). При различной производительности и условии достижения одинаковой температуры на выходе из индукционного нагревателя, температурные кривые пересекаются в одной (особой) точке внутри второго индукционного модуля (рис. 6). Это позволяет за счет изменения мощности второго индуктора добиваться минимальных отклонений температуры заготовки на выходе в процессе перехода на новый режим при условии измерения и стабилизации температуры в особой точке.

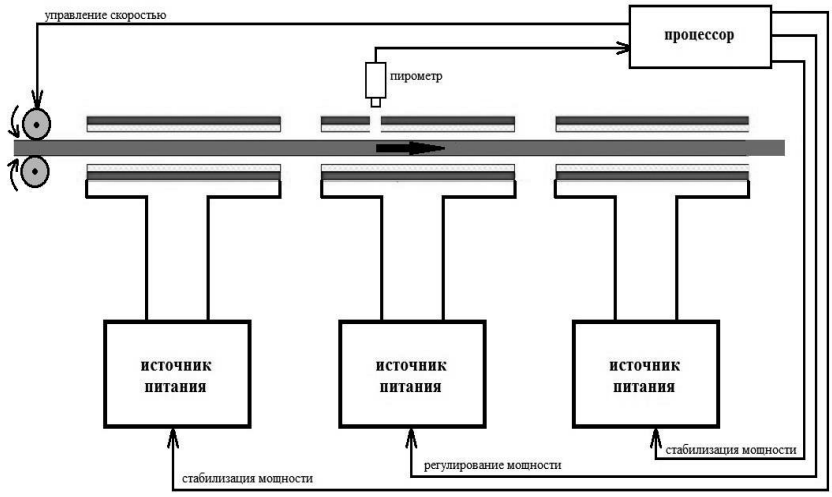


Рис. 5. Схема САУ 2-го типа модульным индукционным нагревателем с одной точкой контроля

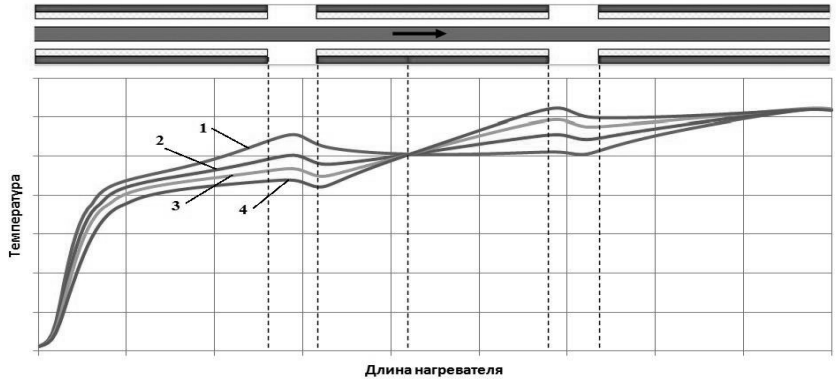


Рис. 6. Распределение температурного поля на поверхности заготовки по длине модульного индукционного нагревателя с использованием САУ с одной точкой контроля для различных производительностей: 1 –3.5 т/ч, 2 – 4.125 т/ч, 3 – 4.7 т/ч, 4 – 5.5 т/ч

Моделирование переходных процессов в индукционном нагревателе стальных заготовок диаметром 130 мм показало, что при поддержании определенной постоянной температуры в особой точке, фиксируемой оптическим пирометром, путем регулирования мощности генератора с обратной связью по температуре в ней, позволяет практически полностью убрать колебания температуры загрузки на выходе индукционной нагревательной установки (рис. 7).

Можно утверждать, что рассматриваемая САУ с зонным управлением позволяет адаптировать модульный индукционный нагреватель для работы с изменяющейся производительностью и сортаментом нагреваемых заготовок, сохраняя при этом высокую энергоэффективность системы, стабильность и качество технологического процесса.

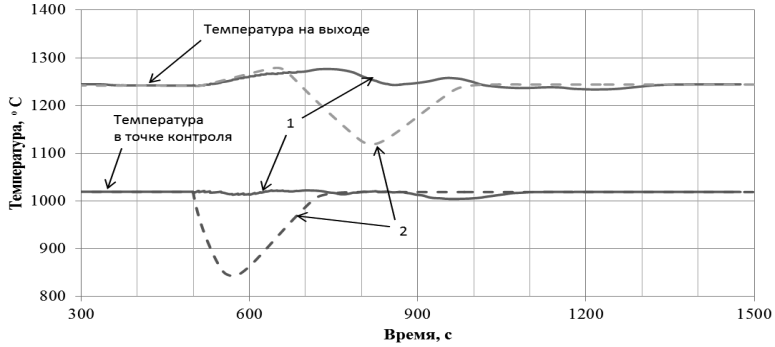


Рис. 7. График изменения температуры поверхности заготовки при изменении производительности с 4.7 т/ч до 3.5 т/ч и использовании: 1 - САУ 2-его типа с одной точкой контроля; 2 - САУ 1-ого типа

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Demidovitch V., Nelson J., Blake E. New Generation of Galvanizing Lines Utilizing Induction Heating Technology / 3rd International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, Nagoya (Japan),2000, pp. 224-229.

[2] Э.Я. Рапопорт Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. Москва : Высш. шк., 2009. – 676с.

[3] M.Rische, A.Walther, A.Thus Innovative heating concept using IGBT multi-converter technology. HEAT PROCESSING, (4) issue 1, 2006, pp. 43-45.

[4] D.Brown Modular induction system offers billet-heating advantages. Forge, January 2008, pp.13-16.

[5] В.Б.Демидович, Б.М.Никитин, А.В.Титов Модульные индукционные установки нагрева прутков повышенной надежности. Индустрия, 2007, №1, с.19.

[6] Demidovich V.B. Computer simulation and optimal designing of energy-saving technologies of the induction heating of metals //Thermal Engineering. 2012. Т. 59. № 14. С. 1023-1034.

[7] Jochen Gies, Dirk M. Schibisch Forge operators boost productivity and energy efficiency with new induction furnace technology // HEAT PROCESSING (9), 2011

[8] InductoForge® Modular Induction Billet Heaters , BULLETIN InductoForge Brochure. Rev. 5, 2011

[9] P. Dubois, M. Boyer (1995). Global approach to solve CGL process inertia troubles and application to mathematical models/ GALVATECH'95, Chicago, 45.

[10] D. Delaunay (1996). Towards intelligent use of induction heating in steel strip processing lines. UIE XIII Congress on Electricity Applications, MIII 9

[11] Demidovitch V., Blake E., Churchill R. Single-Point Temperature Control System for a Multi-Section Line Furnace - United States Patent 6,259,071 – 2001

[12] . M. Langejürgen, C. Vogt, S. Dappen, H. Krammer and R. Harjes "Optimization of temperature uniformity and process control for inductive Quench and Temper Lines by using booster coil systems" Proceeding of XVIII International UIE-Congress ELECTROTECHNOLOGIES FOR MATERIAL PROCESSING, Hannover, 2017, pp.73-78

Моделирование и многокритериальная оценка ресурсного потенциала системы переработки отходов нефтегазовой промышленности

Деревянов М.Ю.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
mder2007@mail.ru

Плешивцева Ю.Э.
Самарский государственный технический университет, Институт проблем управления сложными системами РАН
Самара, Россия
yulia_pl@mail.ru

Афиногентов А.А.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
pondex@yandex.ru

Мандра А.Г.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
amandra@mail.ru

Пименов А.А.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
andpimenov@yandex.com

***Abstract* — The paper presents the results of simulation and evaluation of the reuse potential of the system for the oil-contaminated wastes (OCW) recycling in Samara region. Reuse potential of OCW is considered as a comprehensive quantitative indicator of the possibility of effective recycling of waste that can be measured by a combination of heterogeneous criteria. The approach based on the basic CCR model and Super-efficiency model of the Data Envelopment Analysis (DEA) method is suggested to evaluate reuse potential. One of the particular quantitative indicators for estimating the waste reuse potential is the resource value of the OCW. The resource value of wastes is a quantitative assessment of their physicochemical composition and properties, which determines the degree of suitability of waste for use as material resources in recycling technologies associated with their recycling, recovery and regeneration. Obtained relative estimations allow one to select the best technologies and storage facilities for the OCW recycling with respect to resource value and reuse potential.**

Ключевые слова — ресурсный потенциал, вторичная переработка, нефтесодержащие отходы, ресурсная ценность, многокритериальная оценка, data envelopment analysis.

I. Введение

Нефтегазовый комплекс (НГК) является ключевым звеном в промышленном секторе экономики РФ . По уровню переработки нефтесодержащих отходов (НСО) и производству вторичных продуктов отечественный НГК существенно отстаёт от многих стран. В Российской Федерации ежегодно образуется от 4 до 7 млн. тонн нефтешламов, более 50% которых приходится на добывающий сектор, от 20% до 30% отходов составляют продукты нефтепереработки, остальные НСО образуются на нефтяных терминалах, в энергетическом и транспортном секторах. При этом доля вторичной переработки НСО не превышает 10%, что связано с низким качеством оборудования и отсутствием достоверных сведений о возможности использования отхода для вторичной переработки (о его ресурсном потенциале). Остальные 90% отходов помещают в специальные хранилища, что приводит к удвоению количества НСО каждые 5-7 лет, ухудшению экологической обстановки в стране и, как следствие, необходимости принятия срочных мер.

В настоящее время в отрасли обращения с отходами происходит переход от концепции управления отходами к концепции управления ресурсами в рамках «экономики замкнутого цикла» [1, 2], что обусловливает необходимость формирования новой системы оценки эффективности переработки НСО. Эффективность обращения с отходами, в том числе, с нефтесодержащими, в рамках такой концепции определяется их ресурсным потенциалом.

В работе предлагается рассмотреть ресурсный потенциал отходов как комплексный количественный показатель возможности эффективного вторичного использования отходов, оцениваемый по совокупности разнородных критериев (технологических, энергетических, экологических, технико-экономических, социальных и пр.), основные из которых представлены в [3].

Рассматриваемые в [3] экологические критерии основаны на оценке количества выбросов углерода [4] и выбросов загрязняющих веществ в воздух, воду и почву [5]. Использование энергетического потенциала отходов рассмотрено в [6,7]. Социальные, экономические и интегральные параметры, оказывающие влияние на эффективность использования отходов, анализируются в [8].

При оценке ресурсного потенциала системы переработки НСО необходимо учитывать ресурсную ценность отходов, под которой понимается количественная оценка их физико-химического состава и свойств. Ресурсная ценность определяет степень пригодности отходов для использования в качестве материальных ресурсов в технологиях переработки, связанных с их рециклингом, рекуперацией и регенерацией. Оригинальный подход к оценке ресурсной ценности НСО, предложенный в работе [9], основан на методе Data Envelopment Analysis (DEA) [10-11].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проектная часть государственного задания №10.3260.2017/4.6)

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

В статье предложен подход к разработке многокритериальной оценки ресурсного потенциала системы переработки НСО с учётом ресурсной ценности отходов на основе метода DEA.

II. Описание объектов исследования

В качестве объектов исследования рассмотрим N=9 объектов хранения НСО и M=7 технологий вторичной переработки НСО. Характеристики указанных объектов, представлены в Таблицах I-II, где приняты следующие обозначения: $\alpha = 1$ – асфальтены и смолы; $\alpha = 2$ - вода; $\alpha = 3$ - сера; $\alpha = 4$ - минеральная часть и механические примеси; $\alpha = 5$ - светлые нефтепродукты; $\beta = 1$ – разжижающий агент (дизельное топливо); $\beta = 2$ - цемент ПЦ-500 Д20; $\beta = 3$ - природный силикагель; $\beta = 4$ - 20% жидкое стекло; $\beta = 5$ - реагент RecOil; $\gamma = 1$ - дизельное топливо; $\gamma = 2$ - электрическая энергия; $n = \overline{1,N}$ - порядковый номер объекта хранения НСО в анализируемой группе; N – общее количество объектов хранения НСО; $m = \overline{1,M}$ - порядковый номер установки для переработки НСО в анализируемой группе; M – общее количество установок по переработке НСО.

III. Многокритериальная оценка ресурсной ценности объектов хранения НСО на основе метода DEA

Для многокритериальной оценки ресурсной ценности на основе предложенного в [9] подхода, объект хранения НСО, может быть представлен в виде блока (Рис. 1).

В качестве компонентов вектора входа $X_n = (x_{ni}) = (b_{n\alpha}), i = \overline{1,4}, \alpha = \overline{1,4},\ n = \overline{1,N}$ модели оценки ресурсной ценности объектов хранения НСО предлагается рассматривать массовое содержание асфальтенов и смол (b_{n1}), воды (b_{n2}), серы (b_{n3}) и минеральной части и механических примесей (b_{n4}), отрицательно влияющих на ресурсную ценность НСО (Таблица I).

В качестве компонентов вектора выходных параметров $Y_n = (y_{nj}), j = \overline{1,2},\ n = \overline{1,9}$, положительно влияющих на оценку ресурсной ценности объекта хранения НСО, предлагается рассматривать следующие параметры: y_{n1} - массовое содержание светлых нефтепродуктов (b_{n5}) в НСО, приведенное в таблице I; $y_{n2} = Q_n^P / Q_n^V$ - отношение массы светлых нефтепродуктов (Q_n^P) к массе вредных примесей (асфальтенов и смол, минеральной части и механических примесей, серы, воды) (Q_n^V) (Таблица I).

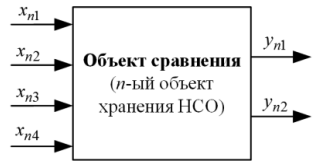


Рис. 1. Модель многокритериальной оценки ресурсной ценности объектов хранения НСО

Входные $x_{ni}, i = \overline{1,4}$ и выходные $y_{nj}, j = \overline{1,2}$, $n = \overline{1,9}$ параметры формируют исходные данные для получения относительных DEA-оценок ресурсной ценности объектов хранения НСО анализируемой группы.

Задача математического программирования (ЗМП), сформулированная на основе базовой CCR модели DEA метода [11], позволяющая получить оценки ресурсной ценности n-го объекта хранения, может быть представлена в следующем виде:

ТАБЛИЦА I. Характеристики объектов хранения НСО

n	Наименование объекта хранения НСО	Масса, [т]			Средневзвешенное содержание компонентов НСО $b_{n\alpha}$, $\alpha = \overline{1,5}$ [% масс.]				
		Светлые нефте-продукты, Q_n^P	*Вредные компоненты,* Q_n^V,	*НСО,* Q_n	b_{n1}	b_{n2}	b_{n3}	b_{n4}	b_{n5}
1	1 амбар за Луганским товарным парком	974	6796	7770	12.54	72.88	5.33	5.95	0.93
2	2 амбар за Луганским товарным парком	219	1521	1740	12.59	67.89	4.78	10.72	0.93
3	Илонакопитель УКПН-1 №1	4183	3592	7775	53.81	30.77	9.78	0.14	1.16
4	Нефтеловушка №1	179	124	303	58.96	8.27	19.68	2.71	1.36
5	Обвалование свечи аварийного сброса №2	851	351	1202	70.83	5.22	14.90	0.67	1.52
6	Обвалования свечи СУ-2	37	117	154	23.81	49.59	12.47	7.19	1.32
7	Илонакопитель УКПН-2 №1	6409	18042	24452	26.21	53.06	9.31	4.62	1.32
8	Шламонакопитель УКПН-2 №10	750	6835	7584	9.88	72.67	5.74	8.22	0.62
9	Шламонакопитель УКПН-2 №8	813	4357	5170	15.73	62.06	4.71	13.58	1.14

ТАБЛИЦА II. ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАНОВОК ВТОРИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НСО

m	Наименование установки по переработке НСО	q_m, [т/час]	T_m, [час]	Коэффициенты нормирования реагентов, $R2_{m\beta}$, $\beta=\overline{1,5}$					Удельный расход реагентов, $GR_{m\beta}$, $\beta=\overline{1,5}$ [т/т НСО]				
				$R2_{m1}$	$R2_{m2}$	$R2_{m3}$	$R2_{m4}$	$R2_{m5}$	GR_{m1}	GR_{m2}	GR_{m3}	GR_{m4}	GR_{m5}
1	Комплекс МегаМакс	15	1	1	-	-	-	-	0.02	-	-	-	-
2	Holo-Scru 10	10	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Electric-Scru 10	10	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Установка пиролиза Фортан - 200	12.5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	УПБШ-10С/УПБШ-10СД	10	0.4	-	0.1	5	0.325	-	-	0.6	0.4	0.15	-
6	УОГ-15-В2ГЦ2-10	20	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	Eco-TechRecOil Oy	50	0.4	-	-	-	-	1.313	-	-	-	-	0.0001

ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛИЦЫ II

m	Коэффициенты нормирования энергии (топлива), $C2_{m\gamma}$, $\gamma=\overline{1,2}$		Удельный расход энергии (топлива), $GC_{m\gamma}$, $\gamma=\overline{1,2}$ [ед./т НСО]		Коэффициенты, характеризующие вторичное использование компонентов переработки НСО $V_{m\alpha}$, $\alpha=\overline{1,5}$					Коэффициенты нормирования полезного продукта рециклинга, получаемого из компонентов переработки НСО $P_{m\alpha}$, $\alpha=\overline{1,5}$				
	Дизельное топливо $C2_{m1}$	*Электрическая энергия* $C2_{m2}$	*Дизельное топливо* GC_{m1}	*Электрическая энергия* GC_{m2}	V_{m1}	V_{m2}	V_{m3}	V_{m4}	V_{m5}	P_{m1}	P_{m2}	P_{m3}	P_{m4}	P_{m5}
1	1	-	0.006	-	-	-	-	-	0.9	-	-	-	-	0.45
2	1	-	0.065	-	-	-	-	-	0.95	-	-	-	-	0.45
3	-	$8.75\cdot10^{-5}$	-	75	-	-	-	-	0.95	-	-	-	-	0.45
4	-	$8.75\cdot10^{-5}$	-	10	-	-	-	-	0.65	-	-	-	-	0.4
5	-	$8.75\cdot10^{-5}$	-	0.9	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
6	-	$8.75\cdot10^{-5}$	-	6.85	-	-	-	-	0.7	-	-	-	-	0.45
7	-	$8.75\cdot10^{-5}$	-	6	-	-	-	-	0.95	-	-	-	-	0.45

$$R_n^1(X_n,Y_n)=\sum_{j=1}^{2}u_{nj}y_{nj}\Big/\sum_{i=1}^{4}v_{ni}x_{ni}\to\max_{(U,V)\in G};\quad(1)$$

$$\sum_{j=1}^{2}u_{nj}y_{nj}\Big/\sum_{i=1}^{4}v_{ni}x_{ni}\le 1,\forall\begin{pmatrix}n=\overline{1,9};u_{nj}\ge 0;\ j=\overline{1,2}\\ v_{ni}\ge 0,\ i=\overline{1,4}\end{pmatrix},\quad(2)$$

где $U=\left(u_{nj}\right), j=\overline{1,2};\ V=(v_{ni}), i=\overline{1,4}$ - векторы весовых коэффициентов для каждого объекта анализа из 9 хранилищ НСО анализируемой группы.

Решения ЗМП в форме (1)-(2) для $n=\overline{1,N}$ позволяют определить оценки R_n^1, $n=\overline{1,N}$, распределенные на единичном интервале [0,1]. В результате объекты сравнения, получившие оценки $R_n^1=1$, формируют границу эффективности, которая в рамках анализируемой группы из N=9 объектов хранения соответствует максимальной ресурсной ценности НСО. При этом разным объектам хранения с различными компонентными составами могут соответствовать максимальные, равные 1, сравнительные оценки ресурсной ценности. В этом случае для выбора наилучшего объекта целесообразно использовать модель Super-efficiency DEA-метода [10].

Задача математического программирования (ЗМП), сформулированная на основе модели Super-efficiency DEA метода, может быть представлена в виде:

$$RS_n^1(X_n,Y_n)=\sum_{j=1}^{2}\overline{u}_{nj}y_{nj}\Big/\sum_{i=1}^{4}\overline{v}_{ni}x_{ni}\to\max_{(\overline{U},\overline{V})\in\overline{G}};\quad(3)$$

$$\frac{\sum_{j=1}^{2}\overline{u}_{nj}y_{nj}}{\sum_{i=1}^{4}\overline{v}_{ni}x_{ni}}\le 1,\forall\begin{pmatrix}n=\overline{1,9};n\ne k;k=\overline{1,K};\ \overline{u}_{nj}\ge 0;\\ j=\overline{1,2};\ \overline{v}_{ni}\ge 0,\ i=\overline{1,4}\end{pmatrix},\quad(4)$$

где k – порядковый номер объекта хранения НСО; K – количество исключаемых из решения ЗМП в форме (3)-(4) k-ых объектов со значением оценки $R_k^1=1$ в анализируемой группе; неизвестные вектора весовых коэффициентов $\overline{U}=\left(\overline{u}_{nj}\right), j=\overline{1,2};\ \overline{V}=(\overline{v}_{ni}), i=\overline{1,4}$ определяются для каждого объекта из анализируемой

группы, за исключением весовых коэффициентов $\bar{u}_{kj}$ и $\bar{v}_{ki}$; $\bar{u}_{kj}, j=\overline{1,2}$ - весовые коэффициенты выходных параметров, полученные в результате решения задачи (1)-(2) для *k*-го объекта хранения; $\bar{v}_{ki}, i=\overline{1,4}$ - весовые коэффициенты входных параметров, полученные в результате решения задачи (1)-(2) для *k*-го объекта хранения.

Решения ЗМП в форме (3)-(4) для $n=\overline{1,N}$ позволяют определить оценки ресурсной ценности RS_n^1, $n=\overline{1,N}$ объектов хранения НСО, распределенные на интервале [0,∞). В результате объект хранения НСО, имеющий максимальную оценку RS_n^1, можно считать наилучшим в анализируемой группе (Таблица III).

ТАБЛИЦА III. ОЦЕНКИ РЕСУРСНОЙ ЦЕННОСТИ ОБЪЕКТОВ ХРАНЕНИЯ НСО НА ОСНОВЕ DEA МЕТОДА

Объект хранения НСО $n=\overline{1,9}$	**Оценка R_n^1 по CCR модели**	**Оценка RS_n^1 по модели Super-efficiency**
1	0.428	0.428
2	0.480	0.480
3	1	3.652
4	0.888	0.888
5	1	5.184
6	0.377	0.377
7	0.512	0.512
8	0.336	0.336
9	0.607	0.607

Анализ полученных в таблице III результатов показал, что самой высокой ресурсной ценностью обладает объект хранения НСО №5, имеющий оценку $RS_5^1=5.184$. Объект хранения НСО №8 с оценкой $RS_8^1=0.336$ имеет самую низкую ресурсную ценность в рассматриваемой группе объектов хранения.

IV. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ОСНОВЕ DEA МЕТОДА

Рассматривая ресурсный потенциал отходов как комплексный количественный показатель возможности эффективного вторичного использования отходов, оцениваемый по совокупности разнородных критериев, предлагается провести сравнительный анализ группы *N* хранилищ (Таблица I), с точки зрения возможности повторного использования хранящихся в них НСО. Таким образом, ресурсный потенциал *n*-го хранилища характеризует возможность эффективной переработки хранящихся в нем отходов с использованием *m*-ой установки переработки из анализируемой группы M установки. Для этого объект хранения НСО, может быть представлен в виде блока (Рис. 2, *a*).

Предлагаемый подход к оценке ресурсного потенциала позволяет провести сравнительный анализ группы *M* технологий переработки НСО (Таблица II) рассматриваемой системы. Сравнение может быть проведено в отношении оценки ресурсного потенциала *m*-ой технологии, рассматриваемого как количественный показатель эффективности извлечения полезных вторичных продуктов из НСО в *n*-ом хранилище в процессе переработки. Для этого используется установка переработки НСО, может быть представлена в виде блока (Рис. 2, *b*).

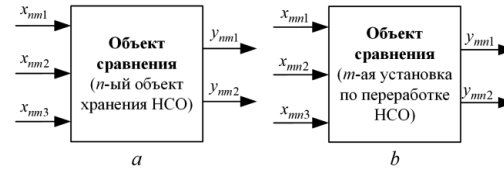


Рис. 2. Модели многокритериальной оценки ресурсного потенциала объектов исследования: *a* – для объектов хранения НСО; *b* – для установок по переработке НСО

В качестве компонентов вектора входа $X_{nm}=(x_{nmi}), i=\overline{1,3}$, $n=\overline{1,N}$, $m=\overline{1,M}$, отрицательно влияющих на оценку ресурсного потенциала объекта хранения НСО, предлагается использовать следующие:

x_{nm1} - время утилизации НСО:

$$x_{nm1}=Q_n/q_m+T_m\,, \tag{5}$$

где Q_n – масса перерабатываемых отходов в *n*-ом хранилище, $n=\overline{1,N}$ (см. Таблицу I); T_m – минимальное время подготовки к использованию *m*-ой установки по переработке НСО; q_m – производительность *m*-ой установки по переработке НСО, $m=\overline{1,M}$ (см. Таблицу II).

x_{nm2} – масса реагентов:

$$x_{nm2}=Q_n\sum_{\beta=1}^{F} R1_{m\beta}\cdot R2_{m\beta}\cdot GR_{m\beta}\,, \tag{6}$$

где F – количество используемых реагентов (для рассматриваемой группы из M установок переработки НСО F=5, см. Таблицу II); $R1_{m\beta}$ – коэффициент полноты использования β-го реагента *m*-ой установкой; $R2_{m\beta}$ – коэффициент нормирования стоимости β-го реагента *m*-ой установки, который определяется на основе стоимости одной тонны реагента, приведенной к стоимости одной тонны дизельного топлива; $GR_{m\beta}$ – удельный расход β-го реагента *m*-ой установкой (определяется по паспорту установки), $\beta=\overline{1,F}$, $m=\overline{1,M}$ (см. Таблицу II).

x_{nm3} – расход энергии (топлива):

$$x_{nm3}=Q_n\sum_{\gamma=1}^{H} C1_{m\gamma}\cdot C2_{m\gamma}\cdot GC_{m\gamma}\,, \tag{7}$$

где H – количество используемых видов энергии (топлива) (для рассматриваемой группы из M установок переработки НСО H=5, см. Таблицу II); $C1_{m\gamma}$ – коэффициент полноты использования γ-го вида энергии (топлива) m-ой установкой; $C2_{m\gamma}$ – коэффициент нормирования γ-го вида энергии (топлива) m-ой установкой, который определяется на основе стоимости единицы используемого вида энергии (топлива), приведенной к стоимости одной тонны дизельного топлива; $GC_{m\gamma}$ – удельный расход энергии (топлива) γ-го вида m-ой установкой (определяется по паспорту установки по переработке НСО), $\gamma = \overline{1,H}$, $m = \overline{1,M}$ (Таблица II).

В качестве компонентов вектора выходных параметров $Y_{nm} = \left(y_{nmj}\right), j = \overline{1,2}, \quad n = \overline{1,N}$, $m = \overline{1,M}$, положительно влияющих на оценку ресурсного потенциала установки переработки, предлагается рассматривать следующие параметры:

y_{nm1} – масса полезных продуктов рециклинга:

$$y_{nm1} = \ln\left(Q_n \sum_{\alpha=1}^{A} V_{m\alpha} \cdot P_{m\alpha}\right), \qquad (8)$$

где A – количество компонентов НСО (для рассматриваемого примера A=5, см. Таблицу II); $V_{m\alpha}$ – коэффициент вторичного использования m-ой установкой α-го компонента НСО; $P_{m\alpha}$ - коэффициент нормирования полезного продукта рециклинга, полученного из α-го компонента НСО m-ой установкой, который определяется на основе сопоставления стоимости одной тонны полезного продукта рециклинга, приведенной к стоимости одной тонны дизельного топлива (Таблица II), $\alpha = \overline{1,A}$, $m = \overline{1,M}$.

y_{nm2} – оценка $RS_n^1, n = \overline{1,9}$ ресурсной ценности, полученная на основе решения ЗМП в форме (3)-(4) для анализируемой группы из 9 объектов хранения НСО (Таблица III).

Рассчитываемые по формулам (5)-(8) входные $x_{nmi}, i = \overline{1,3}$ и выходные $y_{nmj}, j = \overline{1,2}$, $n = \overline{1,N}$, $m = \overline{1,M}$ параметры модели оценки ресурсного потенциала объекта хранения НСО (Рис. 2 *a*) формируют исходные данные для решения соответствующих ЗМП в форме (1)-(2) и (3)-(4).

Входные $X_{mn} = \left(x_{mni}\right), i = \overline{1,3}$ и выходные $Y_{mn} = \left(y_{mnj}\right), j = \overline{1,2} \quad n = \overline{1,N}$, $m = \overline{1,M}$ параметры модели оценки ресурсного потенциала технологической установки НСО (Рис.2 *b*), определяемые аналогично по формулам (5)-(8), формируют исходные данные для соответствующих ЗМП в форме (1)-(2) и (3)-(4).

В Таблицах IV, V представлены многокритериальные оценки $P_{nm}^{2.1}$ и $P_{mn}^{2.2}$ ресурсного потенциала объектов исследования, полученные путем решения соответствующих ЗМП в форме (1)-(2) на основе CCR модели метода DEA.

ТАБЛИЦА IV. ОЦЕНКА $P_{nm}^{2.1}$ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ОБЪЕКТОВ ХРАНЕНИЯ НСО НА ОСНОВЕ CCR МОДЕЛИ DEA МЕТОДА

Объект хранения НСО $n = \overline{1,N}$	**Установка по переработке НСО** $m = \overline{1,M}$						
	1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***
1	0.10	0.03	0.03	0.03	0.05	0.07	0.12
2	0.28	0.09	0.09	0.09	0.14	0.20	0.33
3	0.17	0.11	0.11	0.11	0.13	0.15	0.19
4	0.98	0.85	0.85	0.86	0.91	0.95	1.00
5	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1
7	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04
8	0.05	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06
9	0.14	0.04	0.04	0.04	0.07	0.10	0.17

ТАБЛИЦА V. ОЦЕНКА $P_{mn}^{2.2}$ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ CCR МОДЕЛИ DEA МЕТОДА

Установка по переработке НСО $m = \overline{1,M}$	**Объект хранения НСО** $n = \overline{1,N}$								
	1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***8***	***9***
1	0.10	0.03	0.03	0.03	0.05	0.07	0.12	0.10	0.03
2	0.28	0.09	0.09	0.09	0.14	0.20	0.33	0.28	0.09
3	0.17	0.11	0.11	0.11	0.13	0.15	0.19	0.17	0.11
4	0.98	0.85	0.85	0.86	0.91	0.95	1	0.98	0.85
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.03	0.01

В Таблицах VI, VII представлены многокритериальные оценки $PS_{nm}^{2.1}$ и $PS_{mn}^{2.2}$ ресурсного потенциала объектов исследования, полученные путем решения соответствующих ЗМП в форме (3)-(4) на основе модели Super-efficiency метода DEA.

ТАБЛИЦА VI. ОЦЕНКА $PS_{nm}^{2.1}$ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ОБЪЕКТОВ ХРАНЕНИЯ НСО НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ SUPER-EFFICIENCY DEA МЕТОДА

Объект хранения НСО $n = \overline{1,N}$	**Установка по переработке НСО** $m = \overline{1,M}$							**Суммарная оценка** $\sum PS_{nM}^{2.1} = \sum_{m=1}^{M} PS_{nm}^{2.1}$
	1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	
1	0.10	0.03	0.03	0.03	0.05	0.07	0.12	**0.42**
2	0.28	0.09	0.09	0.09	0.14	0.20	0.33	**1.21**
3	0.17	0.11	0.11	0.11	0.13	0.15	0.19	**0.97**
4	0.98	0.85	0.85	0.86	0.91	0.95	1.00	**6.39**
5	2.47	1.46	1.46	1.46	1.78	2.06	2.71	**13.40**
6	1.94	1.94	1.94	1.92	1.94	1.93	1.94	**13.54**
7	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	**0.15**
8	0.05	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	**0.22**
9	0.14	0.04	0.04	0.04	0.07	0.10	0.17	**0.60**

ТАБЛИЦА VII. ОЦЕНКИ $PS_{mn}^{2.2}$ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ SUPER-EFFICIENCY DEA МЕТОДА

Установка по переработке НСО $m=\overline{1,M}$	**Объект хранения НСО $n=\overline{1,N}$**									**Суммарная оценка $\sum PS_{mN}^{2.2} = \sum_{n=1}^{N} PS_{mn}^{2.2}$**
	1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***8***	***9***	
1	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	**7.82**
2	0.70	0.74	0.70	1	0.79	1	0.68	0.69	0.70	**6.99**
3	0.70	0.74	0.70	1	0.79	1	0.68	0.69	0.70	**6.99**
4	0.69	0.69	0.69	1.02	0.72	1.46	0.69	0.69	0.69	**7.32**
5	6.67	6.67	6.67	6.67	6.67	6.67	6.67	7.49	6.67	**60.83**
6	1.88	1.78	1.88	1.77	1.77	1.77	1.91	1.91	1.86	**16.54**
7	3.27	3.03	3.27	2.13	2.81	1.75	3.36	3.33	3.22	**26.18**

V. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Представленные в таблице IV результаты позволяют определить, что переработка отходов в объектах хранения НСО №5 и №6 с использованием *m*-ой установки является наиболее эффективной, поскольку эти объекты обладают максимальными значениями оценок $P_{nm}^{2.1}$ в анализируемой группе.

Представленные в таблице V результаты позволяют определить, что установки переработки №№4-6 являются наиболее эффективными с точки зрения извлечения полезных вторичных продуктов из НСО в *n*-ом хранилище, поскольку они обладают максимальными значениями оценок $P_{mn}^{2.2}$ в анализируемой группе.

Анализ оценок $PS_{nm}^{2.1}$ (Таблица VI) показывает, что максимальным ресурсным потенциалом в анализируемой группе обладает объект хранения НСО №5 при использовании установки переработки №7, поскольку он имеет максимальную оценку $PS_{57}^{2.1} = 2.71$.

Суммарная оценка $\sum PS_{nM}^{2.1}$ (Таблица VI) определяет ресурсный потенциал *n*-го объекта хранения с учётом применения всех *M* рассматриваемых установок по переработке НСО в анализируемой группе. Сравнение оценок $\sum PS_{nM}^{2.1}$, $n=\overline{1,N}$ показывает, что объект хранения №6, имеющий максимальную оценку $\sum PS_{67}^{2.1} = 13.54$, обладает максимальным ресурсным потенциалом в анализируемой группе объектов хранения НСО.

Анализ оценок $PS_{mn}^{2.2}$ (Таблица VII) позволяет сделать вывод, что установка переработки №5, имеющая максимальную оценку $PS_{58}^{2.2} = 7.49$, является наиболее эффективной в анализируемой группе установок с точки зрения извлечения полезных вторичных продуктов из НСО в объекте хранения №8.

Представленная в Таблице VII суммарная оценка $\sum PS_{mN}^{2.2}$ ресурсного потенциала *m*-ой установки является показателем эффективности извлечения с её помощью полезных вторичных продуктов из НСО во всех *N* объектах хранения. Сравнение оценок $\sum PS_{mN}^{2.2}$, $m=\overline{1,M}$ показывает, что применение установки №5, имеющей максимальную оценку $\sum PS_{59}^{2.2} = 60.83$, является наиболее эффективным для утилизации НСО в анализируемой группе объектов хранения.

Рассмотренный в работе подход к моделированию и многокритериальной оценке ресурсного потенциала системы переработки отходов на основе DEA метода успешно апробирован на группе объектов хранения и установок переработки НСО нефтегазовой промышленности. Решение сформулированных задач позволило определить обладающие максимальным ресурсным потенциалом объекты хранения и установки по переработке НСО. Полученные результаты могут быть использованы для принятия соответствующих управленческих решений по оптимизации системы утилизации НСО с целью повышения её эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] M.F. Ashby, “Chapter 14-the vision: a circular materials economy”. In: Ashby, M.F. (Ed.), Materials and Sustainable Development. Butterworth-Heinemann, Boston, 2016, pp. 211-239.

[2] P. Ghisellini, C. Cialani, S. Ulgiati, “A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems”, J. Clean. Prod. vol. 114, pp. 11-32, February 2016.

[3] Eleni Iacovidou, Costas A. Velis, Phil Purnell, Oliver Zwirner, Andrew Brown, John Hahladakis, Joel Millward-Hopkins, Paul T. Williams, “Metrics for optimising the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy: A critical review”, J. Clean. Prod., vol. 166, pp. 910-938, November 2017.

[4] T.H. Christensen, E. Gentil, A. Boldrin, A.W. Larsen, B.P. Weidema, M. Hauschild, “C balance, carbon dioxide emissions and global warming potentials in LCA-modelling of waste management systems”. Waste Manag. Res., vol. 27, pp. 707-715, May 2009.

[5] Allegrini, E., Vadenbo, C., Boldrin, A., Astrup, T.F., “Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash”, J. Environ. Manag., vol. 151, pp. 132-143, March 2015.

[6] R. Arvidsson, K. Fransson, M. Froling, M. Svanstrom, S. Molander, “Energy use indicators in energy and life cycle assessments of biofuels: review and recommendations”, J. Clean. Prod., vol. 31, pp. 54-61, August 2012.

[7] Rita Puig, Pere Fullana-i-Palmer, Grau Baquero, Jordi-Roger Riba, Alba Bala, “Cumulative Energy Demand indicator (CED), life cycle based, for industrial waste management decision making”, Waste Manag., vol. 33, Issue 12, pp. 2789-2797, December 2013.

[8] K. Fang, R. Heijungs, G.R. De Snoo, “Understanding the complementary linkages between environmental footprints and planetary boundaries in a footprint–boundary environmental sustainability assessment framework”, Ecol. Econ., vol. 114, pp. 218-226, June 2015.

[9] Pleshivtseva Yu.E., Derevyanov M.Yu., Kashirskikh D.V., Pimenov A.A., Kerov A.V., Tyan V.K., Comparative evaluation of the reuse value of storage for oil-contaminated waste based on DEA method. Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry. vol. 11. pp. 139-144, November 2018.

[10] Chen Y., Du J. Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis. In: Zhu J. (eds) Data Envelopment Analysis. International Series in Operations Research & Management Science, vol. 221. Springer, Boston, MA, 2015.

[11] Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E. “Measuring the efficiency of decision-making units“, European Journal of Operation Research, vol. 6 (2), pp. 429-444, 1978.

Об одном методе решения задач теплообмена при течении жидкости в цилиндрическом канале

Еремин А.В.
Кафедра «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Самара, Россия
a.v.eremin@list.ru

Ткачев В.К.
Кафедра «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Самара, Россия
tvk93@yandex.ru

Клеблеев Р.М.
Кафедра «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Самара, Россия
totig@yandex.ru

***Abstract* — Using the additional sought-for function and additional boundary conditions in the integral method, a high-precision solution of the problem is obtained for laminar fluid motion in a pipe with a variable boundary condition of the first kind. The function characterizing the temperature change in the center of the channel along a longitudinal spatial variable is taken as an additional one. Its introduction is based on the infinite velocity of heat distribution laid by the parabolic heat exchange equation, according to which the temperature at any point of the cylindrical channel will change immediately after the application of the boundary condition on its surface. The use of the additional function allows us to reduce the solution of the equation in partial derivatives to the solution of an ordinary equation. Additional conditions are built so that their satisfaction is adequate to the implementation of the equation at the boundary points. It is shown that the satisfaction of the equation at the points of the boundary leads to its fulfillment in the entire region with accuracy depending on the number of approximations (the number of additional conditions). The performed studies allow us to conclude that already in the third approximation, the found analytical solution in the range of the longitudinal variable practically coincides with the solution by the numerical method (finite difference method). Due to the simplicity of the defined solutions that include only algebraic polynomials, it is possible to perform research in the fields of isotherms and the speeds of their movement.**

Ключевые слова — ламинарное течение, цилиндрический канал, краевая задача теплообмена, бесконечная скорость распределения теплоты, переменные краевые условия, интегральный метод, дополнительная функция, дополнительные краевые условия.

I. Введение

Нахождение точных решений задач теплообмена для сред, перемещающихся в круглых трубах, представляет большие трудности. Такие решения получены лишь в некоторых частных случаях и, к тому же, при существенных допущениях. При получении аналитических решений нестационарных задач для ламинарного течения жидкости происходит их разделение на нестационарные и стационарные [1, 2]. Области их применения определяются соотношениями между временем и переменной, направленной вдоль потока. Нестационарная задача – это задача для сплошного цилиндра с как бы неподвижной жидкостью, ее точные аналитические решения известны. Трудность представляет получение решения стационарной задачи, известной как задача Гретца – Нуссельта. Впервые ее решение было получено Гретцем и Нуссельтом. Уточнение этого решения дано в [1]. Данное решение представлено в виде бесконечного ряда, плохо сходящегося при малых величинах продольной координаты. Оно содержит функции Бесселя разного, и к тому же дробного порядка. Особую трудность представляет также нахождение собственных чисел, определяемых из степенных уравнений, решение которых при большом числе членов ряда решения возможно лишь численными методами.

В теории теплопроводности есть методы, связанные с нахождением фронта возмущения – глубины термического слоя [3–7]. При их применении процесс теплообмена разделяется на две стадии. В первой из них происходит постепенное продвижение фронта возмущения от поверхности к центру. Во второй температура изменяется в пределах всей области изменения пространственной переменной. Отметим, что применительно к задачам теплообмена для движущихся жидкостей процесс теплообмена разделяется на две стадии по продольной переменной. К числу недостатков интегральных методов относится низкая точность. Для ее увеличения в [3, 11] вводятся дополнительные краевые условия, использование которых показало, что при возрастании числа приближений n происходит убывание времени движения фронта возмущения – происходит возрастание его скорости. В пределе при $n \to \infty$ скорость фронта также стремится к бесконечной величине, что подтверждает бесконечную скорость распределения теплоты. Следовательно при увеличении числа приближений время (для движущихся жидкостей – диапазон продольной переменной),в течение которого протекает первая стадия, уменьшается, а второй стадии – возрастает. Поэтому решения первой стадии могут быть применены лишь для малых значений времени (для жидкостей – продольной переменной). Учитывая это, в настоящей работе предлагается метод, позволяющий избежать первой стадии процесса.

Основная его идея базируется на применении дополнительной функции и дополнительных краевых условий. Введение дополнительной функции позволяет представить исходное уравнение в частных производных в виде обыкновенного уравнения. Дополнительные условия строятся так, чтобы их удовлетворение было адекватно удовлетворению исходного уравнения в точках границы. Метод выполнения уравнения в точках границы использовался в работах [8–10].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18 – 38 – 00029 мол_а и Совета по грантам Президента РФ в рамках научного проекта МК–2614.2019.8.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве конкретного примера применения изложенного метода рассмотрим получение аналитического решения стационарной задачи при течении жидкости в трубе в случае, когда температура стенки является линейной функцией продольной координаты. При решении задачи введем допущения: профиль скорости по длине трубы неизменен; физические свойства среды постоянны; внутренние источники теплоты отсутствуют; изменением температуры в результате трения (диссипацией энергии) пренебрегается [1, 2]. Математическая постановка задачи с учетом принятых допущений имеет вид (рис.1)

$$\omega_\xi \frac{\partial t(\xi,\eta)}{\partial \eta} = \frac{a}{\xi}\frac{\partial t(\xi,\eta)}{\partial \xi} + a\frac{\partial^2 t(\xi,\eta)}{\partial \xi^2}; \qquad (1)$$

$$(\eta > 0;\ 0 < \xi < r_0);$$

$$t(\xi,0) = t_0; \qquad (2)$$

$$\partial t(0,\eta)/\partial \xi = 0; \qquad (3)$$

$$t(r_0,\eta) = t_0 + B\eta; \qquad (4)$$

где $B = dt/d\eta$ – коэффициент, характеризующий интенсивность изменения температуры жидкости на стенке канала в зависимости от координаты η; t – температура; η, ξ – продольная и поперечная переменные; r_0 – радиус трубы; t_0 – температура на входе в трубу (при $\eta = 0$); a – температуропроводность жидкости; $\omega_\xi = 2\omega_{\text{ср}}(1-\xi^2/r_0^2)$ – профиль скорости; $\omega_{\text{ср}} = 0{,}5\omega_{max} = \Delta p r_0^2/(8\mu l)$ – средняя скорость; l – длина трубы; Δp – перепад давления по длине трубы; μ – коэффициент динамической вязкости; ω_{max} – максимальная скорость (скорость на оси трубы $(\xi = 0)$).

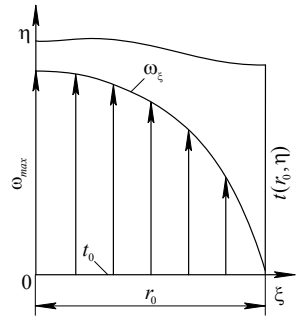


Рис. 1. Схема теплообмена при течении жидкости в трубке

Обозначим:

$$\Theta = \frac{t-t_0}{t_0}; \quad y = \frac{\xi}{r_0}; \quad x = \frac{\eta a}{2\omega_{cp} r_0^2},$$

где Θ – безразмерная температура; y, x – безразмерные координаты.

С учетом обозначений задача (1) – (4) будет

$$(1-y^2)\frac{\partial \Theta(y,x)}{\partial x} = \frac{1}{y}\frac{\partial \Theta(y,x)}{\partial y} + \frac{\partial^2 \Theta(y,x)}{\partial y^2}; \qquad (5)$$

$$(0 < x < l;\ \ 0 < y < 1);$$

$$\Theta(y,0) = 0; \qquad (6)$$

$$\partial \Theta(0,x)/\partial y = 0; \qquad (7)$$

$$\Theta(1,x) = Ax, \qquad (8)$$

где $A = 2B\omega_{cp} r_0^2/(at_0)$ – безразмерный комплекс.

III. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

С целью упрощения процесса получения решения задачи (5) – (8) введём дополнительную искомую функцию

$$q(x) = \Theta(0,x), \qquad (9)$$

характеризующую изменение температуры на оси трубы $(y = 0)$. Температура в центре трубы вследствие бесконечной скорости распространения теплоты будет изменяться тот час же после начала действия условия первого рода на её внутренней поверхности (теплопроводностью материала трубы пренебрегается). В связи с чем, диапазон изменения функции $q(x)$ будет включать весь диапазон изменения пространственной переменной x. Так как температура на оси трубы является искомой величиной задачи (5)–(8), то её отдельное рассмотрение никоим образом этой задачи не изменяет, а лишь существенно упрощает процесс получения решения.

Решение задачи (5) – (8) разыскивается в виде

$$\Theta(y,x) = A\left[x - \frac{1}{2}(1-y^2) + \sum_{k=1}^{n} b_k(q)\varphi_k(y)\right], \qquad (10)$$

где $b_k(q)$ – неизвестные коэффициенты; $\varphi_k(y) = 1-y^{2k}$ $(k = \overline{1,n})$ – координатные функции.

Соотношение (10), вследствие принятой системы координатных функций, удовлетворяет соотношениям (7), (8). Неизвестные коэффициенты $b_k(q)$, $(k = \overline{1,n})$ находятся из (9) и дополнительных условий, определяемых так, чтобы их удовлетворение было адекватно удовлетворению уравнения (5) в точках $y = 0$ и $y = 1$.

Для вывода дополнительных условий продифференцируем (7) и (8) по x

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial\Theta(0,x)}{\partial x}\right)=0 \quad ; \tag{11}$$

$$\partial\Theta(1,x)/\partial x = A \, . \tag{12}$$

Соотношение (11), учитывая уравнение (5), приводится к виду

$$\left(-\frac{1}{y^2}\frac{\partial\Theta(y,x)}{\partial y}+\frac{1}{y}\frac{\partial^2\Theta(y,x)}{\partial y^2}+\frac{\partial^3\Theta(y,x)}{\partial y^3}\right)_{y=0}=0. \tag{13}$$

Раскрывая неопределенности по правилу Лопиталя, находим дополнительное условие вида

$$\partial^3\Theta(0,x)/\partial y^3 = 0 \, . \tag{14}$$

Соотношение (12), учитывая уравнение (5), приводится к дополнительному граничному условию вида

$$\partial^2\Theta(1,x)/\partial y^2 + \partial\Theta(1,x)/\partial y = 0 \, . \tag{15}$$

Продифференцируем (14) по переменной x

$$\frac{\partial^3}{\partial y^3}\left(\frac{\partial\Theta(0,x)}{\partial x}\right).$$

Последнее соотношение, учитывая уравнение (5), будет

$$\left(-\frac{6}{y^4}\frac{\partial^3\Theta(y,x)}{\partial y^3}+\frac{1}{y_3}\frac{\partial^4\Theta(y,x)}{\partial y^4}+\right.$$

$$\left.+\frac{\partial^5\Theta(y,x)}{\partial y^5}\right)_{y=0}=0. \tag{16}$$

Раскрывая неопределенности в первом и втором слагаемых соотношения (16), получаем ещё одно дополнительное граничное условие

$$\partial^5\Theta(0,x)/\partial y^5 = 0 \, . \tag{17}$$

Аналогично, дифференцируя предыдущие дополнительные условия по переменной x с учетом (5), можно получить какое угодно их количество. Для точки $y=0$ дополнительные условия можно представить в виде общей формулы

$$\partial^i\Theta(0,x)/\partial y^i = 0 \, , (i = 3,\ 5,\ 7,\ \ldots) \, . \tag{18}$$

Отметим, что соотношение (10) удовлетворяет условиям (18) при любых неизвестных коэффициентах $b_k(q)$, $(k=\overline{1,n})$. Для точки $y=0$ необходимо выполнять также дополнительные условия, полученные на основе (9). Дифференцируя (9) по x, получим

$$dq/dx = \partial\Theta(0,x)/\partial x \, . \tag{19}$$

Соотношение (19), учитывая (5) будет

$$\left(\frac{1}{y}\frac{\partial\Theta(y,x)}{\partial y}+\frac{\partial^2\Theta(y,x)}{\partial y^2}\right)_{y=0}=\frac{dq(x)}{dx} \, . \tag{20}$$

Раскрывая неопределенность в первом слагаемом правой части соотношения (20), находим следующее дополнительное граничное условие

$$2\frac{\partial^2\Theta(0,x)}{\partial y^2}=\frac{dq(x)}{dx} \, . \tag{21}$$

Физическое содержание дополнительных условий в том, что их выполнение решением в граничных точках $y=0$ и $y=1$ адекватно удовлетворению в них уравнения (5). Отметим, что в точке $y=1$ уравнение (5) выполняется в предельном смысле, то есть через равенство нулю его правой и левой части. В точке $y=0$ оно выполняется при вполне определенных (в зависимости от величины координаты x) ненулевых и одинаковых значениях правой и левой части [13–15].

Таким образом, из всех основных и дополнительных граничных условий невыполненными принятым решением вида (10) оказываются условия (9), (15), (21), которые и будут далее применены при нахождении коэффициентов b_k $(k=\overline{1,n})$. Для решения в первом приближении подставим (10) (при одном члене суммы) в (9). Относительно $b_1(q)$ будем иметь алгебраическое уравнение, из решения которого будем иметь $b_1(q) = q/A - x + 1/2$. Соотношение (10) будет

$$\Theta(y,x) = A\left[x-\frac{1}{2}(1-y^2)+\left(\frac{q}{A}-x+\frac{1}{2}\right)(1-y^2)\right]. \tag{22}$$

Потребуем, чтобы выражение (22) удовлетворяло не уравнению (5), а осредненному в диапазоне от $y=0$ до $y=1$ уравнению

$$\int_0^1 y(1-y^2)\frac{\partial\Theta(y,x)}{\partial x}dy =$$

$$=\int_0^1\left(\frac{\partial\Theta(y,x)}{\partial y}+y\frac{\partial^2\Theta(y,x)}{\partial y^2}\right)dy \, . \tag{23}$$

Подставив (22) в (23), относительно $q(x)$ получим уравнение

$$\frac{dq(x)}{dx}+12q(x)-12Ax+\frac{1}{2}A=0\,. \qquad (24)$$

Интегрируя (24), получим

$$q(x)=Ax-\frac{1}{8}A+Ce^{-12x}\,, \qquad (25)$$

где C – постоянная интегрирования.

Для расчета C найдем невязку условия (6) и потребуем ее ортогональности к функции $\varphi_1(y)=1-y^2$

$$\int_0^1(\Theta(y,0)(1-y^2)\,dy=0 \qquad (26)$$

Подставляя (22) с учётом (25) в (26), для С получим алгебраическое уравнение. Его решение: $C=0{,}125A$. После определения С приближенное решение задачи (5) – (8) записывается следующим образом

$$\Theta(y,x)=A\left[x-0{,}125(1-e^{-12x})(1-y^2)\right]. \qquad (27)$$

Результаты расчётов по формуле (27) в сравнении с решением задачи (5) – (8) численным методом (метод конечных разностей) даны на рис. 2. Из анализа видно, что при $0{,}1\le x\le 1{,}0$ их расхождение находится в пределах 6%. Для повышения точности будем увеличивать число слагаемых ряда (10). И, в частности, для второго приближения подставим (10) в (9), (21). Для $b_k(q)$, $(k=1,\,2)$ получим два алгебраических уравнения, из решения которых находим:

$$b_1(q)=0{,}5-0{,}25q'/A\,;$$

$$b_2(q)=(q'+4(q-Ax))/(4A)\,,$$

где $q'=dq(x)/dx$.

Подставляя найденные значения коэффициентов $b_k(q)$, $(k=1,\,2)$ в соотношение (10), получаем

$$\Theta(y,x)=Ax-\frac{A}{2}(1-y^2)+\frac{1}{4}(2A-q')(1-y^2)+$$

$$+\frac{1}{4}(q'-4Ax+4q)(1-y^4)\,. \qquad (28)$$

Подставив (28) в (23), для $q(x)$ получим уравнение

$$q''+68q'+384q+4A(1-96x)=0\,, \qquad (29)$$

где $q''=d^2q(x)/dx^2$.

Интегрируя (29), получим

$$q(x)=A(x-3/16)+C_1\exp((-34-2\sqrt{193})x)+$$

$$+C_2\exp((-34+2\sqrt{193})x)\,, \qquad (30)$$

где C_1, C_2 – константы.

Для их определения вычислим невязку условия (6) при условии выполнения ее ортогональности к функциям $\varphi_1(y)$ и $\varphi_2(y)$

$$\int_0^1\Theta(y,0)\varphi_j(y)dy=0\,,\quad (j=k=1,\,2)\,. \qquad (31)$$

Подставив (28) с учётом (30) в (31), для C_1 и C_2 получим два уравнения

$$\left.\begin{aligned}&4C_2/105(\sqrt{193}-1)-4C_1/105(\sqrt{193}+1)-2A/21=0;\\&16C_2/315(\sqrt{193}-3)-16C_1/315(\sqrt{193}+3)-34A/315=0.\end{aligned}\right\} \qquad (32)$$

Решение уравнений (32) будет: $C_1=-0{,}002975A$; $C_2=0{,}19047A$.

Выражение (28) с учётом (30), а также полученных значений C_1 и C_2 будет решением задачи (5) – (8) для 2-го приближения. Расчёты по формуле (28) а также численное решение представлены на рис. 2. Из их анализа видно, что при $0{,}1\le x\le 1{,}0$ решения практически совпадают.

Для решения задачи (5)–(8) в третьем приближении подставляя (10) в (9), (15), (21), для $b_k(q)$, $(k=1,\,2,\,3)$ получим цепочную систему из трёх алгебраических уравнений. Ее решение:

$$b_1(q)=0{,}25(2-q'/A)\,;$$

$$b_2(q)=0{,}4(q'+4{,}5q)/A-1{,}8x\,;$$

$$b_3(q)=0{,}8(x-q/A)-0{,}15q'/A\,.$$

Выражение (10) с учетом $b_k(q)$, $(k=1,\,2,\,3)$ будет

$$\Theta(y,x)=A\left[x-0{,}5(1-y^2)(1-0{,}5(2-q'/A))+\right.$$

$$+(0{,}4(q'+4{,}5q)/A-1{,}8x)(1-y^4)+$$

$$\left.+(0{,}8(x-q/A)-0{,}15q'/A)(1-y^6)\right]. \qquad (33)$$

Подставив (33) в (23), находим

$$\frac{19}{480}q'' + \frac{79}{40}q' + 12q + A\left(\frac{11}{40} - 12x\right) = 0. \qquad (34)$$

Интегрируя (34), получим

$$q(x) = C_1 \exp\left(-\frac{6}{19}(\sqrt{3201} + 79)x\right) +$$

$$+ C_2 \exp\left(\frac{6}{19}(\sqrt{3201} - 79)x\right) + A(x - 3/16), \quad (35)$$

где C_1, C_2 – постоянные для определения которых вычислим невязку условия (6) с учетом выполнения ортогональности невязки к координатным функциям $\varphi_j(y)$, $(j = 1, 2)$

$$\int_0^1 \Theta(y,0)\varphi_j(y)dy = 0, \quad (j = 1, 2).$$

Подставляя (33) с учётом (35) в последнее соотношение, относительно постоянных интегрирования C_1 и C_2 получаем следующую систему алгебраических уравнений

$$\left.\begin{aligned} 0{,}4813C_2 - 0{,}0632C_1 - 0{,}0952A = 0; \\ 0{,}5409C_2 - 0{,}1685C_1 - 0{,}1079A = 0. \end{aligned}\right\}$$

Из её решения находим: $C_1 = -0{,}0092A$; $C_2 = 0{,}1966A$.После определения C_1 и C_2 решение задачи (5) – (8) для третьего приближения находится из (33). Из анализа расчетов видно, что при $0{,}001 \le x \le 1{,}0$ они практически не отличаются от решения задачи (5)–(8) численным методом (рис. 2).

На рис. 3 приведены результаты решения задачи (5) – (8) для случая, когда граничные условия (6) и (8) заменены на следующие:

$$\Theta(y,0) = 1; \quad \Theta(1,x) = 0 \qquad (36)$$

Решение задачи в данном случае принималось в виде

$$\Theta(y,x) = \sum_{k=1}^{n} b_k(q)(1 - \xi^{2k}) \qquad (37)$$

Из сравнения расчётов по (37) при $n = 3$ с решением по методу Л.В. Канторовича (шестое приближение [16]) и с точным решением [1] видно, что в диапазоне $0{,}05 \le x < \infty$ их расхождение не превышает 2,5 %. Отметим, что решение по методу Л.В. Канторовича и точное аналитическое решение практически совпадают.

Ввиду максимальной простоты аналитических решений имеется возможность исследования теплообмена в полях изотерм с определением скоростей их движения. И, в частности, на рис. 4 приведены графики распределения изотерм $\Theta(y,x) = const$ в зависимости от величин поперечной и продольной координат. Изотермы определялись по формуле, полученной из решения в первом приближении (27) при $A = 1$, в котором для каждой изотермы $\Theta(y,x) = const$ координата y в зависимости от координаты x определяется по соотношению

$$y(x,\Theta) = \sqrt{1 + \frac{\Theta(y,x) - x}{0.125(1 - e^{-12x})}}. \qquad (38)$$

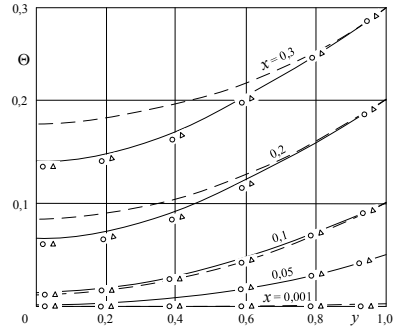


Рис. 2. Распределение температуры. — — — – по формуле (27); ———— – по формуле (28); ○ – по формуле (33); △ – численное решение; $A = 1$

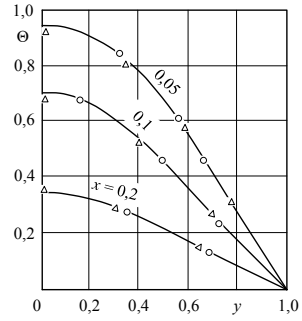


Рис. 3. Распределение температуры: ○ – метод Л.В. Канторовича (шестое приближение [16]); △ – по формуле (37) при $n = 3$; ———— – точное решение [1].

Как следует из рис. 4, изотермы возникают на стенке трубопровода ($y = 1$) согласно граничному условию (8). Изотермические линии перпендикулярны оси канала ($y = 0$), что объясняется выполнением решением (27) граничного условия (7).

Определяя первую производную от соотношения (38) по переменой x , находятся скорости перемещения изотерм

$$\upsilon = \frac{dy}{dx} = -\frac{12(\Theta(y,x) - x) - 1 + e^{12x}}{\sqrt{(8(x - \Theta(y,x)) - 1 + e^{-12x})/(e^{-12x} - 1)} \cdot sinh(6{,}0 \cdot x)^2} \qquad (39)$$

Из анализа скоростей изотерм, полученных из (39), видно, что при $x = 0$ и $y = 1$ они имеют бесконечно большие скорости, объясняемые выполнением граничных условий первого рода (6) и (8) (рис. 5). По

мере движения к центру канала их скорости уменьшаются до некоторого различного для каждой конкретной изотермы значения и затем вновь возрастают, устремляясь к бесконечной величине вблизи осевой линии канала, что объясняется выполнением граничного условия (7). Отрицательные знаки скоростей изотерм объясняются тем, что направление их движения противоположно направлению оси y.

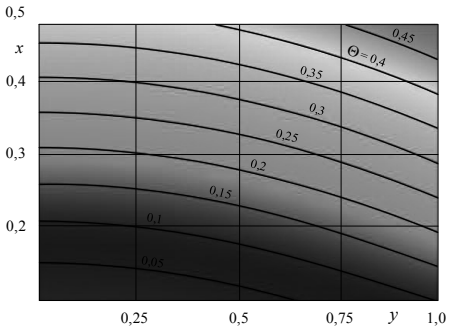


Рис. 4. Распределение изотерм. Расчет по формуле (38). A=1.

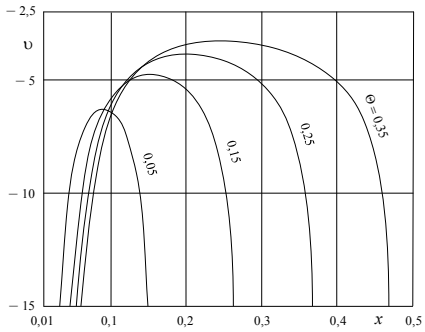


Рис. 5. Распределение скоростей движения изотерм. Расчет по формуле (39). A=1

Отметим, что применительно нестационарным задачам теплопроводности для бесконечной пластины с переменными начальными и граничными условиями, с неоднородными граничными условиями, а также с источниками теплоты, в работах [13–15], используя рассмотренный выше метод, получены точные аналитические решения в форме бесконечных рядов.

IV. ВЫВОДЫ

1) Используя дополнительную искомую функцию и дополнительные краевые условия в интегральном методе, найдено приближенное решение задачи теплообмена применительно к жидкости, движущейся в цилиндрическом канале. Применение дополнительной функции позволило свести уравнение в частных производных к обыкновенному уравнению. Дополнительные краевые условия имеют такой вид, чтобы их выполнение было адекватно удовлетворению исходного уравнения в точках границы. Показано, что выполнение уравнения в точках границы приводит к его удовлетворению и внутри области с точностью, определяемой числом дополнительных условий.

2) Построены графики изотерм и скоростей их передвижения, что оказалось возможным ввиду максимальной простоты аналитического выражения для решения вида (27) в первом приближении. Из их анализа следует, что кривые изотерм перпендикулярны осевой линии канала, а скорости их движения на линиях $y = 0$ и $y = 1$ устремляются к бесконечным значениям.

3) Ввиду отсутствия необходимости интегрирования уравнения в частных производных по радиальной пространственной переменной, ограничиваясь интегрированием обыкновенного уравнения относительно дополнительной функции, данный метод может быть применён для задач со сложными операторами в уравнениях, не допускающими разделения переменных (нелинейных, с переменными физическими свойствами среды, с учётом диссипации энергии и др.)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] *Петухов Б.С.*Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М.: Энергия, 1967.411 *с.*

[2] *Цой П.В.* Системные методы расчета краевых задач тепломассопереноса. М.: Издательство МЭИ, 2005.

[3] *Кудинов В.А., Стефанюк Е.В.*Задачи теплопроводности на основе определения фронта температурного возмущения. Известия Российской академии наук. Энергетика. 2008, №5.С. 141 – 157 .

[4] *Лыков А.В.* Методы решения нелинейных уравнений нестационарной теплопроводности. Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. №5. 1970, С. 109 – 150.

[5] *Гудмен Т.*Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена. Проблемы теплообмена. Сборник научных трудов. М.: Атомиздат, 1967. С. 41 – 96.

[6] *Глазунов Ю.Т.* Вариационные методы. Москва – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика»; Институт компьютерных исследований, 2006. 470с.

[7] *Беляев Н.М., Рядно А.А.* Методы нестационарной теплопроводности. М.: Высшая школа, 1978. 328с.

[8] *Канторович Л.В.* Об одном методе приближенного решения дифференциальных уравнений в частных производных. Доклады АН СССР. 1934. Т.2, №9. С. 532 – 534.

[9] *Федоров Ф.М.* Граничный метод решения прикладных задач математической физики. Новосибирск: Наука, 2000. 220с.

[10] *Кудряшов Л.И., Меньших Н.Л.* Приближенные решения нелинейных задач теплопроводности. М.: Машиностроение, 1979. 232 с.

[11] Kudinov, I.V. , Kudinov, V.A. , Kotova, E.V. Additional Boundary Conditions in Unsteady-State Heat Conduction Problems. High Temperature, 2017, Vol. 55, No 4, pp. 541 – 548.

[12] *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600с.

[13] *Кудинов И.В.* Получение точных аналитических решений задач теплопроводности с переменными во времени граничными условиями. Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. Самара: 2016, № 4 (52). С. 108 – 117.

[14] Kudinov, I.V., Stefanyuk, E.V., Skvortsova, M.P., Maksimenko, G.N. Method obtaining exact analytical solutions of tasks of heat conductivity with warmth sourses. Izvestiya Ferrous Metallurgy, 2017, Vol. 60, No 11, pp. 877 – 882.

[15] Kudinov, I.V., Kudinov, V.A., Kotova, E.V., Eremin A.V. On one method of solving nonstationary boundary-value problems. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2017, Vol. 90, No 6, pp. 1317 – 1327.

[16] *Карташов Э.М., Кудинов В.А., Калашников В.В.* Теория тепломассопереноса: решение задач для многослойных конструкций. 2-ое изд. М.: Издательство Юрайт, 2018. 435с.

Имитационная модель взаимодействия блоков компьютера и периферийного оборудования

Ефимушкина Н.В.
Самарский государственный технический университет
г. Самара, Россия
nvefimushkina@mail.ru

Орлов С.П.
Самарский государственный технический университет
г. Самара, Россия
orlovsp1946@gmail.com

Хрисанов Н.Н.
Самарский государственный технический университет
г. Самара, Россия
samhnn@mail.ru

***Abstract*—In the report the principles of constructing a simulation model for studying the basic processes and devices in the computer I / O subsystem are described. As a peripheral, typical computer hardware is offered: keyboard input devices and monitors. At imitation, probabilistic characteristics of data processing in the input-output subsystem are set. The modeling program is developed in Java in NetBeans 8.1. A user interface based on the animation of the processes in I / O subsystem is described.This allows getting a visual representation of interrupts, generation of control signals, and transfer of codes from peripheral devices to the memory and the central processor. The simulation results are presented in the time chart of devices usage and the numerical values of these characteristics. The input / output system under study can operate in one of three modes: only with information input, with data input and output to a monitor, and also only with data processing and output to a monitor.The report presents the results to study the simulated system in various modes, confirming the adequacy of the developed model.**

Ключевыеслова — имитационное моделирование, компьютер, процессор, подсистема ввода-вывода, периферийное оборудование, память

I. Введение

Современный персональный компьютер представляет собой сложную техническую систему, состоящую из нескольких устройств и подсистем, в которых может одновременно протекать несколько процессов, порождаемых программами пользователей. Его исследованием занимается теория вычислительных систем, которая использует три основных класса методов: аналитические, имитационные и экспериментальные [1, 2]. Наиболее достоверные результаты позволяют получить эксперименты, выполняемые над объектом, однако, высокая сложность и стоимость оборудования ограничивает применение этих методов для обучения [3].

Наиболее перспективными представляются методы имитационного моделирования. Современные федеральные образовательные стандарты допускают замену лабораторного оборудования его виртуальными аналогами. Предлагаемые модели могут быть отнесены именно к такому классу. Они основаны на подходе, который разрабатывался авторами в течение ряда лет [4-6]. Модели предназначены для обучения студентов, но могут быть также использованы и в исследовательских целях.

II. Проблемы разработки моделей

При разработке моделей решались следующие проблемы:

- определение цели исследования и выбор состава характеристик, получаемых с помощью модели;
- выбор состава устройств, которые должны быть в ней отображены;
- определение уровня детализации структуры и процессов, протекающих в объекте;
- оценка адекватности модели.

Важнейшей характеристикой вычислительных систем является их производительность и связанные с ней временные показатели. Поэтому при разработке моделей было решено оценивать времена занятости и простоя компьютера и его основных устройств в процессе решения некоторой типовой задачи. Такой подход определил особенности решения остальных проблем.

Общая структура объекта приведена на рис. 1. Было решено отображать в модели устройства, оказывающие существенное влияние на его функционирование и определяющие его временные характеристики. При этом второстепенные элементы, усложняющие процесс исследования и восприятия, в модели не отображались.

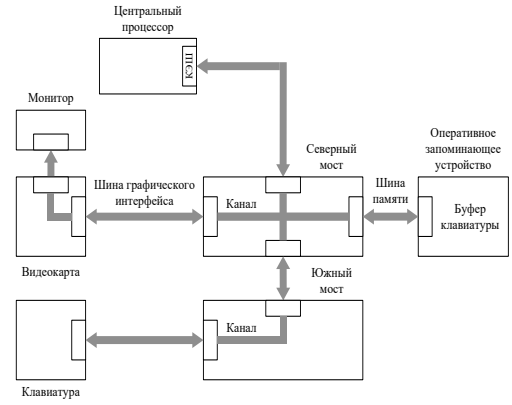


Рис. 1. Общая структура персонального компьютера

В качестве периферийных устройств было выбрано типовое оборудование персонального компьютера:

- клавиатура и монитор;
- внешнее запоминающее устройство (ВЗУ).

Было решено представить в первой модели следующие элементы, которые определяют характер

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

вычислительного процесса: процессор; оперативную память; клавиатуру; монитор; видеокарту; шины и мосты. Во второй модели наиболее важными являются следующие элементы компьютера: процессор; оперативная память; внешнее запоминающее устройство; шины и мосты. Модели содержат минимальное количество элементов, оказывающих влияние на работу подсистемы ввода-вывода.

Что касается уровня детализации параметров, то в моделях воспроизводятся устройства без представления их внутренней структуры. Они реализуют соответствующие функции. Вычислительный процесс, порождаемый программой, которая выполняется на устройствах компьютера, представляется с точностью до команд процессора. Среди этих команд в первой модели могут быть операции ввода с клавиатуры и вывода на экран, а во второй – команды обращения к файлам, находящимся в ВЗУ. Количество таких команд задается пользователем, а положение в общей смеси (программе) определяется случайным образом. Это позволяет исследовать широкое разнообразие вычислительных процессов.

Для оценки адекватности модели использованы измерительные мониторы, которые для учебных заведений распространяются бесплатно.

III. Описание моделей для исследования взаимодействия блоков компьютера и периферийных устройств

Предлагаемые модели представляют собой программы имитационного моделирования взаимодействия периферийных устройств и центральной части современного компьютера, имеющего структуру типа IBM PC. Они предназначены для проведения лабораторных работ для направлений «Информатика и вычислительная техника» и «Программная инженерия». Модели могут быть полезны при исследовании реальных компьютеров, имеющих подобную архитектуру. Они позволяют изучить особенности протекания вычислительных процессов в подсистемах ввода-вывода и внешней памяти. Имеется возможность исследовать влияние самых разнообразных факторов на производительность устройств подсистемы. Программы обеспечивают оценку временных характеристик, имеют развитый интерфейс и используют анимацию.

В первой модели, предназначенной для исследования подсистемы ввода-вывода, во время работы компьютера в ОЗУ находятся системные и прикладные программы. Исполняемая программа и ее данные помещаются в кэш процессора.

Известно, что операция ввода-вывода в современных компьютерах осуществляется при активном участии центрального процессора. Он инициирует ввод с клавиатуры, формирует ASCII-код символа и помещает его в буфер оперативной памяти. Связь между процессором, устройствами ввода-вывода и памятью обеспечивают системная шина и мосты.

Моделируемая программа реализует циклическую последовательность операций процессорной обработки и ввода-вывода, которая начинается с процессора. После выполнения на нем группы команд происходит прерывание, связанное с вводом данных с клавиатуры. Ввод осуществляется пользователем, а устройства ждут его завершения. Затем выполняется процессорная обработка до следующего прерывания и так далее. Программа завершается выполнением последнего этапа процессором. Ввод информации в компьютер с клавиатуры может осуществляться в одном из двух режимов: с выводом на экран; без вывода.

Существуют задачи, которые не требуют ввода информации с клавиатуры. В них выполняется только процессорная обработка и вывод на экран монитора. При этом в компьютере функционируют только процессор, оперативная память и подсистема вывода.

Модель разработана на языке программирования Java в среде NetBeans 8.1. Исходными данными для моделирования являются: быстродействие центрального процессора; количество выполняемых процессором команд; количество операций ввода-вывода в моделируемой программе; количество вводимых / выводимых символов за одну операцию; режим работы моделируемой программы (только с вводом, с вводом и выводом символов, а также без операций ввода).

В режиме без ввода клавиатура в процессе моделирования не используется, а символы, которые необходимо обработать процессором, берутся из кэша. В режиме без вывода символов графическая подсистема (видеокарта и монитор) в процессе моделирования также не участвуют.Модель может работать в одном из двух режимов: непрерывном или потактовом. Последний режим позволяет отследить все этапы выполнения командввода-вывода. Пример экранной формы процесса моделирования в этом режиме приведен на рис. 2.

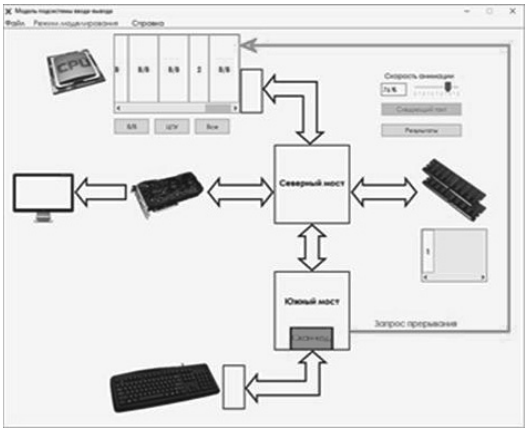


Рис. 2. Экранная форма процесса моделирования подсистемы ввода-вывода персонального компьютера

Моделирование заканчивается после выполнения заданного количества команд в имитируемой программе. Его результаты представляются в виде временных диаграмм занятости основных устройств и числовых значений времен их работы. Пример экранной формы результатов моделирования показан на рис. 3.

С помощью модели были проведены исследования типовой подсистемы ввода-вывода современного компьютера. Результаты приведены на рис. 4 – 5.

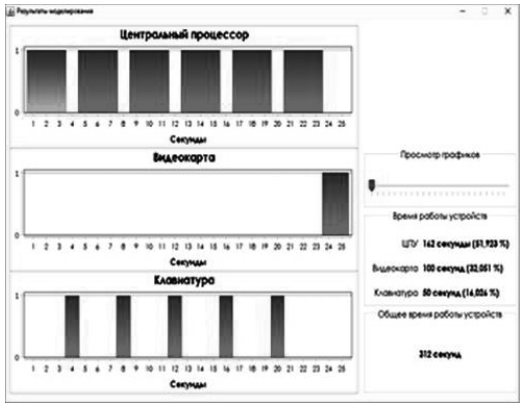


Рис. 3. Экранная форма результатов моделирования

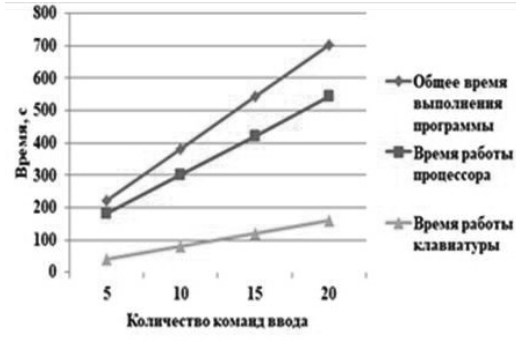


Рис. 4. Зависимость времени работы устройств и выполнения программы от количества команд

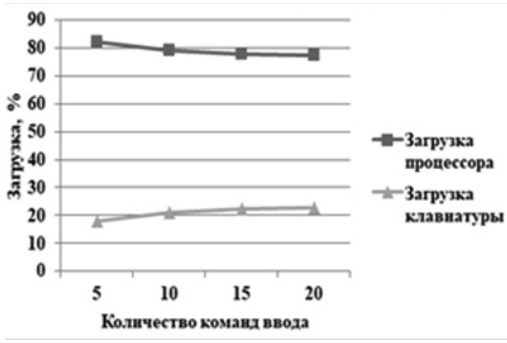


Рис. 5. Зависимость загрузки устройств от количества команд ввода

Вторая модель предназначена для исследования подсистемы внешней памяти, работающей в режиме прямого доступа (ПДП) в оперативное запоминающее устройство. Общеизвестно, что при таком доступе центральный процессор не участвует в обмене, а только инициирует и завершает его. Модель позволяет изучить особенности функционирования подсистемы ПДП в одно- и мультипрограммном режиме. Как уже отмечалось, в ней не отображается работа клавиатуры, но может быть представлено до двух ВЗУ.

Исходными данными для моделирования являются параметры устройств подсистемы и задач (программ), которые она обслуживает.

Для устройств задаются: быстродействие процессора, пропускные способности шин и мостов, а также емкость оперативной и внешней памяти. Параметрами задач являются: общее количество команд и число обращений к файлу на ВЗУ, а также тип операции (чтение или запись). Кроме того, для них задаются такие параметры файлов, как длина и длина одной записи, а также номер ВЗУ, на котором он хранится. В однопрограммном режиме в системе выполняется одна задача, а в мультипрограммном – до трех.

Результатами моделирования являются временные характеристики обслуживания задач: общее время выполнения заданного набора программ, также временные диаграммы занятости и коэффициенты загрузки устройств. Экранная форма окна моделирования для мультипрограммного режима с результатами, которые представлены в правой части, приведена на рис. 6.

Моделируемая программа представляется как последовательность команд, в которую в случайные места включаются операции обращения к файлу. В результате она разбивается на блоки процессорных операций, границы которых задаются командами обращения к файлу. Блоки отображаются на экранной форме в процессоре. Выполнение программы сводится к циклическому повторению этапов процессорной обработки, поиска начальной метки файла на ВЗУ и прямому обмену информацией между оперативной и внешней памятью (ПДП). Эти этапы отображаются в модели соответствующим цветом. Как видно из временных диаграмм, вычислительный процесс, порождаемый задачей, начинается и заканчивается процессорной обработкой.

IV. Результаты экспериментов

С помощью модели были проведены исследования типовой подсистемы прямого доступа к памяти современного компьютера. Результаты представлены на рис. 7 - 8.

С использованием монитора Sysinfo были выполнены измерения характеристик вычислительных процессов, протекающих в системе, состоящей из центрального процессора, оперативной памяти и устройств ввода-вывода, а также в системе, поддерживающей режим прямого доступа в память. Результаты показали, что погрешности моделирования не превышают 15 - 20%, что вполне приемлемо для целей обучения.

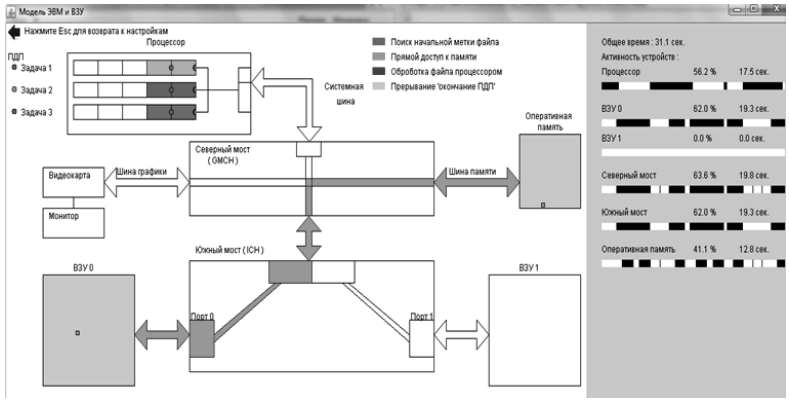


Рис. 6. Экранная форма моделирования прямого доступа к памяти

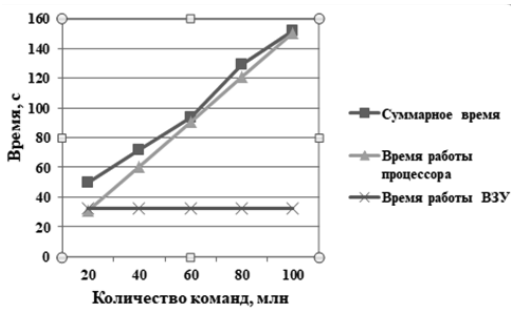


Рис. 7. Время занятости устройств в режиме прямого доступа к памяти при обслуживании трех программ

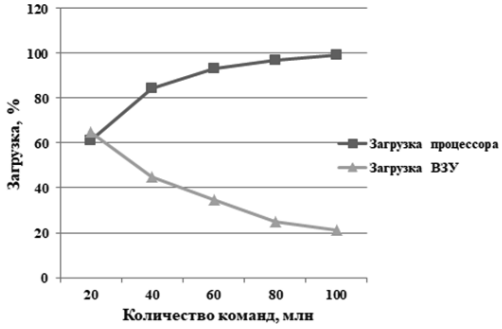


Рис. 8. Загрузка устройств в режиме прямого доступа к памяти при обслуживании трех программ

V. Заключение

В докладе описаны модели взаимодействия центральных устройств персонального компьютера и типового набора периферийных устройств: клавиатуры, монитора и ВЗУ. Модели имеют удобный пользовательский интерфейс, широко используют анимацию и предоставляют возможность детального изучения процессов ввода-вывода данных и прямого доступа в память. Они позволяют исследовать широкий диапазон процессов, порождаемых программами пользователей, и выявлять наиболее эффективные режимы работы компьютеров. Модели могут служить как для обучения студентов и магистрантов направлений, связанных с информатикой и вычислительной техникой, так и для исследовательских целей.

Список литературы

[1] Орлов С.А., Цилькер Б.Я. Организация ЭВМ и систем. - СПб: Питер, 2011. – 668 с.

[2] Орлов С.П., Ефимушкина Н.В. Организация вычислительных машин и систем. - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. - 280 с.

[3] Петров А.В. Моделирование процессов и систем. - СПб.: Лань, 2015. – 288 с.

[4] Efimushkina N.V., Orlov S.P. Simulation models for studying the multiprocessor systems//Proceedings of the Computer Modeling and Simulation, COMOD ‘2014. - St. Peterburg, 2014. - pp. 145 -149.

[5] Orlov S.P., Efimushkina N.V. Simulation models for parallel computing structures//Proceedings of the XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM’2016. Vol.1. - SPbGTU, 2016. - pp. 231-234.

[6] Orlov S.P., Efimushkina N.V. Simulation models of computer subsystems//Proceedings of the XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM ‘2017. - SPbGTU, 2017. - pp. 323 – 326.

Система автоматизированного управления обращением с отходами с использованием газоконтактных технологий

Зеленцов Д.В.
ФГБОУ ВО СамГТУ
г. Самара, Россия
dvzelentsov@mail.ru

Камальдинова З.Ф.
ФГБОУ ВО СамГТУ
г. Самара, Россия
kamal_zzz@mail.ru

Чертес К.Л.
ФГБОУ ВО СамГТУ
г. Самара, Россия
chertes2007@yandex.ru

***Abstract* —The implementation of projects for the system of supply and distribution of air in waste management has shown the need to create a mathematical model that would describe in general terms the behavior of gas flows during natural aeration and forced aeration in heterophase media, which are arrays of different nature. This model would be a necessary addition to chemical kinetics models describing the process of biodegradation of organic matter. One of the criteria for this process is temperature and time characteristics, its relationship with the degree of oxidation of organic matter, accumulation of organic carbon, carbon dioxide content, etc. Knowing the nature of temperature changes over time, it is possible in the first approximation to control the course of the process by adjusting the air supply, the intensity of mixing, the degree of moisture, the additional introduction of multifunctional additives, etc. The paper describes the automated waste management system using gas-contact technologies. Gas flow management requires consideration of a huge number of parameters, besides the ones listed above, as well as the creation of generalized criteria for assessing the state of the system. These parameters are classified into the following groups: mechanical (strength), water-filtration and air-filtration, temperature, as well as chemical and biological, and summarized in a multidimensional data file. However, not all of the parameters included in the listed groups are central to the creation of generalized criteria for the choice of technology. Therefore, the decision maker (DM) indicates which parameters are more important and which are not, that is, selects the levels (you can choose different ones each time depending on the situation). To make the right decision when assigning a level, there must be an adequate control algorithm. Based on this algorithm, the automated system should allow to process a large amount of data and suggest a solution. Then the automated control system already calculates the weights of each parameter and then the control action is automatically carried out.**

Ключевые слова — система управления, аэрация, гетерофазные отходы, газоконтактные технологии, биодеструкция, нефтесодержащие отходы

I. Введение

При обращении с гетерофазными отходами различного вида одним из способов обезвреживания являются технологии биотермического компостирования, которые отличаются различным набором методов интенсификации, направленных на сокращение продолжительности процесса, минимизации материальных затрат и экологических издержек. К существующим методам интенсификации относятся введение инокулирующих добавок [1, 2], повышение однородности смеси в стационарных смесителях [3], рециркуляцию компостов [4], низконапорную аэрацию [5] и т.д. Способы обработки нефтегрунтов и биодеструкции отходов нефтешламонакопителей описаны в работах [6, 7]. Эти способы сопряжены с процессами подачи и отведения газовых потоков для управления процессами, инициируемыми в массивах отходов. Современные методы обезвреживания с управляемыми газовыми потоками получили широкое распространение при обезвреживании шламовых отходов, нефтезагрязненных грунтов и т.д. [8]. Примером реализации технологии управления газовыми потоками [9, 10] выступают комплексы биотермической обработки нефтезагрязненных грунтов ОАО «Самаранефтегаз» на Михайловско-Коханском и Горбатовском месторождениях Самарской области [11], общий вид и схема которых представлены на рис. 1 и 2.

Рис. 1. Общий вид комплекса биотермической обработки ОАО «Самаранефтегаз»

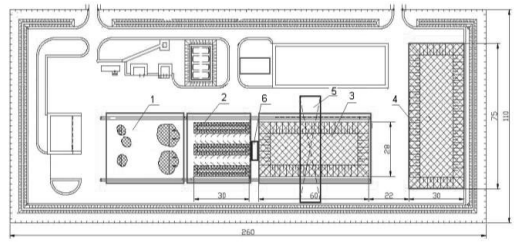


Рис. 2. Схема комплекса биотермической обработки: 1 – участок приготовления компостной смеси; 2 – зона непрерывной принудительной аэрации (штабели инокуляции); 3 – зона периодической принудительной аэрации (штабельно-кавальернойбиодеструкции); 4 – зона естественной аэрации без перемешивания (бурт дозревания); 5 – мостовой кран с грейферным ковшом; 6 - воздуходувные устройства

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

Реализация проектов системы и сооружений подачи и распределения воздуха в обращении с отходами показала необходимость создания математической модели, которая описывала бы в общем виде поведение газовых потоков при естественной аэрации и при принудительной аэрации в гетерофазных средах, которыми являются массивы отходов различной природы. Данная модель являлась бы необходимым дополнением к моделям химической кинетики, описывающим процесс биодеструкции органического вещества. Одним из критериев этого процесса выступает температурно-временная характеристика, ее взаимосвязь со степенью окисления органики, содержание органического углерода, содержание углекислоты и т.п. Зная характер изменения температур по времени, можно в первом приближении управлять ходом процесса, регулируя подачу воздуха, интенсивность перемешивания, степень увлажнения, дополнительное внесение многофункциональных добавок и т.д.

II. Результаты исследования газоконтактной технологии

В качестве объекта промышленных исследований был использован комплекс биотермической обработки ОАО «Самаранефтегаз» на Михайловско-Коханском месторождении [12]. Проведенные промышленные исследования показали, система управления газовыми потоками требует учета огромного количества параметров, а также создания обобщенных критериев оценки состояния системы. Данные параметры классифицированы в группы: механическую (прочностную), водофильтрационную и воздухофильтрационную, температурную, а также химическую и биологическую и сведены в многомерный массив данных. Однако, не все из параметров, входящих в перечисленные группы, являются главными для создания обобщенных критериев выбора технологии. Поэтому лицо, принимающее решение (ЛПР), должно указать наиболее значимые параметры, то есть выбрать уровни значимости каждого параметра.

Проведенные исследования показали, что наиболее значимыми параметрами являются температурно-временная характеристика (рис. 3), степень разложения нефтепродуктов (рис. 4), содержание углекислоты в газовой вытяжке.

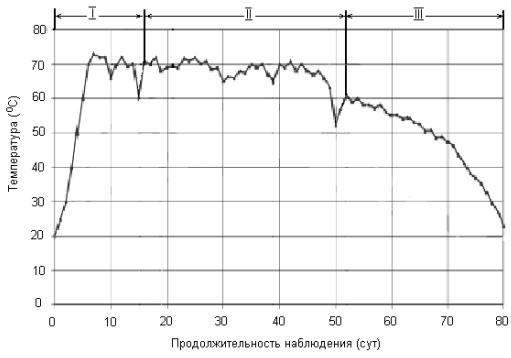


Рис. 3. Экспериментальный график температурно-временной характеристики: I – фаза быстрого роста температур; II – фаза высоких температур; III – фаза медленного падения температур

Из графика на рис. 3 видно, что процесс обработки отходов имеет три выраженные фазы, которым соответствуют три основные функциональные зоны: зона непрерывной принудительной аэрации (инокуляции), периодической принудительной аэрации (штабельно-кавальерной биодеструкции) и зона естественной аэрации без перемешивания (зона дозревания) (см. рис. 2). Основным элементом комплекса выступает система комбинированной аэрации (принудительной от воздуходувных устройств и естественной механической путем перемешивания) [12]. Каждой из этих функциональных зон соответствует свой режим работы оборудования. Для наиболее эффективного управления обращением с отходами необходимо соблюдать такой технологический режим работы, который позволит фактические параметры максимально приблизить к полученным при промышленном эксперименте (см. рис. 3 и 4).

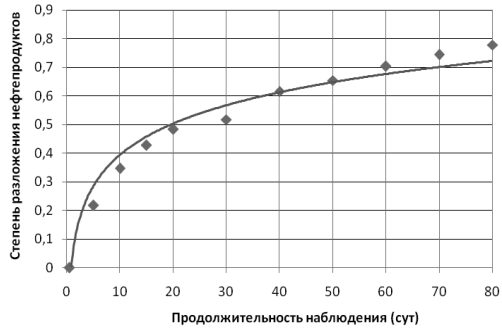


Рис. 4. Степень распада нефтепродуктов

Таким образом, для снижения человеческого фактора и автоматизации управления возникла необходимость в разработке программного комплекса, который на основе введенных параметров по степени их отклонения от оптимальных значений позволяет регулировать время работы воздуходувного и механического оборудования, этапы перемещения отходов из одной функциональной зоны в другую, время окончания процесса.

III. Разработка системы управления

Основной целью разработки программы являлась минимизация влияния человеческого фактора на процесс обработки нефтезагрязненных грунтов, а также упрощение ведения статистики. Посредством современных технологий можно своевременно и в доступной форме довести информацию до заинтересованных лиц (ЛПР). Для этого должен быть организован удобный и интуитивно понятный контроль пользовательской дисциплины и учет ключевых значений технологического процесса. Необходимым инструментом для достижения поставленных целей является разработанная программа, сконструированная в среде разработки VisualStudio при помощи языка программирования C# и платформы .Net.

Математическая модель обработки отходов выражается тремя зависимостями, описывающими три фазы процесса. Математические обозначения будут следующими: t – температура нефтесодержащих

отходов; γ – степень разложения нефтепродуктов, измеряемая в %, γ ∈[0, 100]; *c* – содержание углекислоты, также измеряемое в %, *c*∈[0, 10]; τ – время, которое будем измерять в сутках. Имея три фазы развития процесса, которыми необходимо управлять, получим:

1 - при 0≤τ≤15(30): $t(\tau) \rightarrow \max$, $\gamma(\tau) \rightarrow \max$, $c(\tau) \rightarrow \min$;

2 - при 15(30)≤τ≤50(100): $t=\text{const}$, $\gamma(\tau) \rightarrow \max$, $c(\tau) \rightarrow \min$;

3 - при 50(100)≤τ≤80(160): $t(\tau) \rightarrow \min$, $\gamma(\tau) \rightarrow \max$, $c(\tau) \rightarrow \min$.

Основной задачей управления является минимизация затрачиваемого на процесс обработки объема отходов времени при соблюдении требований к качеству выходящей продукции, в результате чего происходит снижение эксплуатационных затрат. Это достигается при помощи управления подачей кислорода в массив отходов путем регулирования временем работы воздуходувок и механического перемешивающего оборудования, таким образом, осуществляя управляющее воздействие на процесс биодеструкции.

Основные технические требования для программы следующие [13]: учет контроля пользователей — для каждого пользователя создается отдельная учетная запись с правами доступа, зависимыми от должности и обязанностей пользователя; разработка алгоритма оптимальных действий — система на основе статистических данных вырабатывает алгоритм оптимальных действий для завершения технологических процессов с максимальной эффективностью; резервирование — в соответствии с требованием федерального закона о защите данных производится автоматическое резервирование с возможностью восстановления данных (рис. 5). Программа обеспечивает реализацию данных основных функций [14].

Перед каждым пользователем во время рабочего процесса возникают те или иные задачи. В связи с этим в главной форме присутствует блок, функционал которого направлен на работу с задачами. В данном блоке реализованы возможности добавления, изменения и удаления задачи. Сами задачи, в свою очередь, выводятся в отдельное окно, расположенное рядом. Так как необходим постоянный контроль над ситуацией, было принято решение разработать систему оповещений, способствующую своевременному выполнению тех или иных задач. Каждое подобное действие регистрируется в журнале событий. Помимо наименования действия в журнал также заносятся дата и время регистрации события, а также описание события. В программе реализован доступ к просмотру событий в журнале. Так, например, процедура изменения имени отдельного пользователя приведет к созданию соответствующей записи в журнале событий. Также важная функция журнала событий — контроль пользовательской дисциплины. Для наглядности была рассмотрена конкретная ситуация — у пользователя запланировано событие (задача). В момент наступления события на панели задач появляется уведомление с описанием, напоминающее пользователю о необходимости произвести те или иные действия. В момент появления уведомления происходит запись о наступлении события в журнал событий. Далее, пользователю необходимо принять уведомление, и выполнить действия, указанные в нем. Данная операция также будет внесена в журнал. Следствием этого процесса будут являться две записи в журнале — время появления оповещения и время принятия оповещения.

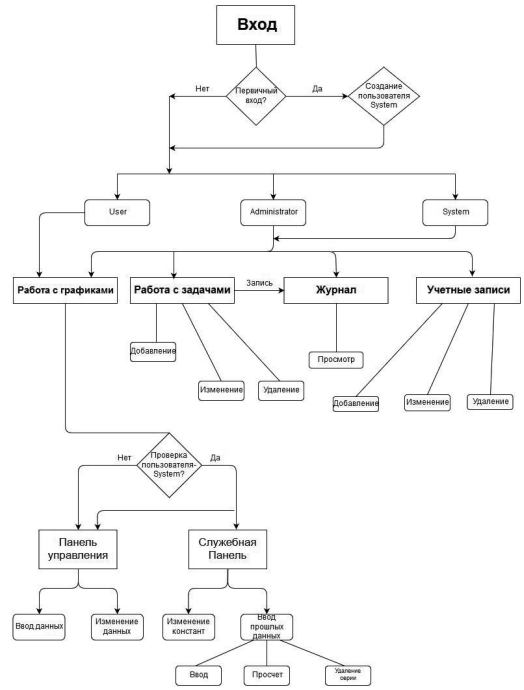


Рис. 5. Схема бизнес-процессов программы

Основным элементом главной формы является диаграмма. На данной диаграмме происходит поточечное построение трех графиков-зависимостей: первый график представляет собой температурно-временную характеристику (рис. 6), второй график демонстрирует степень распада нефтепродуктов, на третьем графике показано изменение содержания углекислоты. Работа с данными на диаграмме происходит при помощи отдельного окна, включающего в себя три кнопки: «Ввод данных» служит для ввода координат точки, которая будет отражаться на графике, также реализована возможность одновременного ввода нескольких серий точек; кнопка «Просчитать» необходима при наличии нескольких серий точек, при нажатии этой кнопки происходит вычисление среднестатистических координат из нескольких имеющихся серий точек и построение результирующей серии; кнопка «Удалить серию» применима в том случае, если необходимо освободить диаграмму от какой-либо серии точек. Основной задачей на данном этапе является обеспечение такого регулирования процессом, при котором будут достигаться оптимальные значения температур, степени распада нефтепродуктов, продолжительности этапов (графики регулирования (рис. 6)) будут близки к экспериментальным значениям (см. рис. 3).

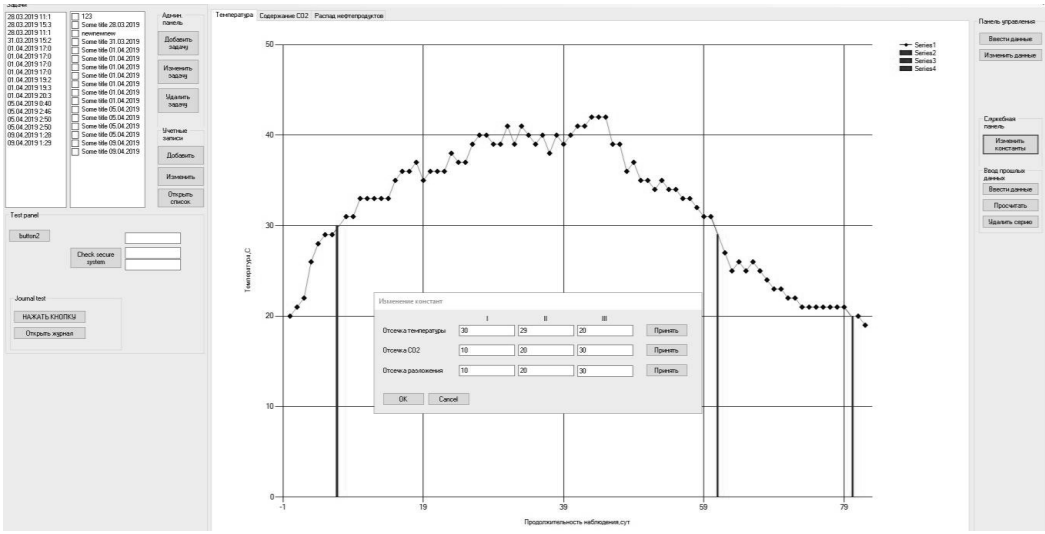


Рис. 6. Главная форма с программным графиком температурно-временной характеристики

Автоматическое резервирование — наиболее эффективный способ защиты данных. Преимущество автоматического резервирования заключается в отсутствии необходимости для пользователя вмешиваться в процесс работы программы автоматического резервного копирования. Таким образом, исключается вероятность случайного повреждения или утраты данных. Резервирование происходит по заранее заданному расписанию. Возможно резервирование как на отдельное место жесткого диска, так и в облачное хранилище данных.

IV. Заключение

Эксплуатация комплексов биотермической обработки нефтезагрязненных грунтов показала перспективность технологии управления газовыми потоками при естественной и принудительной аэрации в гетерофазных средах, которыми являются массивы отходов различной природы. [11, 12]. Для упрощения задачи управления газовыми потоками был разработан программный комплекс, способный обеспечить оптимальное регулирование процесса биотермической обработки нефтезагрязненных грунтов, осуществляя при этом контроль пользовательской дисциплины, хранение информации о важных программных и аппаратных событиях, резервирование данных. Это позволяет также со временем набрать большой объем данных, на основании которого возможно проведение статистического анализа и прогнозирование, что в дальнейшем позволит увеличить уровень автоматизации управления процессом обращения с отходами.

Список литературы

[1] Коронелли Т.В. Микробиологическая деградация углеводородов и ее экологические последствия // Биологические науки. 1982. №3. С. 120.

[2] Willson G. Forced aeration composting // Water Sci. and Technol. 1989. № 1. Vol. 15. - p. 169 – 180.

[3] Туровский И.С. Биотермическая обработка осадков сточных вод / И.С. Туровский, Т.Е. Букреева, А.В. Астахова. - М.: ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1989. 60 с.

[4] Lehtokary M. Composting of dewatered sewage sludge in a horizontal aerated bed reactor using compost recycle for moisture control // Sludge Treatment and Disposal Problems and Options, Munich, May 22 – 25. 1994. - p. 158 – 164.

[5] Epstein E.D. A forced aeration systems for composting wastewater sludge // J. WPCF. 1996. № 4. - p. 688 – 694.

[6] Тараканов Д.И. Технология обработки нефтезагрязнённых грунтов и осадков сточных вод с целью их использования в качестве изолирующих материалов на полигонах захоронения твёрдых бытовых отходов: дис. … канд. техн. наук: 05.23.04, 03.00.16 / Д.И. Тараканов. - Самара, 2001. - 178 с.

[7] Ермаков В.В. Классификация нефтешламонакопителей и прогнозирование процесса биодеструкции отходов при их ликвидации: дис. … канд. тех. наук: 03.00.16 / В.В. Ермаков. - Самара, 2010. - 132 с.

[8] Haug R.T. Sludge composting: a discussion of engineering principle / R.T. Haug, L.A. Haug // Compost Science Journal of Waste Recycling. 2001. Vol. 26.T6. - p. 6–1.

[9] Han Zhangliang, Sun Dezhi, Wang Hui. Effects of ambient temperature and aeration frequency on emissions of ammonia and greenhouse gases from a sewage sludge aerobic composting plant // Bioresource technology. Vol. 270. - p. 457-466.

[10] Zelentsov D.V., Chertes K.L., Tupitsyna O.V. Theoretical basis and experimental study of the aeration characteristics of the composting mixtures during the design and construction of the aeration system of the oily waste biodegradation complex // Procedia Engineering. 2016. T. 153. C. 903-908.DOI:10.1016/j.proeng.2016.08.223.

[11] Зеленцов Д.В. Комплекс биодеструкции нефтеотходов / Д.В. Зеленцов, К.Л. Чертес, Д.Е. Быков, О.В. Тупицына, Н.Г. Гладышев // Экология и промышленность России. 2011. № 3. - с. 33-34.

[12] Зеленцов Д.В., Тупицына О.В., Чертес К.Л., Пыстин В.Н. Обработка осадков нефтесодержащих сточных вод с применением принудительной высоконапорной аэрации // Градостроительство и архитектура. 2012. № 3 (7). - с. 72-74.

[13] Камальдинова З.Ф., Затеева О.А. Методика количественно-качественной оценки тестопригодности программных систем на ранних этапах разработки // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2018. №4 - с.134-142.

[14] Boswell D., Foucher T. The Art of Readable Code. O'Reilly Media. 2011. – p. 204.

Сравнение моделей положительно определенных случайных величин с помощью диаграмм рассеяния

Ивлева А.И.
Институт проблем управления сложными системами РАН
Самара, Россия
annushka199@bk.ru

Смирнов С.В.
Институт проблем управления сложными системами РАН
Самара, Россия
smirnov@iccs.ru

***Abstract* — The present study compares the following models of positively defined random variables from a class of probability distributions with a coefficient of variation greater than 1: lognormal, gamma distributions, distribution of Weibull-Gnedenko, hyperexponential distribution of a special kind. The latter has physical visibility, commonality and simplicity. It is well studied and often used to simplify the modeling of various complex systems.**

To investigate the properties of the distributions of random variables, scattering diagrams (approach by V. I. Khimenko) are applied, which are simple and illustrative tools. The statistical criteria considered in this paper are clear and understandable for engineers. They reflect such important characteristics of the random flow as the correlation of events, the number and probability of exceeding a given level of values.

In general, the analysis allows to conclude that the modeling of a positively defined random variable by a two-parameter hyperexponential distribution of a special kind is possible. According to the results obtained, the difference between hyperexponential and the other distributions considered depends on the variation coefficient. With its increase, the properties of approximation by hyperexponential distribution deteriorate. Characteristic differences between scattering diagrams for hyperexponential distribution and for other distributions are analyzed. These are: different value ranges and different degree of the random variables concentration in the area of small values. The identified features will help to develop criteria that will enable to choose the model of the observed values of the random variable and identify the risk degree of using hyperexponential distribution associated with the need to take into account rare but significant deviations.

Ключевые слова — случайная величина, гиперэкспоненциальное распределение, случайные потоки, диаграммы рассеяния, статистический анализ

I. Введение

При моделировании сложных систем нередко возникает необходимость описывать влияющие на ее поведение случайные факторы. Например, моделирование поведения согласно парадигме «состояния – переходы между состояниями» может предполагать описание случайных величин (СВ) времени пребывания в различных состояниях. При этом важно совместить *конструктивность* моделей СВ (аналитическую или численно-аналитическую разрешимость, присущую, например, марковским моделям систем) и их *адекватность* («похожесть» моделей СВ на экспериментально наблюдаемые прототипы). В этом плане актуально сравнить различные модели *положительно определенных* СВ (ПСВ) по качественным и количественным критериям.

Одним из кандидатов для аппроксимации эмпирических законов распределения ПСВ служит *гиперэрланговская* функция распределения [1]. Типичным толкованием гиперэрланговской ПСВ является время пребывания системы в последовательно-параллельно связанных состояниях, время пребывания в каждом из которых распределено по *экспоненциальному* закону; поскольку такой закон обеспечивает свойство отсутствия последействия, смена состояний такой системы будет марковским процессом. Это, в частности, объясняет предпочтительность использования гиперэрланговской модели для описании процесса поведения системы с дискретными состояниями со случайным временем пребывания в каждом из них.

При идентификации модели ПСВ с помощью *метода моментов* [2], когда у моделируемого и моделирующего распределения совпадают *средние* и *дисперсии* (не нулевые), гиперэрланговское семейство представляют всего лишь *четыре* распределения: пара *гипоэкспоненциальных* распределений - Эрланга, и обобщенное Эрланга [3], - собственно *экспоненциальное* распределение и *гиперэкспоненциальное* распределение специального *двухпараметрического* вида *HS* [4]. Последнее малоизвестно, поэтому актуально исследование его потенциала и особенностей.

Следует отметить, что гиперэкспоненциальное распределение общего вида достаточно хорошо изучено [5-7] и по ряду причин все чаще применяется при моделировании различного рода сложных систем [8-10]. В [11] приведены некоторые аналитические оценки сравнения *HS*-распределения с другими известными моделями ПСВ.

В данной работе приведены результаты сравнительного исследования свойств гиперэкспоненциального распределения *HS* с помощью статистического метода *диаграмм рассеяния* [12].

II. Постановка задачи

Пусть X - наблюдаемая ПСВ с двумя эмпирически установленными числовыми характеристиками - средним $E^*(X)$ и дисперсией $D^{2*}(X)$, причем эмпирический коэффициент вариации $V^*(X) = D^*(X)/E^*(X) > 1$. Необходимо построить и сравнить диаграммы рассеяния различных двухпараметрических аппроксимаций распределения величины X, которые могут быть получены на основе метода моментов:

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

гамма-распределения $\gamma(\alpha, \beta)$, *распределения Вейбулла-Гнеденко* $W(\alpha, \beta)$, *логарифмически нормального распределения* $LN(\mu, \sigma)$, и *гиперэкспоненциального распределения специального вида* $HS(p, \lambda)$ (обозначения аппроксимирующих распределений, смысл и обозначения их параметров см. в [13] и [4]).

III. Анализ диаграмм рассеяния

Для решения поставленной задачи был выполнен вычислительный статистический эксперимент, включающий генерацию и анализ *альтернирующего* стационарного однородного потока случайных событий, образованного чередующимися рекуррентными реализациями случайных величин, распределенных по законам γ, W, LN и HS.

Рассмотрим точечный процесс $\{t_i\}$, $i = 1, 2, \ldots$. Считаем, что наблюдению доступна случайная последовательность:

$$\tau_1, \tau_1^*, \tau_2, \tau_2^*, \ldots, \tau_m, \tau_m^*, \qquad (1)$$

состоящая из m пар временных интервалов τ_i и τ_i^*, $i = 1, 2, \ldots, m$ [12]. Если значения τ_i и τ_i^* интерпретировать как координаты точки ζ_i на фазовой плоскости (τ_i, τ_i^*), то реализацию (1) можно представить на этой плоскости в виде *диаграммы рассеяния*.

Примеры диаграмм рассеивания для альтернирующих процессов, основанных на различных парах рассматриваемых распределений со средним $E^*(X) = 1$, коэффициентом вариации $V^*(X) = 3$ и $m = 2000$ приведены на рис. 1-6.

О статистической близости моделей случайной величины X можно судить по *симметричности* диаграмм рассеяния. Данный критерий в определенной мере является субъективным, но в то же время наглядным и интуитивно понятным для инженера [12].

Наиболее симметричной (близкой по *диапазону* значений координат и по *форме рассеяния* точек ζ_i) является диаграмма пары «γ-W» (рис. 1). Несколько менее симметричны диаграммы пар «γ-LN» (рис. 2) и «W-LN» (рис. 3). Диаграммы на рис. 4-6, иллюстрирующие альтернирующие точечные процессы «*-HS», выделяются *асимметрией*. Она обусловлена, прежде всего, разницей *диапазонов* значений случайной величины (γ-, W- и LN-распределений этот диапазон примерно на порядок больше, чем для HS-распределения). Кроме того, реализации случайной величины, подчиненной HS-распределению, менее плотно заполняют окрестность малых значений. Причем экспериментально обнаруживается *рост* степени асимметрии в указанных смыслах с *увеличением коэффициента вариации* моделируемой случайной величины $V^*(X)$.

Эту особенность можно оценить объективно, исследуя с помощью диаграмм рассеяния «однородные» точечные процессы, которые в использованных обозначениях можно было бы обозначить как «γ-γ», «W-W», «LN-LN», «HS-HS». При этом индикатором визуально обнаруживаемых на диаграммах рис. 1-6 различий сравниваемых распределений служит характеристика *среднего числа точек*, попадающих в область Ω (полубесконечную полосу шириной H) на фазовой плоскости (τ_i, τ_{i+1}) [14]:

$$N(\Omega, m) = (m - 1)\cdot P(\zeta_i \in \Omega) = (m - 1)\cdot P(\tau_i < H), \quad (2)$$

где H - пороговый уровень в диапазоне изменений временных интервалов $\tau_1, \tau_2, \ldots, \tau_m$ между последовательными событиями рассматриваемого точечного процесса.

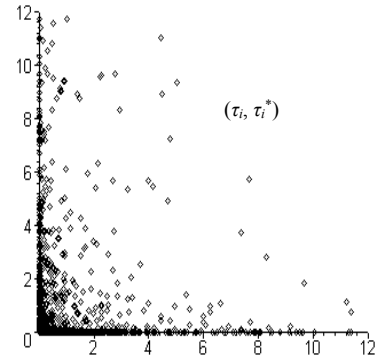


Рис. 1. Диаграмма рассеяния точечного процесса «γ-W»

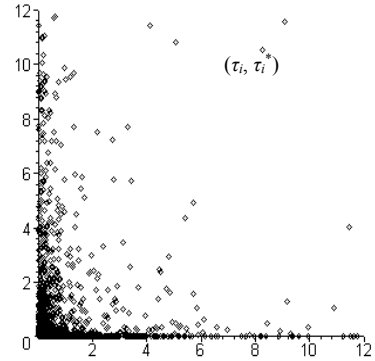


Рис. 2. Диаграмма рассеяния точечного процесса «γ-LN»

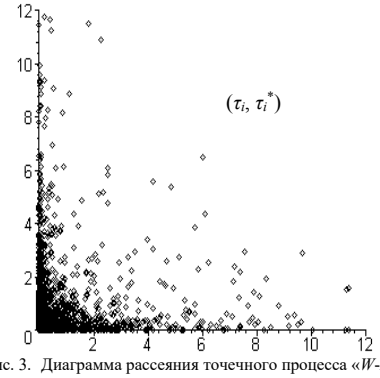


Рис. 3. Диаграмма рассеяния точечного процесса «W-LN»

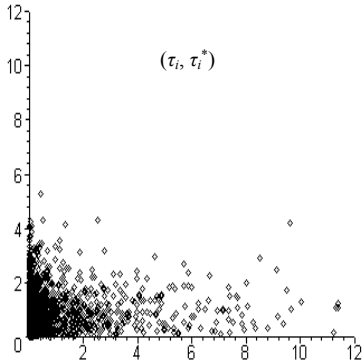


Рис. 4. Диаграмма рассеяния точечного процесса «*W-HS*»

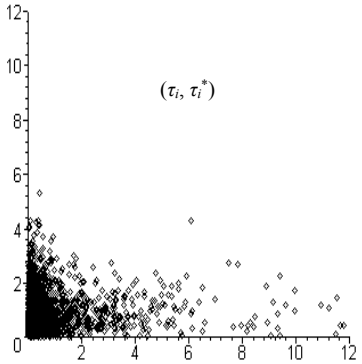


Рис. 5. Диаграмма рассеяния точечного процесса «*LN-HS*»

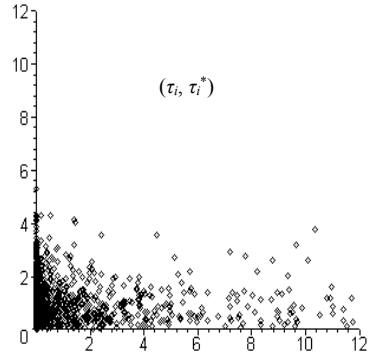


Рис. 6. Диаграмма рассеяния точечного процесса «*γ-HS*»

На рис. 7-9 приведены зависимости *числа точек*, которые попали в указанную область Ω в ходе численного эксперимента от порогового уровня H, для рассматриваемой группы распределений при $m = 2000$, $E^*(X) = 1$ и $V^*(X) = \{1{,}5; 3{,}0; 9{,}0\}$ соответственно.

С помощью зависимостей на рис. 7-9, являющихся статистическими эквивалентами функций распределения, можно оценить степень сгруппированности точек на диаграммах рассеяния рис. 1-6 в области малых и больших значений реализаций интервалов времени между событиями в исследованных альтернирующих точечных процессах.

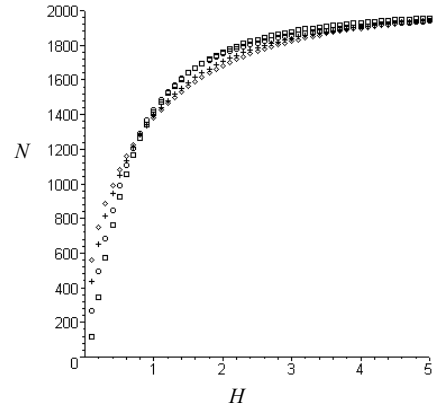


Рис. 7. Зависимость среднего числа точек в области Ω от значения уровня H при $E^*(X) = 1$ и $V^*(X) = 1{,}5$ для *γ*-, *W*-, *LN*- и *HS*-распределений (фигуры ◇, +, □ и ○ соответственно)

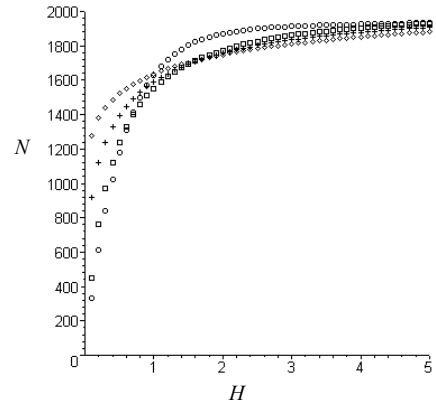


Рис. 8. Зависимость среднего числа точек в области Ω от значения уровня H при $E^*(X) = 1$ и $V^*(X) = 3{,}0$ для *γ*-, *W*-, *LN*- и *HS*-распределений (фигуры ◇, +, □ и ○ соответственно)

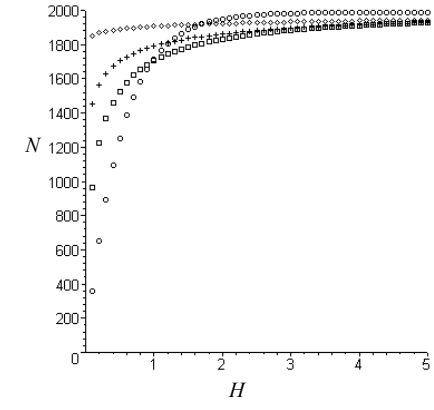


Рис. 9. Зависимость среднего числа точек в области Ω от значения уровня H_x при $E^*(X) = 1$ и $V^*(X) = 9{,}0$ для *γ*-, *W*-, *LN*- и *HS*-распределений (фигуры ◇, +, □ и ○ соответственно)

Констатируем, что:

- с увеличением коэффициента вариации вероятность появления редких больших и частых малых значений случайной величины с *HS*-распределением *становится меньше*, чем для других распределений;
- степень проявления указанной выше особенности для рассматриваемых распределений различна и убывает в порядке «*γ-W-LN-HS*».

IV. Заключение

Проведенный анализ подтверждает вывод работы [4], что гиперэкспоненциальное *HS*-распределение специального вида может успешно конкурировать с широко известными двухпараметрическими законами распределения вероятностей, пригодными для аппроксимации эмпирических распределений ПСВ на основе метода моментов, когда у моделируемого и моделирующего распределения совпадают средние и дисперсии, а эмпирический коэффициент вариации превышает единицу.

При прочих равных условиях *HS*-распределение отличается от конкурирующих распределений рядом свойств, которые в зависимости от решаемой задачи могут быть признаны более или менее существенными, определяя выбор аппроксимирующего закона распределения эмпирической ПСВ:

- отсутствие редких больших и частых малых значений случайной величины;
- относительно меньшая вариативность значений случайной величины в области ее существования.

При этом *HS*-распределение обладает наглядностью и интуитивно понятным физическим толкованием, общностью и простотой.

Полученные результаты согласуются с [11], где в качестве количественных оценок близости распределения *HS* к конкурирующим моделям рассматривались равномерная и средняя метрики в пространстве функций распределения.

Инструмент проведенного сравнительного исследований - *диаграммы рассеяния* - планируется включить в разрабатываемую авторами *систему поддержки принятия решений* при выборе вероятностного распределения положительно определенной случайной величины. Эта система, в свою очередь, станет основой для автоматизированной информационно-аналитической системы расчета характеристик надежности, рисков и экономической эффективности различного рода сложных отраслевых систем и позволит перейти на новый уровень цифрового стохастического моделирования.

Список литературы

[1] Калашников В.В., Рачев С.Т. Математические методы построения стохастических моделей обслуживания – М.: Наука, 1988. - 312 с.

[2] Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. / 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Academia, 2003. - 459 с.

[3] Тараканов К.В., Овчаров Л.А., Тырышкин А.Н. Аналитические методы исследования систем. – М.: Советское радио, 1974. – 240 с.

[4] Смирнов С.В. Моделирование «сверхнерегулярных» случайных величин по экспериментальным данным. // Автоматизация научных исследований: Межвуз. сб. научн. трудов. - Куйбышев: КуАИ, 1988. - С. 52–57.

[5] Nassar M.M. A note on some characterizations of the hyperexponential distribution // Statistical Papers. – 2005. - No. 46. - P. 281-292.

[6] Bladt M., Nielsen B.F. Matrix-Exponential Distributions in Applied Probability (Probability Theory and Stochastic Modelling 81) – Springer, Science+Business Media LLC, 2017. - 749 p.

[7] Baltzer J.C. Approximating probability densities on the positive half-line // Queueing Systems. – 1989. - No. 4/ - P. 115-136.

[8] Tarasov V.N. Analysis of Queues with Hyperexponential Arrival Distributions // Problems of Information Transmission. – 2016. - Vol. 52, no. 1. - P. 16–26.

[9] Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Ахметшина Э.Г. Модели телетрафика на основе современной теории массового обслуживания // Инфокоммуникационные технологии. - 2018. – Т. 16, №1. - С. 68–74.

[10] Рыжиков Ю.И., Уланов А. В. Применение гипер-экспоненциальной аппроксимации в задачах расчета немарковских систем массового обслуживания // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. - 2016. - №3. - С. 60-65.

[11] Коваленко А.И., Смирнов С.В.Сравнение гиперэкспоненциального распределения с другими моделями положительно определенных случайных величин // Инфокоммуникационные технологии. - Самара, 2019. Том 17, № 1. - С. 9–16.

[12] Химченко В.И. Диаграммы рассеяния в анализе случайных потоков событий // Информационно-управляющие системы. - 2016. - №83(4). - С. 85–93.

[13] Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.

[14] Химченко В.И. Случайные данные: структура и анализ. - М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018.- 424 с.

Анализ устойчивости многосвязной системы управления при структурных изменениях

Ильясов Б.Г.
Уфимский государственный авиационный технический университет
Уфа, Россия
ilyasov@tc.ugatu.ac.ru

Саитова Г.А.
Уфимский государственный авиационный технический университет
Уфа, Россия
saitova@bk.ru

***Abstract* — An assessment of the stability of multivariable automatic control systems with random or targeted changes in the structure of the system is proposed. An approach is used based on the method of decomposing the system into separate subsystems and characteristics of the connections between them. The criteria for the structural stability of a multiply connected system with holonomic connections between subsystems are given.**

Ключевые слова — многосвязные системы, устойчивость, частотные методы, структурные изменения

I. Введение

В процессе проектирования многосвязных систем автоматического управления (МСАУ) сложными динамическими объектами (СДО) одной из основных задач является обеспечение устойчивости и желаемого качества функционирования системы на всех режимах ее работы как в сепаратных подсистемах, так и в системе в целом. В целях обеспечения устойчивости МСАУ, улучшения динамических свойств системы на всех режимах ее работы, повышения запасов устойчивости, стабилизации на критических режимах функционирования при возможных отказах актуальным является проектирование систем управления СДО в классе систем с целенаправленным изменением структуры регулятора, а также с использованием дополнительных корректирующих и стабилизирующих связей между отдельными ее каналами, образующих многомерный регулятор.

Анализ и обеспечение устойчивости многосвязной системы управления при структурных изменениях представляет собой большой практический интерес. Вызвано это, в первую очередь, тем, что практически в любой работающей многосвязной системе автоматического регулирования могут возникать структурные нарушения, например, в следующих ситуациях [1]:

- отказы элементов системы - прежде всего в каналах передачи измерительных и управляющих сигналов между объектом регулирования и регулятором;
- перевод отдельных переменных системы на «ручное управление» операторами по тем или иным производственным причинам, который должен обеспечиваться в системе;
- изменение программы управления многомерным объектом, в результате чего изменяется оператор, коэффициент передачи и знак воздействия между регулирующим органом и регулируемой координатой.
- выход переменных системы за допустимые пределы рабочих диапазонов, что равносильно разрыву связи, и другие.

В этих случаях необходимо либо компенсировать возможные отказы как в сепаратных каналах, так и в связях между ними, приводящие к дестабилизации всей МСАУ, либо деструктурировать управляющую часть системы.

Многие отказы в принципе не могут быть компенсированы параметрическими изменениями управляющей части локальных регуляторов. Для их компенсации требуются, как правило, структурные преобразования в регуляторе МСАУ, в том числе и путем изменения связей между подсистемами через многомерный регулятор.

В промышленности имеется довольно значительный класс объектов, в которых уже заложена возможность целенаправленного динамического изменения структуры. Поэтому в современной теории автоматического управления одно из направлений связано с созданием систем управления с переменной структурой. Проектирование такого класса систем управления многосвязными объектами с целенаправленно изменяемой структурой позволит повысить эффективность функционирования сложных технических систем [2-4]. Вследствие этого исследование устойчивости МСАУ с изменяемой структурой является актуальным.

II. Постановка задачи

Рассмотрим МСАУ *n*-ой размерности, в которой передаточная функция регулятора и объекта управления описываются в форме матричных передаточных функций (МПФ) размерности *n* x *n*:

$$R(s) = \left\| R_{ij}(s) \right\|_{n \times n},\ W(s) = \left\| W_{ij}(s) \right\|_{n \times n}.$$

Структурная схема МСАУ с многомерным регулятором и объектом представлена на рисунке 1.

Работа поддержана грантами РФФИ №18-08-00702 А, 17-48-020956 р_а.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

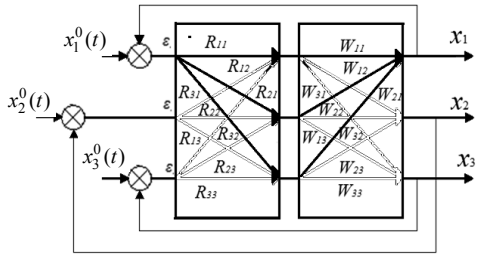


Рис. 1. Структурная схема трехсвязной САУ

Задачу определения устойчивости многосвязных систем автоматического управления с изменяемой структурой, вследствие разрыва связей или целенаправленного изменения структуры регулятора или объекта, предлагается решать при помощи частотных критериев устойчивости, описанных в [5-9]. Данные критерии устойчивости основаны на системном описании МСАУ на уровне сепаратных подсистем и многомерных элементов связи между ними [7]. Критерии рассчитаны на МСАУ с перекрестными связями либо в объекте, либо в регуляторе. В качестве индивидуальных характеристик $\Phi_i(s)$ сепаратной подсистемы МСАУ рассматривается ее индивидуальная передаточная функция в режиме управления. В качестве характеристик связей $h_{2\ldots k}(s)$, k=2,3,…,n, сепаратных подсистем рассматриваются функции, отражающие реально существующие взаимоотношения между подсистемами [5-7]. Но прежде, чем использовать данные критерии их нужно обобщить на МСАУ с перекрестными связями как в многомерном объекте, так и в многомерном регуляторе.

Рассмотрим следующую задачу.

Пусть задана МСАУ с перекрестными связями через многосвязной объект управления (ОУ). Требуется ввести в многосвязные регуляторы такие связи между подсистемы, чтобы МСАУ в целом оставалась структурно устойчивой.

III. Анализ структурной устойчивости МСАУ с двукратными связями

Рассмотрим устойчивость многосвязной системы автоматического управления с голономными связями в объекте управления для МСАУ, состоящих из нескольких сепаратных подсистем с перекрёстными связями как в объекте управления, так и в регуляторе.

Для данного класса МС индивидуальная характеристика подсистем имеет вид:

$$\Phi_i(s)=\frac{X_i(s)}{X_i^o(s)}=\frac{\sum\limits_{j=1,i=1}^{n} R_{ji}(s)W_{ij}(s)}{1+\sum\limits_{j=1,i=1}^{n} R_{ji}(s)W_{ij}(s)},\ i=\overline{1,n}, \quad (1)$$

а $W^*(s)=\left\|W_{ij}(s)\right\|_{n\times n}\times\left\|R_{ij}(s)\right\|_{n\times n}$ - матричная передаточная функция (МПФ), учитывающая перекрестные связи как в регуляторе, так и в объекте.

Видим, что кроме прямых каналов в подсистеме появляются дополнительные (параллельные) связи, увеличивающие количество контуров. Например, в трехсвязной системе (рис. 1) показано, что в первой подсистеме получается три замкнутых контура. Тоже самое и в других подсистемах.

Передаточные функции разомкнутых подсистем трехсвязной САУ имеют вид:

$$\begin{aligned} W_{11}^* &= R_{11}W_{11}+R_{21}W_{12}+R_{31}W_{13},\\ W_{22}^* &= R_{12}W_{21}+R_{22}W_{22}+R_{32}W_{23},\\ W_{33}^* &= R_{13}W_{31}+R_{23}W_{32}+R_{33}W_{33}. \end{aligned} \quad (2)$$

При проектировании МСАУ СДО часто используются алгоритмы управления, предусматривающие как параметрические, так и структурные преобразования системы. Существуют системы, например, при функционированb которых на всех режимах преимущественно изменяются индивидуальные характеристики подсистем [11-13]. Управление в таких системах часто проводится за счет параметрических или структурных преобразований регуляторов сепаратных подсистем R_i(s) (рис. 2).

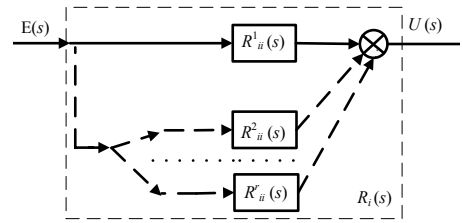


Рис. 2. Структурная схема перестраиваемого регулятора сепаратной подсистемы

Структура изменяемой части регулятора сепаратных подсистем определяется из множества элементов $R_{ii}(s)=\left\{R_{ii}^1(s),\ldots,R_{ii}^r(s)\right\}$, удовлетворяющих условию полной управляемости.

Исходя из того, что характеристическое уравнение многосвязной системы (МС) идентичных подсистем со связями как через многомерный объект управления, так и многомерный регулятор описывается уравнением

$$D(h,\Phi)=1+h_2\Phi^2+\ldots+h_n\Phi^n=0, \quad (3)$$

можно дать следующий критерий структурной устойчивости.

***Критерий* 1.** Если для уравнения (3) выполняется условие статической устойчивости

$$1+\sum_{i=1}^{n}h_i>0, \quad (4)$$

то МСАУ будет структурно устойчива, если будет структурно устойчива каждая подсистема

***Пример* 1.** Если заданная трехсвязная система (рис.3.) при $R_{i0}(s)=\dfrac{k}{s(T_1 s+1)}$, $W_{i0}(s)=\dfrac{k}{(T_2 s+1)}$, $i=\overline{1,3}$

$$R=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ -1 & 1 & 0\\ -0.5 & 0 & 1\end{bmatrix},\ W=\begin{bmatrix}1 & 0.4 & 0.5\\ 0.5 & 1 & 0.4\\ 0.4 & 0.4 & 1\end{bmatrix},$$

где k=1, $T_1=0.1$, $T_2=0.6$ устойчива, то при изменении $R_{10}(s)=\dfrac{k}{s^2(T_1 s+1)}$ становится структурно неустойчивой (рис.4).

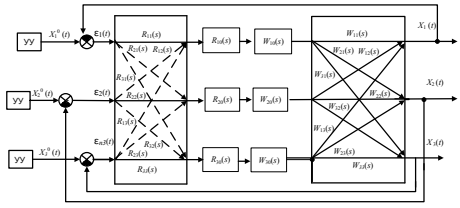


Рис. 3. Структурная схема трехсвязной САУ

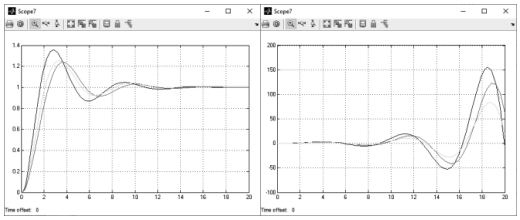


Рис. 4. Рис. 4. Переходные процессы до и после изменения структуры первой подсистемы

Таким образом, первая подсистема стала структурно неустойчивой и изменением параметров других подсистем нельзя сделать устойчивой систему в целом.

Критерий 2. Для структурной устойчивости МСАУ состоящей из множества двукратно взаимосвязанных подсистем, необходимо, чтобы положительная сумма оператора прямого канала подсистемы и операторов, образованных параллельно через другие подсистемы, была охвачена общей единичной отрицательной обратной связью, то есть

$$W_{ii}^{*}(s)=\sum_{j=1,i=1}^{n} R_{ji}(s)W_{ij}(s)>0,\quad i=\overline{1,n}, \qquad (5)$$

должен быть охвачен единичной отрицательной обратной связью.

***Пример* 2**. Рассмотрим трехсвязную систему (рис.3) из примера 1. Система устойчива. Значит согласно критерию 2 выражения (5) должны быть положительными. Так как $R_{i0}(s)$, $W_{i0}(s)$, $i=\overline{1,3}$ в нашем случае одинаковые, то рассмотрим только коэффициенты подсистем.

$$W_{11}^{*}=1-0.4-0.25=0.35,$$
$$W_{22}^{*}=0+1+0=1,$$
$$W_{33}^{*}=0+0+1=1.$$

Условие (5) выполняется. Система устойчива.

Возьмем матричную передаточную функцию многомерного регулятора равной:

$$R=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ -2 & 1 & 0\\ -1.5 & 0 & 1\end{bmatrix},\ \text{тогда}$$

$$W_{11}^{*}=1-0.8-0.75=-0.55,$$
$$W_{22}^{*}=0+1+0=1,$$
$$W_{33}^{*}=0+0+1=1,$$

и в первой подсистеме получается положительная обратная связь. Система неустойчива (рис.5.).

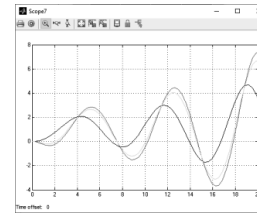


Рис. 5. Переходные процессы после изменения параметров первой подсистемы (пример 2)

В этом примере нарушено условие структурной устойчивости, т.к. параллельные связи через другие подсистемы оказывают более сильные воздействия, чем воздействия через подсистему. Если эти воздействия будут слабее, то система будет структурно устойчива, т.е. структура подсистемы не разрушается и соблюдается критерий 1

***Критерий* 3.** МСАУ структурно неустойчива, если нарушается ее условие статической устойчивости (4).

В этом случае структурная устойчивость многосвязной системы может быть нарушена за счет формирования голономных связей между подсистемами, определяемые режимом работы объекта управления Такую систему нельзя сделать устойчивой за счет формирования параметров и структуры подсистем. В нашем представлении это и есть нарушение условия устойчивости МСАУ [6]. Однако ее можно сделать устойчивой путем формирования связей через многомерный регулятор.

***Пример* 3.** Предположим, что в примере 1 МПФ многомерного объекта и регулятора равны

$$W=\begin{bmatrix}1 & 0.8 & 0.5\\ 1.2 & 1 & 0.4\\ 1.2 & 0.4 & 1\end{bmatrix},\ R=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}.$$

Характеристическое уравнение для трехсвязной САУ

$$D(h,\Phi) = 1 + h_2\Phi^2 + h_3\Phi^3 = 0,$$

где $h_2 = -1.72,\ h_3 = 0.62$.

Тогда не выполняется условие (4)

$$1 + h_2 + h_3 = 1 - 1.72 + 0.62 = -0.1 < 0$$

Система структурно и статически неустойчива (рис.6)

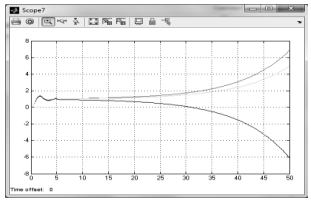


Рис. 6. Переходные процессы после изменения параметров первой подсистемы (пример 3)

Сформируем связи через многомерный регулятор с целью компенсации структурной неустойчивости

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 2 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Тогда характеристики связей будут равны $h_2 = -1.8,\ h_3 = 0.83$ и условие (4) выполняется

$$1 + h_2 + h_3 = 1 - 1.8 + 0.83 = 0.03 > 0.$$

Условие (4) также выполняется:

$$W_{11}^* = 1 + 1.6 + 1 = 3.6,$$
$$W_{22}^* = 2.4 + 1 + 0 = 3.4,$$
$$W_{33}^* = 0 + 0 + 1 = 1.$$

Система структурно и статически устойчива (рис.7)

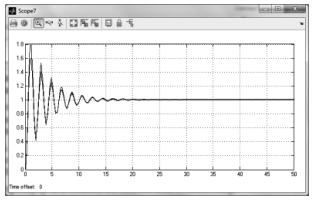


Рис. 7. Переходные процессы после изменения структуры регулятора (пример 3)

IV. Заключение

Таким образом, на основе системного описания многосвязной САУ через характеристики подсистем и характеристики связей и предложенных критериев можно провести анализ устойчивости исследуемых многосвязных систем управления при структурных изменениях или в результате разрыва связей, или изменения параметров и структуры самой системы. Методы в работе обобщены на МСАУ с перекрестными связями как в объекте, так и в регуляторе. Такой подход также позволяет просто и удобно оперировать раздельно характеристиками подсистем $\Phi(s)$ и характеристиками связей $h(s)$ МСАУ, и наглядно видеть на какую характеристику больше повлияло то или иное изменение структуры. Приведены три критерия структурной устойчивости многосвязной системы с голономными связями между подсистемами. Разработана программа в среде Matlab, реализующая предложенные в работе методы исследования.

Список литературы

[1] Соболев О.С. О некоторых проблемах многосвязного регулирования // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования, 2001. №1.-С. 11-16.

[2] Ping Z., Huang J. Global robust output regulation for a class of multivariable systems // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2013. Vol. 23. № 3. P. 241-261.

[3] Karimi Z., Khosrowjerdi M.J., Batmani Y. Multiobjective fault-tolerant fixed-order/PID control of multivariable discrete-time linear systems with unmeasured disturbances // Optimal Control Applications and Methods. 2018. Vol. 39. № 5. P. 1648-1662.

[4] Stefanescu I.B., Stoica A.M. Control laws for multivariable systems applied in helicopter APCs design // AIP Conference Proceedings (International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics) ICNAAM 2017" 2018. P. 370008.

[5] Ильясов Б. Г., Кабальнов Ю. С. Исследование устойчивости однотипных многосвязных систем автоматического управления с голономными связями между подсистемами // Автоматика и телемеханика. 1993. № 8. С. 81-90.

[6] Ильясов Б.Г., Саитова Г.А. Анализ устойчивости динамических систем, представленных в полиномиальной векторно-матричной форме // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2018, № 2. С. 3-10.

[7] Ильясов Б.Г., Саитова Г.А. Системный подход к исследованию многосвязных систем автоматического управления на основе частотных методов. Автоматика и телемеханика. 2013. № 3. С. 173-191.

[8] Ильясов Б. Г., Кабальнов Ю. С., Колушов В. В. К построению областей устойчивости МСАУ в плоскости АФХ ее сепаратных подсистем // Техническая кибернетика. 1990. №1. С. 18-25.

[9] Ilyasov B.G., Saitova G.A., Khalikova E.A. Analysis of the stability margins of homogeneous multivariable control systems // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2009. № 4. P. 4-12.

[10] Александров А.Г., Орлов Ю.Ф. Частотное адаптивное управление многомерными объектами // Автоматика и телемеханика. - 2006. - Т. 67. №7. - С. 104-119

[11] Xavier N., Bandyopadhyay B., Schmid R. Robust non-overshooting tracking using continuous control for linear multivariable systems // IET Control Theory and Applications. 2018. Vol. 12. № 7. P. 1006-1011.

[12]] O.D. Lyantsev, G.G. Kulikov, V.Y. Arkov, T.V. Breikin, “Optimal multi-variable control of gas turbine engines” in International Journal of Systems Science, Taylor&Francis, vol. 35, №2. 2004, pp. 79-86.

[13] Chen C., Liu Z., Xie K., Zhang Y., Wen C., Chen C.L.P. Adaptive asymptotic control of multivariable systems based on a one-parameter estimation approach // Automatica. 2017. Vol. 83. P. 124-132.

Новый метод конструирования стохастического робастного регулятора на принципах многообразий

Колесникова С.И.
Институт вычислительных систем и программирования
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Санкт-Петербург, Россия
skolesnikova@yandex.ru

***Abstract* — A problem statement for the synthesis of a robust stochastic regulator based on the principles of control on manifolds and a new algorithm for designing a regulator for stochastic discrete object are presented. The object of study is given in the form of a system of stochastic difference nonlinear equations. The basis of the new algorithm for the analytical design of a stochastic nonlinear control system is the classical method for the analytical design of aggregated regulators, previously developed for a deterministic nonlinear object with a complete description. The robust stochastic nonlinear regulator provides the following characteristics of the control system: a) the minimal variance of the output variable; b) the minimal dispersion of the target invariant; c) the minimum of the average value of the quality functional.**

Ключевые слова — стохастический регулятор, многообразие, минимум дисперсии, нелинейный дискретный объект, векторное нелинейное управление

I. Введение

Методы конструирования специальных классов нелинейных систем управления и их анализа, несмотря на возрастающее число публикаций, вряд ли потеряют свою актуальность по причине понятной (см., например, [1-10]): отсутствие общей теории нелинейных систем.

Постановка задачи аналитического синтеза робастного регулятора на основе принципов управления на многообразиях [6-8] реализует принципы физического управления [1] и включает следующие положения [5, 6]:

1) представление объекта управления в виде системы обыкновенных дифференциальных/ разностных уравнений с непрерывными функциями в правой части описания;
2) описание множества целевых состояний $\{x(t)\} = 0,\ t \geq 0$ объекта управления как многообразия $\psi(t) = \psi(x(t)) = 0$, где ψ - известная функция-макропеременная;
3) предположение о существовании и ограниченности решений исходной системы в указанной области;
4) предположение о существовании управления, обеспечивающего достижение цели $\psi(t) \to 0$;
5) специальная форма функционала качества, обобщающего традиционный квадратичный.

Прозрачность и логичность метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [5] основана на справедливости утверждения, проверяемого непосредственно и приведенного во многих трудах по теоретической механике (например, [11]). Частный вид этого результата следующий.

Утверждение 1. Уравнение $\omega\dot{\psi} + \psi = 0$ есть уравнение Эйлера-Лагранжа для $\Phi = \int_0^{\infty} \left(\psi^2(t) + \omega^2\dot{\psi}^2(t)\right)dt$, где $\psi(t)$ - однозначная, непрерывная, дифференцируемая функция.

Целью доклада является представление нового алгоритма аналитического конструирования *стохастического регулятора*, минимизирующего дисперсию выходной переменной в классе управлений, полученных на базе классического аналитического конструирования агрегированных дискретных регуляторов (АКАР или, следуя авторам [5], АКАДР).

Общая идея конструирования такого регулятора заключается в последовательном выполнении следующих трех действий:

- классический АКАР-синтез в предположении, что случайный шум известен;
- вычисляется условное математическое ожидание от найденного управления;
- используя декомпозицию объекта управления и специфичную форму АКАР-управления, исключают случайные функции из полученного выражения.

II. Дискретная постановка задачи стохастического управления

Предполагается, что стохастический векторный объект $X[k] = (X_1[k], ..., X_n[k])$ задается описанием:

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 17-08-00920 а)

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

$$X_i[k+1] = F_i[k] + u_j[k] + \xi_l[k+1] + r_l\xi_l[k], \quad (1)$$

где $F_i[k] = F_i(X[k]), i = \overline{1,n}$ – нелинейная функция от состояния $X[k]$; $u_j[k], j = \overline{1,m}$; $m \le n$ - управляющие воздействия; $\{\xi_l[k]\}_{k\ge 0}$, $l = \overline{1,m_1}$, $m_1 \le n$ – последовательность независимых одинаково распределенных случайных величин со средним 0 и дисперсией σ_l^2, $l = \overline{1,m_1}$; $0 < r_l < 1$.

Случайные величины $\xi_i[k], \xi_j[k], X_i[k], X_j[k], i \ne j$ – попарно независимые.

Ставится задача нахождения закона управления $u[k] = (u_1[k],...,u_m[k])$, обеспечивающего выполнение требований:

1) объект (1) достигает цели $\mathbf{E}\{\psi[k]\} = 0, \psi[k] = \psi(X[k]) = 0,\ k \to \infty$ с минимальной дисперсией $\mathbf{D}\{\psi[k+1] + \lambda\psi[k]\} \to \min,\ k \to \infty$; размерности $\psi[k], u[k]$ совпадают: $\dim\psi[k] = \dim u[k]$;
2) функционал качества управления достигает минимума

$$\Phi = \mathbf{E}\left\{\sum_{k=0}^{\infty}\sum_{j=1}^{m}\left(\alpha_j^2\left(\psi_j[k]\right)^2 + \left(\Delta\psi_j[k]\right)^2\right)\right\} \to \min,\ \alpha_j > 0.$$

Замечание. Постоянные α, λ связаны соотношением (покоординатно) (см. [5])

$$\lambda = 0.5\left(2 + \alpha^2 - \sqrt{(1+\alpha^2) - 4}\right),\ |\lambda| < 1.$$

III. Решение задачи. Процедура синтеза стохастического регулятора

Для решения задачи применяется принцип построения робастного стохастического регулятора, основанный на определении условного математического ожидания при фиксированных предыдущих наблюдений [12]; управления будут определяться в классе АКАР-управлений.

Шаг 1. Осуществляется аналитический детерминированный синтез структуры регулятора (на базе классического АКАР) при зафиксированных случайных функциях, аддитивно и линейно входящих в правую часть уравнений объекта. Выходом шага 1 является случайный вектор

$$\tilde{u}[k] = \tilde{u}(F[k], \psi[k], \xi[k], \xi[k+1]),\ k \in \{0,1,2,...\}$$

Выполнимость этого шага гарантируется условиями 1)-5) раздела I.

Шаг 2. Определяется условное математическое ожидание $u[k] = \mathbf{E}\{\tilde{u}[k] \,|\, \xi^k\}$ при фиксированной предыстории процесса управления и состояний объекта, $\xi^k = (\xi[k], \xi[k-1]...\xi[0])$. Выходом шага 2 является случайный вектор

$$\hat{u}[k] = \hat{u}(F[k], \psi[k], \xi[k]),\ k \in \{0,1,2,...\}. \quad (2)$$

Шаг 3. Осуществляется декомпозиция исходной системы с учетом вида (2). Выходом шага 3 является алгебраическая система для исключения случайных компонент, входящих в конструкцию управления (2). Решение этой системы имеет вид $\xi[k] = \Psi(\psi[k]),\ k \in \{0,1,2,...\}$, где Ψ - известная функция.

Шаг 4. Формируется итоговый вид регулятора:

$$u[k] = u(F[k], \psi[k], \Psi(\psi[k])),\ k \in \{0,1,2,...\}.$$

Рассмотрим на примере применение приведенной процедуры синтеза стохастической системы управления, обеспечивающей минимум дисперсии выходной макропеременной.

IV. Пример синтеза стохастического регулятора

A. Описание объекта, n=4, m=2

Рассмотрим пример вывода аналитической системы управления стохастическим объектом 4-го порядка (n=4, m=2) с описанием:

$$\begin{aligned} X_1[k+1] &= F_1[k], \\ X_2[k+1] &= F_2[k], \\ X_3[k+1] &= F_3[k] + u_1[k] + \xi_1[k+1] + r\xi_1[k], \\ X_4[k+1] &= F_4[k] + u_2[k] + \xi_2[k+1] + r\xi_2[k], \end{aligned} \quad (3)$$

где $F_i[k] := F_i(X_1[k], X_2[k], X_3[k], X_4[k]), i = \overline{1,4}$.

Введем целевые макропеременные в виде:

$$\begin{aligned} \psi[k] &= (\psi_1[k], \psi_2[k]), \\ \psi_1[k] &= X_3[k] - X_3^*, \\ \psi_2[k] &= X_3[k] - \rho X_4[k]. \end{aligned} \quad (4)$$

где X_3^* - заданное значение, в окрестности которого предполагается стабилизация переменной $X_3[k]$; смысл второй макропеременной определим как соблюдение заданного баланса между величинами $X_3[k], X_4[k]$ с коэффициентом пропорциональности $\rho \ne 0$. Цель управления:

$$\mathbf{E}\{\psi[k]\} \xrightarrow[k\to\infty]{} 0,$$

$$\Phi = \mathbf{E}\left\{\sum_{k=0}^{\infty}\sum_{j=1}^{2}\left(\alpha_j^2\left(\psi_j[k]\right)^2 + \left(\Delta\psi_j[k]\right)^2\right)\right\} \to \min.$$

B. Синтез системы управления для объекта (1)

1. При фиксированных шумах $\xi_1[k], \xi_2[k]$ из векторного уравнения $\psi[k+1]+\lambda\psi[k]=0,\ \lambda=(\lambda_1,\lambda_2)$ (см. утверждение 1) с учетом описаний (3), (4) получаем цепочку соотношений:

$$\begin{aligned}&\psi_1[k+1]+\lambda_1\psi_1[k]=0;\\&\psi_2[k+1]+\lambda_2\psi_2[k]=0;\end{aligned}\Rightarrow$$

$$\begin{aligned}&\tilde{u}_1[k]=-\left(F_3[k]+\xi_1[k+1]+r\xi_1[k]-X_3+\lambda_1\psi_1[k]\right);\\&\tilde{u}_2[k]=\rho^{-1}\left(X_3-\lambda_1\psi_1[k]+\lambda_2\psi_2[k]\right)-\\&-\left(F_4[k]+\xi_2[k+1]+r\xi_2[k]\right).\end{aligned}$$

2. Находим выражение для условного математического ожидания в силу исходных допущений $\mathbf{E}\{\xi_i[k]\}=0,\ i=1,2$ и попарной независимости случайных величин $\xi_1[k],\xi_2[k],X_i[k],X_j[k],i\neq j$:

$$\begin{aligned}&\hat{u}_1[k]=\mathbf{E}\left\{\tilde{u}_1[k]\,\middle|\,\xi^k\right\}=\\&=-\left(F_3[k]+r\xi_1[k]-X_3+\lambda_1\psi_1[k]\right);\\&\hat{u}_2[k]=\mathbf{E}\left\{\tilde{u}_2[k]\,\middle|\,\xi^k\right\}=\\&=\rho^{-1}\left(X_3-\lambda_1\psi_1[k]+\lambda_2\psi_2[k]\right)-\left(F_4[k]+r\xi_2[k]\right).\end{aligned}\qquad(5)$$

Здесь $\xi^k=\left(\xi[k],\xi[k-1]\ldots\xi[0]\right),\xi[k]=\left(\xi_1[k],\xi_2[k]\right)$.

3. Осуществляя подстановку управлений (5) в исходные уравнения (3), получим соотношения:

$$\begin{aligned}&\xi_1[k]=\psi_1[k]+\lambda_1\psi_1[k-1];\\&\rho\xi_2[k]=\psi_1[k]+\lambda_1\psi_1[k-1]-\\&-\left(\psi_2[k]+\lambda_2\psi_2[k-1]\right).\end{aligned}\qquad(6)$$

4. Используя соотношения (6) получим после упрощения итоговое выражение для регулятора:

$$\begin{aligned}&u_1[k]=-\left(F_3[k]+(r+\lambda_1)\psi_1[k]+r\lambda_1\psi_1[k-1]-X_3\right);\\&u_2[k]=\rho^{-1}\begin{pmatrix}X_3-(r+\lambda_1)\psi_1[k]+\\+(r+\lambda_2)\psi_2[k]-\\-r\lambda_1\psi_1[k-1]+r\lambda_2\psi_2[k-1]\end{pmatrix}-F_4[k].\end{aligned}\qquad(7)$$

C. Свойства регулятора

Система управления (3)-(5), (7) является асимптотически устойчивой в среднем и обладает свойствами:

а) $\mathbf{E}\{\psi[k+1]+\omega\psi[k]\}=0$;

б) дисперсии случайных величин $\psi_i[k+1]+\omega_i\psi_i[k],i=1,2$ в условиях управления (7) являются минимальными.

D. Численное моделирование

Полагаем:

$$\begin{aligned}&F_1[k]=A\left(\alpha C_0-\mu X_3[k]X_1[k]X_2[k]\right);\\&F_2[k]=X_1[k]\left(\alpha C_0-\mu X_4[k]X_1[k]X_2[k]\right);\\&F_i[k]=k_iX_i[k],i=3,4.\end{aligned}\qquad(8)$$

Здесь $X_1[k],X_2[k]$ ([5] (стр. 447) - объемы продаж однотипной продукции в k -й период, реализуемых ведущим и более мелким производителями, соответственно; C_0 – количественная характеристика средней покупательной способности в регионе; A,α,μ региональные коэффициенты пропорциональности.

Переменные $X_3[k],X_4[k]$ будут выражать изменение цен на продукцию со стороны двух производителей, соответственно. Тогда достижение цели управления (4) будет означать стабилизацию цены на продукцию ведущим производителем и баланс между объемами продукции, соответственно.

Управляющие воздействия $u_j[k],j=1,2$ реализуют оптимальную ценовую стратегию в рамках (4).

Отметим, что в условиях отсутствия шума для такого объекта ранее в [13] была сконструирована детерминированная система векторного управления с более сложными целевыми установками (для процесса синтеза управления).

Рассмотрим теперь стохастический объект с параметрами:

$$\begin{aligned}&A=32,C_0=4000,X_1[0]=X_2[0]=32,X_3[0]=100,\\&X_4[0]=110,\alpha=56\cdot10^{-5},\ \beta_x=7{,}3,\ \beta_y=7{,}5,\ \mu=2\cdot10^{-4},\\&\rho=0{,}9.\end{aligned}$$

Результаты моделирования приведены на рис.1-2, свидетельствующие о реализации поставленных целей на базе построенного регулятора.

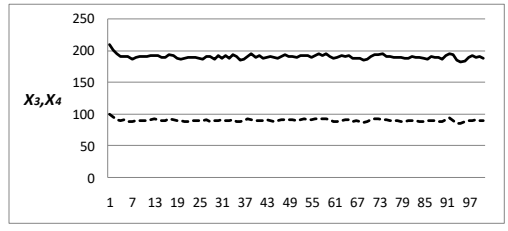


Рис. 1. Достижение заданного баланса между целевыми переменнми ($X_3[k]$ -пунктир, $X_4[k]$ -сплошное начертание)

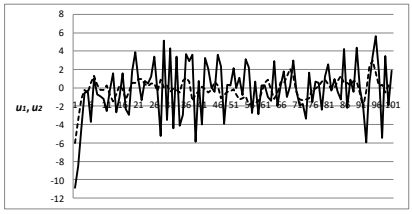


Рис. 2. Форма поведения реализаций управлений ($u_1[k]$ -пунктир, $u_2[k]$ -сплошное начертание)

V. Решение прикладных задач

На основе алгоритма п. III решены несколько нелинейных стохастических задач управления для объектов различной прикладной направленности, три из которых ниже приводятся.

A. Технический объект – робот-манипулятор (n=6, m=3).

Вывод классического детерминированного непрерывного АКАР-регулятора для целенаправленного поведения объекта с неподвижным центром масс с частным видом целей управления рассмотрен в работах автора метода АКАР (например, см. пример 3 в [14]); далее в работе [15] построена система управления для стабилизации дискретизованной модели объекта с неподвижным центром масс (координаты не зашумленного объекта (9) интерпретировались как шарнирные углы, см. практическую интерпретацию, например, в [16]).

Здесь, система управления для *стохастического* объекта вида

$$\begin{aligned}&\mathbf{x}_1[k+1]=\mathbf{F}_1[k],\mathbf{F}_1[k]=\mathbf{x}_1[k]+\tau\mathbf{x}_2[k],\\&\mathbf{x}_2[k+1]=\mathbf{F}_2[k]+\tau\mathbf{A}\mathbf{u}[k]+\boldsymbol{\xi}[k+1]+c\boldsymbol{\xi}[k],\\&\mathbf{F}_2[k]=\mathbf{x}_2[k]+\tau\mathbf{A}\mathbf{q}\left(\mathbf{x}_1[k],\mathbf{x}_2[k]\right),k\in\{0,1,...\},\end{aligned}\qquad(9)$$

где $\mathbf{A}=\mathbf{m}^{-1},\mathbf{x}_i,\mathbf{q},i=1,2,\mathbf{m}=\|m_{ij}\|_{3\times3},\tau$ - определенные параметры объекта; $\{\boldsymbol{\xi}[k]\}_{k\ge0}$ - последовательность случайных величин с выше сформулированными свойствами (1), $\mathbf{u}\in R^3$ - управление, согласно алгоритму п. III примет вид совокупности уравнений (9), (10):

$$\begin{aligned}&\tau\mathbf{A}\mathbf{u}[k]=-\mathbf{F}_2[k]-c\omega_1\boldsymbol{\psi}^{(1)}[k-1]-\\&-\left(1+\omega_1+c\right)\boldsymbol{\psi}^{(1)}[k]-\omega_2\mathbf{x}_2[k],\\&\boldsymbol{\varphi}\left(\mathbf{x}_1[k]\right)=-\tau^{-1}\left(1+\omega_2\right)\boldsymbol{\psi}\left(\mathbf{x}_1[k]\right),\\&\boldsymbol{\psi}[k]=\boldsymbol{\psi}\left(\mathbf{x}_1[k]\right)=\mathbf{x}_1[k]-\mathbf{b}^*,\\&\boldsymbol{\psi}^{(1)}[k]=\mathbf{x}_2[k]-\boldsymbol{\varphi}\left(\mathbf{x}_1[k]\right),k\in Z_+.\end{aligned}\qquad(10)$$

Здесь ω_1,ω_2 - параметры регулятора; $\boldsymbol{\psi}[k]$ - целевая макропеременная; вектор $\mathbf{b}^*$ - целевой вектор для углов манипулятора $\mathbf{x}_1$ (см. в табл.1 зависимость среднеквадратического отклонения (СКО) координат объекта от СКО шума).

ТАБЛИЦА I. Среднеквадратические отклонения координат объекта и шума

$\sigma(\xi)$	$\sigma(x_{13})$	$\sigma(x_{12})$	$\sigma(x_{13})$
1	0,184	0,477	0,109
2,5	0,28	0,521	0,277
5	0,481	0,672	0,535

B. Экономический объект (n=4, m=2) (рассмотрен кратко выше).

Подробный вывод управления для случая (n=2, m=1) см. также в [17].

C. Биологический объект, описываемой дискретной моделью «хищник-жертва» (n=2, m=1).

Рассматривался дискретный объект вида

$$\begin{aligned}&X_1[k+1]=X_1[k]+\tau_0f_1[k]+\tau_0u[k]+\zeta_1[k],\\&X_2[k+1]=X_2[k]+\tau_0f_2[k]+\zeta_2[k],\\&f_1[k]=f_1\left(X_1[k],X_2[k]\right)=\\&=\alpha_1X_1[k]-\beta_1X_1[k]X_2[k],\\&f_2[k]=f_2\left(X_1[k],X_2[k]\right)=\\&=-\alpha_2X_2[k]+k\beta_1X_1[k]X_2[k],\\&\zeta_i[k]=\xi_i[k+1]+c\xi_i[k],i=1,2,\end{aligned}\qquad(11)$$

где $\alpha_i,\beta_i,i=1,2,k,\tau_0$ - параметры объекта. Согласно алгоритму п. III система стохастического управления примет вид совокупности уравнений (11), (12):

$$\begin{aligned}&\tau_0u[k]=-(\lambda+c)\psi[k]-c\lambda\psi[k-1]-\\&-X_1[k]-\tau_0f_1[k]+\rho f_2[k],\ k=1,2,...\end{aligned}\qquad(12)$$

где $\psi[k]=X_1[k]-\rho X_2[k]\to0$ - цель управления (см. рис.3), ρ,λ - параметры регулятора.

Моделирование проводилось в условиях:

$$\begin{aligned}&\alpha_1=1{,}1;\ \alpha_2=0{,}4;\ \beta_2=k\beta_1=0{,}1;\ \lambda=0{,}1;\ \tau_0=0{,}22;\\&X_1(0)=10;\ X_2(0)=20;\ X_2^*=10;\ \sigma\{\xi_i[k]\}=0{,}1,\ i=1,2.\end{aligned}\qquad(13)$$

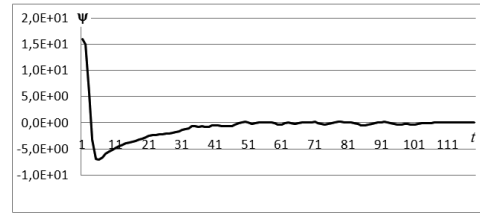


Рис. 3. Реализация целевой макропеременной $\psi[k]$

Из рис. 3 следует, что при наличии шума система (11), (12) асимптотически устойчив достигает цели $\psi[k]=X_1[k]-\rho X_2[k]\to0,k\to\infty$.

Ниже приведены рисунки 4, 5 для собственного поведения объекта без зашумления и с зашумлением координат, соответственно, в условиях (13).

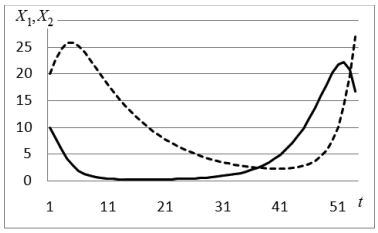


Рис. 4. Реализация переменных ($x_1[k]$ -сплошное начертание, $x_2[k]$ - пунктир) в условиях $\zeta_i[k]=0, i=1,2, u[k]=0$

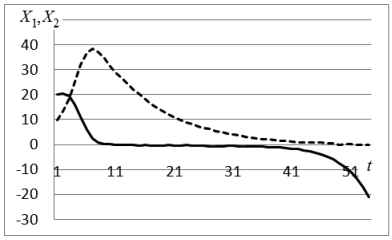


Рис. 5. Реализация переменных ($x_1[k]$ -сплошное начертание, $u_2[k]$ - пунктир) в условиях $\sigma\{\xi_i[k]\}=0,1,\ i=1,2,\ u[k]=0$

Из рис. 5 следует, что при наличии даже небольшого уровня шума система (11) становится неустойчивой.

Замечание. Согласно классическому методу АКАР [5] параметры регулятора $\omega_1, \omega_2, \lambda$ пропорциональны длительности переходных процессов.

VI. Заключение

В докладе приведен алгоритм аналитического синтеза стохастического нелинейного регулятора для дискретного объекта, правые части которых содержат неопределенность в форме случайных шумов с нулевым средним и ограниченной дисперсией произвольного распределения.

Результат является обобщением ранее рассмотренного в [12, 17] скалярного случая.

Изложенный здесь алгоритм синтеза дискретного стохастического регулятора также является определенным обобщением ранее разработанной *детерминированной* процедуры (например, [18]) нелинейной адаптации, поскольку правые части обыкновенных дифференциальных уравнений, возникающих на этапе расширения фазового пространства (модель скорости изменения неизвестного возмущения [18]) есть функция, линейно пропорциональная целевой макропеременной (см. здесь, например, формулу (6)).

VII. Дальнейшее развитие

Полученные соотношения для нелинейных объектов разной размерности и вида нелинейностей дают надежду на получение общего аналитического результата для определенного класса объектов.

Так, в [19] получен для объекта 2-го порядка с общим описанием результат по применению метода нелинейной адаптации (к неизвестным, но *детерминированного* характера шумам).

Алгоритм заслуживает более детального изучения еще и по той причине, что на ряде примеров (см., например, в [17]) было показано его явное преимущество по сравнению с классическим методом в нерасчетных условиях.

Следует также заметить, что изложеннная выше техника синтеза дискретного регулятора, по-видимому, применима для любого метода управления дискретным объектом, использующего технику инвариантов (см. обзоры в [3, 6], [7, 8]).

Благодарности

Автор выражает свою благодарность за проведение моделирования доценту ТГУ Цветницкой С.А. на основе числовых данных, представленных старшим научным сотрудником института машиноведения им. А.А. Благонравова (РАН) Побегайло П.А., бакалавру СПб ГУАП Устюковой В.И.

Список литературы

[1] Красовский А.А.. Проблемы физической теории управления / Автоматика и телемеханика, 1990. №. 1. - с. 3-28 .

[2] Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 562 с.

[3] H.K. Khalil. Nonlinear systems. Prentice Hall, 2002.

[4] Andrievskii B.R., Fradkov A.L. Control of Chaos: Methods and Applications. II. Applications // Automation and Remote Control. 2004. V. 65. No 4. P. 505-533.

[5] Колесников А.А. Синергетика и проблемы теории управления: сборник научных трудов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 504 с.

[6] Тюкин И.Ю., Терехов В.А. Адаптация в нелинейных динамических системах. - СПб.: ЛКИ, 2008. - 384 с.

[7] M. Arcak, A. Teel, P. Kokotovic. Robust nested saturation redesign for systems with input unmodeled dynamics // Proceedings of the 2000 American Control Conference. 2000. vol. 1. no. 6. pp. 150-154.

[8] Astolfi, D. Karagiannis, R. Ortega. Nonlinear and Adaptive Control with Applications Springer, 2008. P. 290.

[9] Острем К.Ю. Введение в стохастическую теорию управления. - М: Мир. 1973. – с. 322.

[10] Astroem K.J., Wittenmark B.: Adaptive control. Dover Publications, Нью-Йорк (2008).

[11] Леви-Чивита Т., Амальди У. Курс теоретической механики. Т. 2. Часть 1. - М.: Изд. иностранной литературы, 1951. - 554 с

[12] Kolesnikova S.I., A multiple-control system for nonlinear discrete object under uncertainty. Optimization Methods and Software, 2018. DOI 10.1080/10556788.2018.1472258.

[13] Колесникова С.И. Система множественного управления для нелинейного объекта с неполным описанием // Труды СПИИРАН, 2017. № 6 (55). - с. 114-133.

[14] Синергетическая теория управления. http://scp.sfedu.ru/study/1-5.html. Режим доступа 04.07.2019.

[15] S. Kolesnikova, S. Tsvetnitskaya and P. Pobegailo. An Extension of the Method of Aggregated Regulators to a Discrete Stochastic Object // Proceedings of the 2019 International Siberian Conference on Control and Communications. DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729595.

[16] Матюхин В.И. Стабилизация движений манипулятора вдоль заданной поверхности // Автоматика и телемеханика. 2011. № 4. С. 71 – 85.

[17] Колесникова С.И. Синтез стохастического регулятора на многообразиях для нелинейного дискретного объекта // Прикладная информатика. 2018. № 6. С. 18–30.

[18] Колесников А.А. Новые нелинейные методы управления полетом. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. - 193 с.

[19] Kolesnikova S.I. Synthesis of the Control System for a Second Order Non-Linear Object with an Incomplete Description // Automation and Remote Control, 2018. № 9(79). - pp. 1556–1566.

Система управления обезвреживанием органо-минеральных отходов с использованием биоингибиторов и источников биогенеза

Кондратьев О.И.
кафедра ХТ и ПЭ
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
Самара, Российская Федерация
olkondor95@gmail.com

Жежеря А.А.
кафедра ХТ и ПЭ
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
Самара, Российская Федерация
alinaalina25486@gmail.com

Паис М.А.
кафедра ХТ и ПЭ
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
Самара, Российская Федерация
pais_maksim@mail.ru

***Abstract* - In the developed industrial regions massive of organic and mineral waste was accumulated, the volume of which is estimated at tens of millions of cubic meters. It includes landfills of municipal solid waste (MSW), slurry reservoirs, tailings ponds, sludge banks. Neutralization of such objects is associated with the usage of chemical and biochemical methods of oxidation. Biochemical methods is necessary for the elimination of degradable organic fractions, prevention the processes of decay.**

Acceleration of waste mineralization is carried out using special industrial materials – biogenesis sources. Some industrial waste is a raw materials for them. In certain cases bioinhibiting agent are used when the acceleration of the decomposition and collection of the biogas is economically unviable. Quantity reduction of producing biogas in this condition help to provide industrial safety.

Bioinhibition agent can be obtained on the basis of a number of industrial wastes. Formaldehyde-containing and sulfur-containing waste as a reagent to reduce gas generation are considered in this article.

Rational dosage of bioinhibiting agent, sources of biogenesis, the places of their introduction to the landfill body, the technological features of acceleration or deceleration the process of decomposition are identified by the solving optimization problems. The solution of the outlined problems is impossible without the development of the neutralization control system. Elements of this system include production units of bioinhibitors and sources of biogenesis directly at industrial enterprises - donors, landfill body of organic-mineral waste (acceptors), as well as transport and logistics flows of materials delivery to the industrial objects.

An important element of the system is the search for resource, structural, chemical and geoecological compliance of materials with the substance of waste. In addition, the boundary conditions and the required to achieve the value of the efficiency of the processes should be identified for the effective management of the proposed system.

Ключевые слова — биоингибиторы, утилизация шламов, полигоны ТКО, сероодержащие отложения, отложения формальдегидсодержащие, ингибирование газообразования.

I. Введение

В результате технического обслуживания технологического оборудования на предприятиях нефтегазового комплекса образуются высокотоксичные отходы — шламы чистки емкостей и трубопроводов от нефти и нефтепродуктов (в соответствии с ФККО [1]). С ростом добычи сернистых и высокосернистых нефтей, содержащих сероводород и низкомолекулярные меркаптаны, соответственно увеличивается количество образующихся отложений.

Известно, что формальдегид и содержащие его отходы обладают способностью к биоингибированию, в частности к подавлению жизнедеятельности метаногенов [2]. Технологию подавления анаэробной микрофлоры применяют на полигонах твердых коммунальных отходов (ТКО). Известно, что наиболее продуктивный период газогенерации объектов размещения ТКО приходится на окончание активного периода эксплуатации объекта. Поэтому проведение комплексных мероприятий по сбору и отведению биогаза или ингибирование процессов газообразования в толще свалочного массива обеспечивают экологическую безопасность объекта. Как правило, данный метод используют, когда сбор и утилизация биогаза экономически нецелесообразны – это относится к малым полигонам и несанкционированным свалкам ТКО, а также другим объектам исторически накопленного экологического ущерба от размещения органоминеральных отходов [3].

Кроме того, существуют исследования процессов подавления газообразования на полигонах захоронения ТКО с использованием отходов, содержащих хлорную известь, креазот, ихтиол [4]. Однако промышленное применение технологий сдерживается небольшими количествами их образования, в то время как предлагаемые для ингибирования серо- и формальдегидсодержащие отходы образуются в большем количестве.

Таким образом, существует возможность обеспечения утилизации серо- и формальдегидсодержащих шламов нефтяного комплекса в качестве биоингибиторов разложения ТКО в условиях полигонов с минимальным экологическим воздействием на компоненты экосистем. Для эффективного применения предлагаемого способа необходимо обеспечить должное управление.

II. Этапы создания системы управления обезвреживанием органо-минеральных отходов

В ходе создания системы управления обезвреживанием органо-минеральных отходов с использованием биоингибиторов и источников биогенеза выделяют следующие этапы:

1) Ресурсно-логистический анализ промышленного комплекса, на предмет образования и использования серо- и формальдегидсодержащих шламов в качестве биоингибирующего сырья.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

2) Количественный и качественный химический анализ шлама. Определение эффективных доз и концентраций реагентов для использования в качестве биоингибиторов, а также возможные химические преобразования данных реагентов с учетом природных и техногенных обременений.

3) Проведение лабораторных и промышленных испытаний формальдегидсодержащих шламов в качестве биоингибиторов на полигонах ТКО.

4) Разработка технологической схемы и технологического регламента.

5) Технико-экономическое обоснование и экологическая предлагаемой технологии

Ресурсно-логистический анализ промышленного комплекса показал, что потребностям полигонной обработки ТКО в плане реагентов биоингибирования отвечают серо- и формальдегидсодержащие шламы нефтяного комплекса. Источником их образования отложения в технологическом оборудовании и коммуникациях [5].

Потребление формальдегидсодержащих поглотителей в России за 2013-2014 гг. превысило 15000 тонн [7]. Результаты ориентировочных расчётов показывают, что на нефтеперерабатывающих заводах образуется порядка 1,2-2 тыс.т/год отложений (при товарной концентрации 25-37 % об. формалина). Они вывозятся на полигоны заводов и выбывают из производственного цикла.

Состав шламов представляет собой следующие компоненты:

- продукты взаимодействия серы, содержащейся в нефти

- меркаптаны С1-С2, с поглотителем на основе формалина, добавляемым в нефть.

Однако у предлагаемых к использованию отложений есть существенный недостаток – токсичность, а значит, существует риск вторичного загрязнения геологической среды соединениями серы и формальдегидом. В условиях существующего на данный момент технологического прогресса недостаток устраняется с помощью гидроизоляции оснований участков складирования, качественного уплотнения и послойной пересыпки ярусов ТКО, создания сооружений гидротехнической защиты [6].

Химический анализ предлагаемых реагентов является вторым этапом создания эффективной системы утилизации отходов. Для обоснования возможности утилизации шлама по предлагаемому направлению были отобраны и проанализированы образцы отложений. Наиболее представительные виды проб представлены на рисунке 1.

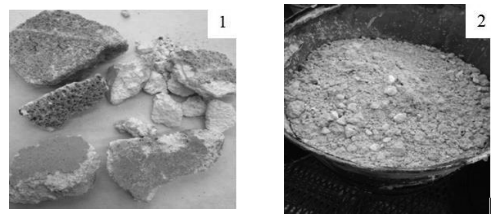


Рис. 1. Образцы отложений
1 – в секциях АВО; 2 – отложения из рефлюксной емкости после её чистки, отложения в трубопроводе между аппаратами воздушного охлаждения (АВО) и рефлюксной емкостью

Исследование образцов проводили рентгеновским флуоресцентным спектральным методом (РФА) на спектрометре «Спектроскан МАКС – GV», методом экстракции, ИК-спектральным методом. Также проводился качественный и количественный химический анализ. Полученные результаты представлены в таблице ниже.

ТАБЛИЦА I. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА И ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ОТЛОЖЕНИЙ

Характеристика	1.03.2016г.	27. 02.2017г	09.02.2018 г.	10.03.2018г.
Место отбора отложений	т/п[a] рефлюксной емкости	т/п рефлюксной емкости	секции АВО	т/п рефлюксной емкости
Внешний вид	белая масса с запахом нефтепродукта	сухая, пористая серо-черная масса с запахом дренажной воды	рыхлая белая масса с серыми вкраплениями с запахом н/п	мазеобразная, влажная, светло-серая масса с черными вкраплениями со специфическим запахом
Потеря массы влаги/ органики при Т=800°С, % масс.	29,32/63,47	23,60/65,21	30,75/58,27	26,1/72,05
Растворимость в HCl (1:1), % масс.:	14,16	4,12	10	–
в H2O	до 80°С	–	до 80°С	
Толуол	малораств.		малораств.	
Этиловый спирт	нераствор.		нераствор.	
Сумма оксидов металлов:	7,11	3,45	–	1,85%
($Fe^{2+,3+}$)	6,1	3,29	9,95	–
оксиды Са	0,00	0,00	0,00	
оксиды Mg	0,80	0,00	0,00	
прочие	0,21	0,16	–	
Сульфиды	присутствуют	присутствуют	присутствуют	присутствуют
Хлориды	0,00	–	0,00	–
Сульфаты (SO_4^{2-})	5,23	0,00	0,00	присутствуют

[a] т/п – трубопровод

На основании полученных результатов можно сделать вывод о различиях серий образцов по физико-химическим свойствам и элементному составу. Отложения, отобранные из трубок и с решеток, имеют высокую зольность (до 99%) и представляют собой смесь сульфидов и оксидов металлов. Общее количество отложений на НПЗ в Самарской области приходящееся на одну ремонтируемую рефлюксную емкость, составило до 6 тонн. Часть шлама уходит в дренажную канализацию. Отложения обладают низкой зольностью (5–20%) и содержат углерод (до 25%) и серу (до 50%).

Следующей стадией организации системы управления обезвреживанием органо-минеральных отходов с использованием биоингибиторов является апробация и разработка методики. Исследование предлагаемой технологии планируется на полигоне ТБО с проведением шурфовки (см. рисунок 2) до анаэробной или переходной зоны и закладывание там отходов данного вида.

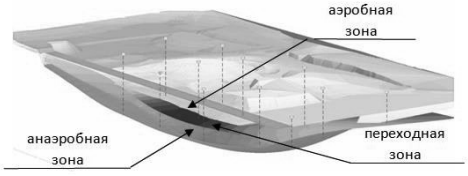


Рис. 2. Объемная модель полигона ТБО г. Тольятти, с расположением шурфов

Апробация возможна и через создание прослойки из данных отходов при закладке нового полигона между аэробной зоной и зонами ниже, которая также будет поглощать в определенных количествах фильтрационный сток, замедляя обводнение нижних зон. Использование объемной модели полигона позволяет наметить рациональные точки внесения биоингибиторов и изучить степень распада беззольного вещества и изменение температур минерализации, как ключевых показателей управления полигоном.

Результаты полупромышленных исследований при введении редуцирующих добавок, аналогичных представленным в статье, приведены на рисунках 3-4 [8].

Сводные показатели кинетики обработки конгломератов представлены в таблице II.

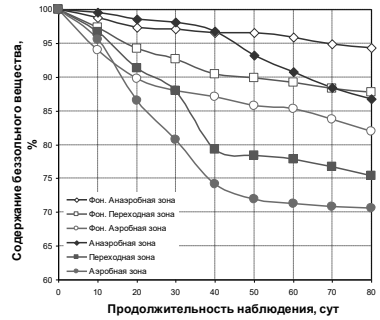


Рис. 3. Изменение содержания органического вещества при минерализации свалочного грунта полигона.

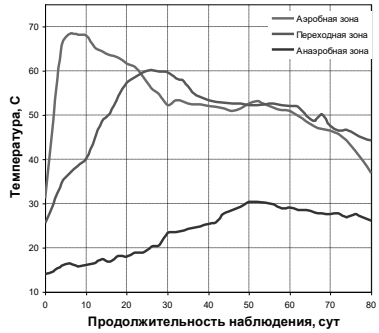


Рис. 4. Изменение температуры при минерализации свалочного грунта

ТАБЛИЦА II. СВОДНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ МИНЕРАЛИЗАЦИИ КОНГЛОМЕРАТОВ ТБО И ФОРМАЛЬДЕГИДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

Зона	№ точки	Глубина отбора, м	Время наблюдения, сут			Максимальная температура, °С	Содержание беззольного вещества, %			Значения Коли-титра	
			всего	*Продолжительность фазы нарастания температур*	*Продолжительность фазы высоких температур*		*начальное*	*конечное*	*Степень распада, отн. ед.*	*исходное*	*конечное*
Анаэробная	1	5,5	80	49	16	31,5	48,9	42,7	12,7	10^{-8}	10^{-5}
	2	6,5	80	62	12	24,5	47,5	43,6	8,2	10^{-8}	10^{-4}
Переходная	1	3	80	29	47	59,8	57,9	43,8	24,4	10^{-8}	10^{-1}
	2	4	80	26	43	53,2	53,4	40,5	24,2	10^{-8}	10^{-2}
Аэробная	1	0,5	80	6	36	69,9	72,1	52,4	27,3	10^{-8}	10
	2	1,5	80	7	34	65,4	67,3	47,6	29,3	10^{-8}	10

Анализ экспериментальных данных показывает, что использование фенол- и серосодержащих шламов чистки емкостей и трубопроводов от нефти и нефтепродуктов для обработки свалочных грунтов аэробной и переходной режимных зон массива является наиболее рациональным.

Четвёртым этапом создания управляемого технологического процесса является разработка технологической схемы и технологического регламента. В настоящее время ведутся работы по данному направлению, и планируется повторное проведение апробации отложений в качестве биоингибирующей добавки для полигонов ТКО. При достаточной сходимости полученных результатов можно составить положительное заключение о применении методики.

III. Заключение

Создание эффективной системы с управления обезвреживанием органо-минеральных отходов с использованием биоингибиторов предполагает ряд последовательных этапов: ресурсно-логистический анализ промышленного комплекса, качественный и количественный анализ серо- и формальдегидсодержащих шламов, проведение лабораторного и промышленного исследований, разработка технологической схемы и регламента, технико-экономическое обоснование. Содержание этапов подробно рассмотрено в данной статье.

Полученные на первой стадии данные позволяют оценить ресурсный и логистический потенциал отходов, предлагаемых для утилизации, и дать первичную оценку целесообразности их использования. В настоящем исследовании, применение шламов зачистки оборудования является перспективным, так как объёмы образования достаточны, а промышленные объекты для их применения функционируют в регионе. Поэтому основными критериями управления и оценки являются: объёмы образования формальдегидсодержащих отходов и их транспортировка непосредственно к объектам использования.

Определение качественного и количественного состава обеспечивает расчет оптимальных доз реагента и граничных условий применения, а так же предсказать его возможные превращения при взаимодействии с элементами природной и техногенной сред. Как показал химический анализ шлама, данный отход обладает токсичностью и различиями в составе, поэтому основными контролируемыми параметрами в сфере управления технологической системой являются: оценка достаточности концентраций основных действующих веществ в отходе, степень токсичности и контроль за рисками образования вторичного загрязнения с помощью соответствующего оснащения объекта размещения отходов.

Проведение лабораторных и промышленных испытаний с последующим технико-экономическим обоснованием позволяют оценить целесообразность предлагаемой технологии в текущих условиях. Все полученные данные ложатся в основу системы управления обезвреживанием органо-минеральных отходов с использованием биоингибиторов и позволяют её контролировать и эффективно использовать.

Список литературы

[1] Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов [Электронный ресурс]: Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 г. №242 ред. от 02.11.2018 – Режим доступа: URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_218071/ (Дата обращения 30.01.2019)

[2] G. Gonzalez-Gil; R. Kleerebezem; G. Lettinga. Formaldehyde toxicity in anaerobic systems // Water Science and Technology. 2000. Vol. 42. № 5-6. Pages 223-229.

[3] Зеленцов Д.В., Савельев А.А, Чертес К.Л. Устройство системы пассивной дегазации массивов существующих объектов размещения отходов // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2015. №4(21). С. 100-102.

[4] Чертес К.Л. Комплексная система подготовки и размещения органно-минеральных отходов в отработанных карьерах: автореф. дис. … д-ра. техн. наук: 25.00.36 – М.: 2006. – 44с.

[5] Хуторянский Ф.М., Цветков А.Л., Кляцкий Ю.Ю.. Современное состояние химико-технологической защиты от коррозии установок первичной переработки нефти. Проблемы, пути совершенствования // Экспозиция Нефть Газ. – 2014. – №4. С.56–59

[6] СанПиН 2.1.7.1322-03 Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления: утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 30.04.2003 № 80 [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: URL: http://docs.cntd.ru/document/901862232 (Дата обращения 20.01.2019)

[7] Вартапетян А.Р., Зуйков А.А., Монахов А.Н., Федоров И.И. О проблеме образования нетипичных сероорганические отложений // Научно-технический вестник ОАО «НК «РОСНЕФТЬ». – 2016. – №4. С.82–86.

[8] Чертес, К.Л., Михайлов, Е.В., Тупицына, О.В., Малиновский, А.С. / Утилизация ОСВ на объектах размещения отходов / К.Л. Чертес, Е.В. Михайлов, О.В. Тупицына, А.С. Малиновский // Экология и промышленность России / 2008, №5, С. 36-40.]

Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния гибкой нити при действии поперечного удара

Коновалов В.В.
Пензенский государственный технологический университет
Пенза, Россия
konovalov-penza@rambler.ru

Тарасов Д.А.
Пензенский государственный университет
Пенза, Россия
den517375@yandex.ru

Зайцев В.Ю.
Пензенский государственный технологический университет
Пенза, Россия
vluzai@gmail.com

Родионов Ю.В.
Тамбовский государственный технический университет
Тамбов, Россия
rodionow.u.w@rambler.ru

***Abstract* — The energy method of calculation of a flexible thread for a short-term transverse load given by the momentum of the striking body is proposed. The displacements of the studied geometrically nonlinear system, as well as the internal forces arising in it, are determined by the General theorem of dynamics, namely the law of energy conservation. In addition, as a result of the calculation, the value of the equivalent static load to the impact that occurs due to the kinetic energy of the striking body interacting with the structure is determined. This load is limited by the initial amount of kinetic energy of the body, and its value and the law of change from time to time depend on the physical and geometric parameters of the flexible thread. To perform the dynamic calculation by the proposed method, the flexible thread model is reduced to an equivalent system with one degree of freedom. An energy method for calculating a flexible thread for a short-term transverse load, given by the impulse of the striking body, is proposed.**

Ключевые слова — гибкая нить, динамическая нагрузка, удар, энергетический метод, напряжения, деформации

I. Введение

В промышленности [1], транспорте [2,3], энергетике [4], космосе [5] и строительстве [6] широко используются различные конструкции, использующие разнообразные стержне-образные гибкие элементы – канаты. При этом свойства материала канатов зачастую не линейны [7]. При расчетах канатов учитываются как весовые характеристики материала канатов, так и внешние силовые воздействия. Одним из внешних воздействий является ветровая нагрузка [6,8].

Другим видом динамической нагрузки на канаты могут быть дорожные условия движения транспортных средств. Так в работе [9] авторы рассматривают влияние конструктивных особенностей и дорожных условий на характеристики дорожных канатных барьеров. Их основными элементами являются предварительно напряженные проволочные канаты. Они обычно закрепляются на двух концах в бетонных блоках, утопленных в почве.

Авторами разработаны быстровозводимые металлические винтовые опоры [10] для барьеров железнодорожных переездов и иных ограждений [11]. Подобные ограждения способны выдерживать значительные динамические нагрузки.

Широкое использование вычислительной техники позволяет производить расчет канатов подобных ограждений методом конечных элементов [2, 12]. Однако данный метод требует больших возможностей вычислительной техники и специализированных программ. Это накладывает финансовые ограничения.

В настоящее время расчет гибких нитей при экстремальных воздействиях в виде поперечного удара, позволяет определять движение исследуемой конструкции и возникающие в ней при этом внутренние усилия в любой интересующий момент времени. Как правило, такой динамический расчет сводится к анализу дифференциальных уравнений математической физики. Однако на практике очень часто бывает так, что необходимо знать только максимальные значения перемещений и усилий для проверки прочности конструкции. В связи с этим такую проверку прочности при нагрузке, зависящей от времени можно заменить упрощенным энергетическим методом расчета.

II. Методы исследования

Рассмотрим гибкую нить, испытывающую поперечный удар, длиной больше величины пролета. Она принимает начальное очертание вследствие действия собственного веса и крепится к упругоподатливым опорам, расположенным на разных уровнях. Расчетная схема представлена на рисунке 1.

В процессе удара можно выделить несколько характерных положений ударяющей массы и гибкой нити. До начала взаимодействия с ударяющей массой, гибкая нить находится в покое и занимает исходное равновесное состояние, вызванное действием собственного веса. Ударяющая масса m во время своего равномерного прямолинейного движения достигает гибкой нити. При этом в первоначальный момент контакта ударяющая масса имеет скорость υ, а затем наносит удар по нити.

Расчет по предлагаемой методике производился с помощью системы компьютерной алгебры MathCAD 15. Для проведения исследования, рассмотрена задача со следующими исходными данными: гибкая нить с упругоподатливыми опорами жесткостью u=50 МН/м, расположенными на одном уровне, пролетом l=8 м, сечением A=0,0018878 м^2, выполнена из материала с модулем упругости E=147050 МПа. Первоначальная стрела провеса в середине пролета отсутствует. Ударяющая масса m=20000 кг наносит сосредоточенный удар в горизонтальной плоскости в середине пролета на скорости υ=5 м/с.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

Для оценки точности расчета использовали метод конечных элементов, выполненный в программном комплексе «ЛИРА-САПР» версия 2015 релиз R4. Гибкая нить моделировалась универсальными пространственными стержневыми конечными элементами с учетом геометрической нелинейности (тип 310), разбивка производилась на 20 конечных элементов. Упругая связь, позволяющая моделировать работу пружины – упругоподатливой опоры по направлению горизонтальной оси, задавалась в виде одноузлового конечного элемента упругой связи (тип 51).

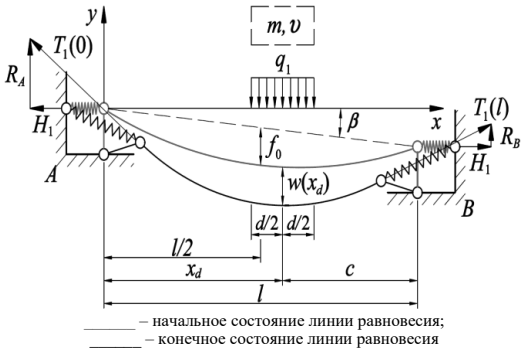


Рис. 1. Расчетная схема гибкой нити:

III. Результаты исследования

В процессе удара происходит смещение ударяемого сечения нити x_d. Как следствие происходит изменение исходной линии равновесия гибкой нити, включающее кинематические перемещения и упругую деформацию. На массу ударяющего тела действует кратковременная сила инерции q_1. При этом в процессе удара скорость ударяющей массы падает до нуля.

Кинетическая энергия ударяющей массы равна:

$$T = \Delta\left(\frac{m\cdot\upsilon^2}{2}\right). \quad (1)$$

Представим максимальное перемещение ударяемого сечения с абсциссой x_d в виде функции $w(H_1, q_1, x_d)$ от распора H_1, возникающего в гибкой нити и силы инерции q_1, которые в свою очередь не известны на момент определения указанного перемещения. В связи с этим H_1 и q_1 необходимо включать в параметры функции. Тогда работу силы инерции можно представить в виде:

$$A = \frac{1}{2}\cdot q_1 \cdot w(H_1, q_1, x_d). \quad (2)$$

Предположим, что в момент остановки ударяющей массы сила инерции достигает своего максимального значения. Кинетическая энергия ударяющей массы полностью переходит в работу по изменению положения гибкой нити, совершенной силой инерции, поэтому можно записать:

$$\Delta\left(\frac{m\cdot\upsilon^2}{2}\right) = \frac{1}{2}\cdot q_1 \cdot w(H_1, q_1, x_d). \quad (3)$$

Если нанесение удара происходит массой, движущейся в вертикальной плоскости, то формула (3) примет вид:

$$\Delta\left(\frac{m\cdot\upsilon^2}{2}\right) + m\cdot g\cdot w(H_1, q_1, x_d) = \frac{1}{2}\cdot q_1 \cdot w(H_1, q_1, x_d), \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2.

В полученном уравнении (4) к первому слагаемому в левой части, являющимся кинетической энергией ударяющего тела в момент первоначального контакта, прибавляется второе слагаемое. Данная величина представляет собой последующую работу силы тяжести по перемещению тела на расстояние равное значению прогиба гибкой нити в ударяемом сечении.

В случае ударного воздействия, имеющего развитую ширину зоны взаимодействия, силу инерции представим в виде равномерно распределенной нагрузки. При этом выражения (3) и (4) соответственно примут вид:

$$\Delta\left(\frac{m\cdot\upsilon^2}{2}\right) = \frac{1}{2}\cdot q_1 \cdot \int_{x_d-\frac{d}{2}}^{x_d+\frac{d}{2}} w(H_1, q_1, x)dx, \quad (5)$$

где d – ширина зоны контакта, м; $w(H_1, q_1, x)$ – функция прогиба гибкой нити, м.

$$\Delta\left(\frac{m\cdot\upsilon^2}{2}\right) + m\cdot g\cdot \int_{x_d-\frac{d}{2}}^{x_d+\frac{d}{2}} w(H_1, q_1, x)dx = \frac{1}{2}\cdot q_1 \cdot \int_{x_d-\frac{d}{2}}^{x_d+\frac{d}{2}} w(H_1, q_1, x)dx. \quad (6)$$

Из расчетной схемы видно, что прогиб гибкой нити является функцией от абсциссы и численно равен разности ординат начальной и конечной линии равновесия в рассматриваемом сечении:

$$w(H_1, q_1, x) = y_1(H_1, q_1, x) - y_0(x), \quad (7)$$

где $y_1(H_1, q_1, x)$ – ордината сечения конечной линии равновесия вызванная действием инерционной нагрузки, м; $y_0(x)$ – ордината сечения начальной линии равновесия от собственного веса, м.

Функция для определения очертания конечной линии равновесия гибкой нити представляет собой не что иное, как уравнение эпюры изгибающих моментов для шарнирно опертой однопролетной балки, нагруженной той же нагрузкой, и построенной в масштабе $1/H_1$ от хорды AB, соединяющей точки крепления гибкой нити. Математически это записывается так:

$$y_1(H_1, q_1, x) = \frac{M_1(q_1, x)}{H_1} + x\cdot tg\beta, \quad (8)$$

где $M_1(q_1,x)$ – функция изгибающего момента в шарнирно опертой балке пролетом l от действия инерционной нагрузки, Н×м; β – угол наклона хорды AB, град.

Кривую начального очертания, образованную под действием собственного веса гибкой нити, с достаточной степенью точности можно представить в виде уравнения параболы [12]:

$$y_0(x) = \frac{4 \cdot f_0}{l^2} \cdot x^2 - \frac{4 \cdot f_0}{l} \cdot x - x \cdot tg\beta, \quad (9)$$

где f_0 – стрела провеса от действия собственного веса в середине пролета, м.

Из уравнения (8) видно, что построение линии равновесия гибкой нити в деформированном состоянии, вызванном действием ударной нагрузки, сводится к определению распора, так как определение изгибающего момента в шарнирно опертой однопролетной балке не вызывает трудностей.

Внутренние усилия при изгибе в однопролетной шарнирно опертой балке определяются следующим образом:

$$Q_1(q_1,x) = \frac{q_1 \cdot d \cdot c}{l} \cdot (x \ge 0) - q_1 \cdot \left[x - \left(x_d - \frac{d}{2}\right)\right] \cdot \left(x > x_d - \frac{d}{2}\right) +$$
$$+ q_1 \cdot \left[x - \left(x_d + \frac{d}{2}\right)\right] \cdot \left(x > x_d + \frac{d}{2}\right) \text{при } d > 0; \quad (10)$$

$$Q_1(q_1,x) = \frac{q_1 \cdot c}{l} \cdot (x \ge 0) - q_1 \cdot (x \ge x_d) \text{ при } d = 0; \quad (11)$$

$$M_1(q_1,x) = \frac{q_1 \cdot d \cdot c}{l} \cdot x \cdot (x \ge 0) - q_1 \cdot \frac{\left[x - \left(x_d - \frac{d}{2}\right)\right]^2}{2} \cdot \left(x > x_d - \frac{d}{2}\right) +$$
$$+ q_1 \cdot \frac{\left[x - \left(x_d + \frac{d}{2}\right)\right]^2}{2} \cdot \left(x > x_d + \frac{d}{2}\right) \text{при } d > 0; \quad (12)$$

$$M_1(q_1,x) = \frac{q_1 \cdot c}{l} \cdot x \cdot (x \ge 0) - q_1 \cdot (x - x_d) \cdot (x \ge x_d) \text{ при } d = 0, \quad (13)$$

где c – расстояние от центра зоны взаимодействия до опоры B, м.

Для определения распора, возникающего в сечениях гибкой нити, вызванного действием ударяющей массы, а также нахождения величины инерционной нагрузки, воспользуемся уравнением неразрывности деформаций:

$$L_0 + \Delta L(H_1,q_1) + \Delta L_t = L_1(H_1,q_1), \quad (14)$$

где L_0 – начальная длина, м; $\Delta L(H_1,q_1)$ – упругая деформация, м; $L_1(H_1,q_1)$ – конечная длина, м.

Длина дуги кривой между точками крепления равна первоначальной длине гибкой нити и вычисляется по формуле:

$$L_0 = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} y_0(x)\right)^2}\, dx. \quad (15)$$

Уравнение по определению упругой деформации имеет вид:

$$\Delta L(H_1,q_1) = \frac{H_1 - H_0}{E \cdot A} \cdot \int_0^l \left[1 + \left(\frac{Q_1(q_1,x)}{H_1} + tg\beta\right)^2\right] dx, \quad (16)$$

где H_0 – распор вызванный начальной нагрузкой, Н; E – модуль упругости, Па; A – площадь поперечного сечения, м^2.

Кроме того, первоначальная длина гибкой нити может меняться под действием температуры на величину температурной деформации:

$$\Delta L_t = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t, \quad (17)$$

где α – коэффициент линейного расширения материала, $^oC^{-1}$; Δt – расчетный перепад температур, ^oC.

Конечная длина равна:

$$L_1(H_1,q_1) = \int_0^{l - \frac{2}{u} H_1} \sqrt{1 + \left(\frac{Q_1(q_1,x)}{H_1} + tg\beta\right)^2}\, dx, \quad (18)$$

где u – жесткость упругоподатливых опор, Н/м.

Учитывая направление движения ударяющей массы и ширину зоны контакта, появляется возможность определить значения распора H_1 и инерционной нагрузки q_1, решая численными методами систему из двух нелинейных уравнений (3) – (6) и (14) с двумя вышеуказанными неизвестными.

После нахождения распора и инерционной нагрузки можно определить продольное усилие, вертикальные составляющие опорных реакций и время действия инерционной нагрузки.

Функция продольного усилия равна:

$$T_1(x) = \sqrt{H_1^2 + (Q_1(q_1,x) + H_1 \cdot tg\beta)^2}. \quad (19)$$

Вертикальные составляющие опорных реакций в точках крепления:

$$R_A = Q_1(q_1,0) + H_1 \cdot tg\beta; \quad (20)$$

$$R_B = Q_1(q_1,l) - H_1 \cdot tg\beta. \quad (21)$$

Инерционная нагрузка равна произведению ударяющей массы на ее ускорение:

$$q_1 = \frac{m \cdot a}{d} \text{ при } d > 0; \quad (22)$$

$$q_1 = m \cdot a \text{ при } d = 0. \quad (23)$$

Из формул (22) и (23) выразим ускорение:

$$a = \frac{q_1 \cdot d}{m} \text{ при } d > 0; \quad (24)$$

$$a = \frac{q_1}{m} \text{ при } d = 0. \quad (25)$$

В свою очередь, ускорение является величиной характеризующей изменение скорости по времени:

$$a = \frac{\Delta \upsilon}{t}, \quad (26)$$

где t – время, с.

Поочередно приравнивая уравнения (24) и (25) к (26), найдем время действия инерционной нагрузки:

$$t = \frac{m \cdot \Delta \upsilon}{q_1 \cdot d} \text{ при } d > 0; \quad (27)$$

$$t = \frac{m \cdot \Delta \upsilon}{q_1} \text{ при } d = 0. \quad (28)$$

Для оценки достоверности результатов, получаемых с помощью предложенного метода, проведем сравнительный анализ основных параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) гибкой нити, полученного разными методами расчета. Для этого рассмотрим метод конечных элементов (МКЭ) и предложенную технологию моделирования. В качестве основных критериев оценки примем значения прогиба в середине пролета, а так же продольного усилия, возникающего в сечениях, расположенных в местах крепления гибкой нити.

В результате численного моделирования работы гибкой нити при действии поперечного удара предложенным методом, используя MathCAD, получены максимальные значения продольного усилия в сечениях, расположенных в точках крепления $T_1(0)=T_1(l)$=1,876 МН, прогиба в середине пролета $w(H_1,q_1,l/2)$=730,1 мм, а так же инерционной нагрузки q_1=0,68487 МН и времени ее действия t=0,292 с.

Для оценки точности расчета использовали метод конечных элементов, выполненный в программном комплексе «ЛИРА-САПР». Динамическая нагрузка, представленная на рисунке 2, моделировалась в виде кусочно-линейной (ломаной) кривой с произвольным шагом. Точки кривой строились в координатах «время – значение нагрузки». Нагрузка представляла собой треугольный импульс с вертикальным задним фронтом величиной q_1=0,68487 МН и длительностью t=0,292 с.

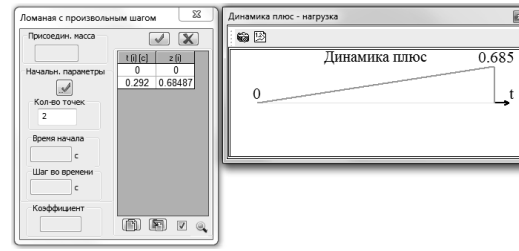


Рис. 2. Расчет динамической нагрузки

Расчет велся методом прямого интегрирования уравнений движения, так как данный метод позволяет решать задачи динамического расчета геометрически нелинейных конструкций.

В результате моделирования метода конечных элементов получен график изменения перемещения от времени узла, расположенного в середине пролета гибкой нити, представленный на рисунке 3.

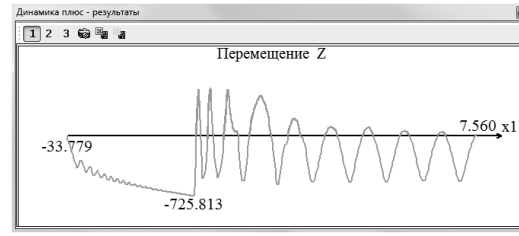


Рис. 3. График изменения перемещений от времени, мм

На рисунке 4 представлен график изменения продольного усилия от времени для крайних конечных элементов гибкой нити в приопорных сечениях. Наибольшее значение продольного усилия каната составляет 1,896 МН. При этом наблюдается максимальный его прогиб (см. рис.3) 725,813 мм. В дальнейшем, после ряда колебаний, динамическая нагрузка затухает с течением времени (см. рис.3, 4).

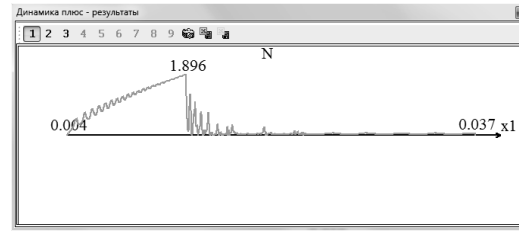


Рис. 4. График изменения продольного усилия от времени, МН

Значения принятых критериев оценки адекватности получаемых результатов с помощью предложенного метода по сравнению с методом конечных элементов (МКЭ), сведены в таблицу 1.

ТАБЛИЦА I. ЗНАЧЕНИЯ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГИБКОЙ НИТИ (КАНАТА)

Показатели	**Результаты расчета**	
	Продольное усилие $T_1(0)=T_1(l)$, МН	***Прогиб в середине пролета $w(H_1,q_1,l/2)$, мм***
Метод конечных элементов	1,896	725,813
Предложенный метод	1,876	730,1
Погрешность, %	1,055	0,59

Из таблицы 1 видно, что данные, полученные в результате моделирования, проведенного с использованием предложенного метода, хорошо согласуются с результатами, найденными с помощью метода конечных элементов.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод математического моделирования позволяет определять напряженно деформированное состояние гибкой нити при действии динамической нагрузки в виде поперечного удара, учитывающий первоначальное очертание гибкой нити, упругую податливость опор с возможностью расположения их на разных уровнях. Возможно определение значений силы инерции ударяющего тела и время ее действия на гибкую нить. При этом погрешность найденных величин, не превышает 5%, что является хорошим показателем точности для инженерных расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Bärtsch, R. Nonlinear Model for Full-Locked Coil Ropes Subjected to High External Radial Forces // Journal of Engineering Mechanics, 2019. 145 (4). – 04019019.

[2] A 3D model for static and dynamic analysis of an offshore knuckle boom crane / I. Adamiec-Wójcik, Ł. Drąg, M. Metelski, K. Nadratowski, S. Wojciech, // Applied Mathematical Modelling, 2019. 66. – C. 256-274.

[3] Hurel, G. Simulation of the dynamic behavior of a bi-cable ropeway with modal bases / G. Hurel, J. Laborde, L. Jézéquel // Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, 2019. – C. 43-54.

[4] Achiriloaiei, D. Stress and Strain Determination Occurring in Contact Area of the 450/75 ACSR Conductor / D. Achiriloaiei, S.V. Galatanu, I. Vetres // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. – 416 (1). – 012071.

[5] Dynamics Modeling and Analysis of the Inflatable Net System for Space Capture | [空间充气展开绳网捕获系统动力学建模与分析] / H. Liu, C. Wei, J. Tian, C. Tan, Y. Zhao // Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering, 2018. – 54 (22). – C. 145-152.

[6] Zhou, J. Study on Static/Dynamic Characteristics and Wind-Resistant Stability of Lightning Tower in Coastal Area | [沿海地区避雷塔静动特性与稳定性分析] / J. Zhou, D.-W. Shi // Zhongbei Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) / Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2018. – 39(5), C. 503-507.

[7] Anelasticity Influence of Wire Rope on the Calculation of Freight Ropeway Bearing Cable / J. Qin, J. Chen, L. Qiao, J. Wan, Y. Xia // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. – 423(1). – 012008.

[8] Cekus, D. Influence of wind on the movement of the load / D. Cekus, R Gnatowska, P. Kwiatoń // Journal of Physics: Conference Series, 2018. – 1101(1). – 012005.

[9] Bruski, D. Numerical studies on the influence of selected construction features and road conditions on the performance of road cable barriers / D. Bruski, W. Witkowski // MATEC Web of Conferences, 2018. – 231. – 01003.

[10] Патент 123425 РФ, МПК E02D 27/14. Металлический свайный фундамент / Зайцев В.Ю., Коновалов В.В., Тарасов Д.А., Шаповал О.Л. - 2012133210/03; Заявл. 03.08.2012; Опубл. 27.12.2012, бюл. № 36.

[11] Патент 2621774 РФ, МПК E01F 13/10. Противотаранный барьер / Тарасов Д.А., Косяков П.А., Шалашилин Н.А. Шаповал О.Л. - 2015145382; Заявл. 21.10.2015; Опубл. 07.06.2017, бюл. № 16.

[12] Visual Simulation of the Shape of Highline Cable in Static Lateral Replenishment | [静态横向补给高架索几何形状的可视化仿真] / Q. Li, W. Lun, H. Hou, S Mei // Tianjin Daxue Xuebao (Ziran Kexue yu Gongcheng Jishu Ban) / Journal of Tianjin University Science and Technology, 2018. – 51(12), C. 1321-1327.

Многосвязная автоматическая система с непрерывно-релейным управлением коэффициентом реактивной мощности узла нагрузки

Котенев В.И.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
kotenev.viiv@gmail.com

Котенев А.В.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
kotenev.av.sci@gmail.com

Зангиев С.А.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
stepanzangiev@gmail.com

***Abstract* — Load bus mathematical model that includes a few synchronous motors and serves as a model the reactive power factor of which is to be controlled was developed. From the mathematical model developed the multicoupled control systems with the common and individual excitation systems were derived. Multicoupled control system fed by the general source is shown to have the huge disadvantage: when the excitation circuit parameters are adjusted, the reactive power of the synchronous motors is distributed unequally. Thus, some synchronous motors are overloaded. Reactive power of the control systems fed by the individual sources is distributed equally over the synchronous motors. Reactive power factor controller parameters are selected bearing in mind the coupling effect resulting in the system stability margin narrowing up to 25-30%. In the event of the synchronous motor reactive power deficiency the system is provided with sufficient amount of the reactive power via the capacitor banks positively resulting in the multicoupled control system error improvement. Research conducted with the help of the software Matlab/Simulink and the test bench has proved the control system efficiency. Control systems developed are feasible in the industrial plants the power systems of which have asynchronous and synchronous motors.**

Ключевые слова — регулирование реактивной мощности, коэффициент реактивной мощности, система электроснабжения

I. Введение

Основной задачей электроэнергетики является своевременное обеспечение потребителей электрической энергией в необходимых объемах, требуемого качества и с минимальными потерями при ее передаче.

Выполнение этой задачи значительно упрощается при наличии на стороне электрических приемников систем управления коэффициентом реактивной мощности (КРМ) узла нагрузки, с помощью которых удается понизить тарифный коэффициент за электроэнергию до рационального уровня и получить значительный экономических эффект [1]. Поэтому разработка таких систем управления относится к актуальным проблемам.

II. Степень разработанности проблемы

При этом основной научной и практической проблемой является разработка математической модели системы электроснабжения (СЭС) с синхронными и асинхронными электродвигателями как многосвязного объекта управления КРМ и построение на ее основе рациональной системы управления.

Групповой работе синхронных машин, особенно генераторов электрических систем, уделяется достаточно большое внимание как в отечественной [2-6], так и в зарубежной литературе [7-17].

В [4] рассматривается узел нагрузки с n синхронными электродвигателями, связанными с электрической системой бесконечной мощности. Динамика этого узла описывается системой дифференциальных уравнений n-ого порядка, которая представлена в общем виде и из которой неясно, как определяются модули собственных и взаимных сопротивлений, а также дополнительные углы этих сопротивлений. В этих уравнения не отражены другие элементы узла нагрузки кроме синхронных двигателей.

В [17-20] динамика узла нагрузки рассматривается с учетом влияния линии электропередачи, силовых трансформаторов, конденсаторной батареи и асинхронных электродвигателей. Уравнения динамики не учитывают взаимовлияние синхронных электродвигателей, а управление КРМ осуществляется только изменением напряжения обмотки возбуждения синхронного электродвигателя. Поэтому в случае недостатка реактивной мощности синхронного электродвигателя погрешность многосвязной системы автоматического управления (САУ) КРМ будет недопустимо большой.

III. Постановка задачи

Проведенный краткий обзор литературных источников по построению многосвязных САУ КРМ узла нагрузки позволяет конкретизировать проблему исследований в следующей постановке:

- разработать математическую модель узла нагрузки как многосвязного объекта управления КРМ с несколькими синхронными электродвигателями и построение на ее основе многосвязной САУ КРМ узла нагрузки;
- разработать многосвязную систему с непрерывно-релейным управлением;
- провести исследование динамики многосвязных систем управления.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

IV. Математическая модель установки при управлении коэффициентом РМ и напряжением узла нагрузки

Однолинейная схема узла нагрузки с синхронными электродвигателями СД1, СД2 асинхронными электродвигателями АД1...АДn, конденсаторной батарей КБ с *l*-числом подключаемых секций, линией электропередачи ЛЭП, силовыми трансформаторами Т1, Т2 представлена на рис.1.

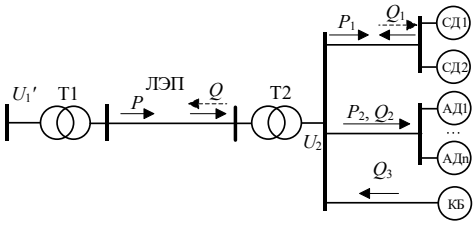


Рис. 1. Однолинейная схема узла нагрузки.

Обозначения на схеме: U_1', U_2 – напряжения на первичных обмотках трансформатора Т1 и вторичных обмотках трансформатора Т2 ; P, P_1, P_2 – активные мощности соответственно линии питания, электродвигателей СД1, СД2 и электродвигателей АД1...АДn, ; Q, Q_1, Q_2, Q_3 – реактивная мощность соответственно линии питания, синхронных электродвигателей, асинхронных электродвигателей и конденсаторной батареи.

В систему уравнений математической модели узла нагрузки входят: дифференциальные уравнения электромагнитных и электромеханических переходных процессов для следующих элементов:

- синхронных электродвигателей

$$
\begin{gathered}
x_{adi}\frac{dI_{fi}}{dt}+R_iI_{di}+x_{qi}I_{qi}=-U_2\sin\theta_i;\\
x_{di}I_{di}-x_{adi}I_{fi}+R_iI_{qi}=-U_2\cos\theta_i;\\
\frac{3}{2}x_{di}\frac{dI_{di}}{dt}+x_{fi}\frac{dI_{fi}}{dt}R_{fi}I_{fi}=U_{fi};\\
\frac{\omega_{н1}J_1}{p_{m1}}\frac{d^2\theta_1}{dt^2}+\frac{P_{am1}}{p_{m1}s_{н1}\omega_{н1}}\frac{d\theta_1}{dt}+\frac{U_2E_{q1}}{x_{d1}}\sin\theta_1+\\
+\frac{E_{q1}E_{q2}}{x_{d1}+x_{d2}}\sin(\theta_1-\theta_2)=P_{c1};\\
\frac{\omega_{н2}J_2}{p_{m2}}\frac{d^2\theta_2}{dt^2}+\frac{P_{am2}}{p_{m2}s_{н2}\omega_{н2}}\frac{d\theta_2}{dt}+\frac{U_2E_{q2}}{x_{d2}}\sin\theta_2+\\
+\frac{E_{q2}E_{q1}}{x_{d1}+x_{d2}}\sin(\theta_2-\theta_1)=P_{c2};\\
i=1,2;
\end{gathered}
\qquad (1)
$$

- алгебраические уравнения реактивной мощности синхронных электродвигателей

$$Q_{1i}=\frac{U_2}{x_{di}}\left(E_{qi}\cos\theta_i-U_2\right); \qquad (2)$$

- асинхронных электродвигателей

$$Q_2=\left(9{,}3-18{,}7\frac{U_2}{U_{02}}+10{,}5\left(\frac{U_2}{U_{02}}\right)^2\right)Q_{02}; \qquad (3)$$

- конденсаторной батареи

$$Q_3=\omega CU_2^2; \qquad (4)$$

- уравнения напряжений питания линии

$$U_2^2=U_1U_2-P\left(R_{PTL}+R_T\right)-Q\left(x_{PTL}+x_T\right); \qquad (5)$$

- и коэффициента реактивной мощности

$$tg\varphi=Q/P. \qquad (6)$$

В этих обозначениях: x_{di}, x_{qi}, x_{adi} – соответственно индуктивные сопротивления синхронных электродвигателей по продольной *d*- и поперечной *q*-осям, а также сопротивление взаимоиндукции между обмотками возбуждения и фазными обмотками статора; E_{qi} – электродвижущая сила по оси *q*, наводимая потоками обмотки возбуждения в обмотках статора; x_{fi}, R_{fi} – индуктивное и активное сопротивления обмоток статора; U_{fi} – напряжения обмоток возбуждения; J_i – моменты инерции асинхронных электродвигателей; P_{ci}, P_{ami} – соответственно статические мощности приводных механизмов и максимальные значения асинхронных мощностей синхронных электродвигателей; R_i – активные сопротивления обмоток статора синхронных электродвигателей; p_{mi} – число пар полюсов синхронных электродвигателей; s_{ni} – скольжения; $U_1=U_1'/k_{T1}k_{T2}$ – приведенное напряжение на входе питания линии; k_{T1} и k_{T2} – коэффициенты трансформации силовых трансформаторов; C – емкость КБ; I_{di}, I_{qi} – действующие значения токов синхронного двигателя по осям *d* и *q*; $\omega_н$ – синхронная частота вращения ротора; θ – внутренний угол синхронного двигателя; R_T, R_{PTL}, x_T, x_{PTL} – соответственно активные и индуктивные сопротивления трансформаторов и линии электропередачи.

Номинальная реактивная мощность конденсаторной батареи с *l*-числом секций составляет

$$Q_{03}=\sum_{j=1}^{l}Q_{3j}.$$

Линеаризуя и преобразуя уравнения (1) – (6) по Лапласу получим операторные уравнения для следующих элементов узла нагрузки:

- двух идентичных синхронных электродвигателей:

$$\Delta E_{qi}(p)=\left(\frac{1}{R_f}\Delta U_{fi}(p)+T_{Д1}p\Delta\theta_i(p)-\right.$$
$$\left.-T_{Д2}p\Delta U_2(p)\right)\frac{X_{ad}}{T_f' p+1}; \quad (7)$$

$$\Delta\theta_i(p)=\left(-\frac{k_1}{E_{q0i}}\Delta E_{qi}(p)+T_{Д1}p\Delta\theta_i(p)+\right.$$
$$\left.+k_2\Delta m(p)-\frac{k_1}{U_{02}}\Delta U_2(p)+k_{MC}\Delta\bar{\theta}_i(p)\right)W_1(p); \quad (8)$$

$$\Delta Q_i(p)=k_3\Delta U_2(p)+k_4\Delta\theta_i(p)+k_5\Delta E_{qi}(p); \quad (9)$$

где $\Delta\bar{\theta}_i(p)=\Delta\theta_2(p)$ при $i=1$, а при $i=2$ значение $\Delta\bar{\theta}_i(p)=\Delta\theta_1(p)$;

- асинхронных двигателей:

$$\Delta Q_2(p)=\Delta Q_2'(p)+\Delta Q_2''(p), \quad (10)$$

где $\Delta Q_2'(p)=Q_{2j}(p)$, $\Delta Q_2''(p)=k_7\Delta U_2(p)$;

- конденсаторной батареи:

$$\Delta Q_3(p)=\Delta Q_3'(p)+\Delta Q_3''(p) \quad (11)$$

где $\Delta Q_3'(p)=k_8\Delta l(p)$, $\Delta Q_2''(p)=k_8'\Delta U_2(p)$;

- линии питания:

$$\Delta U_2(p)=k_9\Delta P(p)+k_{10}\Delta Q(p)+k_{11}\Delta U_1(p); \quad (12)$$

$$\Delta P(p)=\Delta P_{11}(p)+\Delta P_{12}(p)+\Delta P_2(p); \quad (13)$$

$$\Delta Q(p)=\Delta Q_{11}(p)+\Delta Q_{12}(p)+\Delta Q_2''(p)+\Delta Q_3''(p); \quad (14)$$

- коэффициента реактивной мощности:

$$\Delta tg\varphi=k_{12}\Delta\theta(p)-k_{13}\Delta P(p). \quad (15)$$

Коэффициенты и постоянные времени этих уравнений:

$$k_1=\frac{U_{02}E_{q0}\sin\theta_0}{a_1x_d};\ a_1=\left(\frac{E_{q0}}{2}+U_{02}\cos\theta_0\right)\frac{E_{q0}}{x_d};$$

$$k_2=\frac{P_{эн}}{a_1};\ k_{MC}=\left(1+2U_{02}/E_{q0}\right)^{-1};$$

$$T_{Д1}=\frac{3U_{02}X_{ad}\sin\theta_0}{2\omega R_f x_d};\ T_{Д2}=\frac{x_{ad}\cos\theta_0}{\omega R_f x_d};$$

$$T_f'=\left(x_d-\frac{3X_{ad}^2}{2x_f}\right)\frac{T_f}{x_d};\ T_f=\frac{x_f}{\omega R_f};\ X_{ad}=\sqrt{3}x_{ad};$$

$$T_1=\sqrt{\frac{J}{m_{cm}M_н\cos\theta_0}};\ T_2=\frac{m_{кр}}{m_{cm}p_m s_н\omega_н\cos\theta_0};$$

$$k_3=\frac{E_{q0}\cos\theta_0-2U_{03}}{x_d};\ k_4=-\frac{U_{02}E_{q0}}{x_d}\sin\theta_0;$$

$$k_5=\frac{U_{02}\cos\theta_0}{x_d};\ k_6=\frac{U_{02}E_{q0}}{x_d};\ k_7=\frac{2,3Q_{02}}{U_{02}};$$

$$k_8=2\omega CU_{02};\ k_8'=\omega U_{02}^2;\ k_9=-\frac{R_{PTL}+R_T}{a_2};$$

$$k_{10}=-\frac{x_{PTL}+x_T}{a_2};\ k_{11}=-\frac{U_{02}}{a_2};\ a_2=2U_{02}-U_{01};$$

$$k_{12}=\frac{1}{P_0};\ k_{13}=\frac{Q_0}{P_0^2};\ k_{14}=\frac{1}{1+(k_7-k_8)k_{10}};\ k_{15}=k_{10}k_{14};$$

$$\Delta m(p)=\frac{\Delta P_c(p)}{P_{эн}}=\frac{\Delta M_c(p)}{P_{эн}};\ m_{кр}=\frac{M_{ам}}{M_{эн}}=\frac{P_{ам}}{P_{эн}};$$

$$m_{см}=\frac{M_{эм}}{M_{эн}}=\frac{P_{эм}}{P_{эн}}.$$

Уравнениям (7) – (15) соответствует структурная схема узла нагрузки (рис.2), на которой обозначены АД1, АД2 – асинхронные двигатели; БК – конденсаторная батарея; ЛП – линий питания.

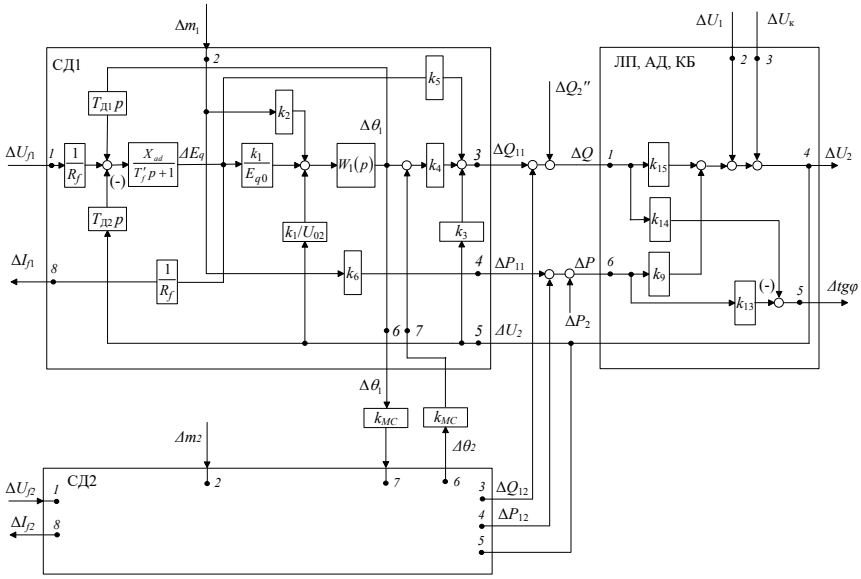


Рис. 2. Структурная схема узла нагрузки.

В буквенных обозначениях: $m_{см}$, $m_{кр}$ – соответственно значения синхронного и максимального асинхронного моментов, выраженные относительно номинального момента; $P_{эн}$, $M_{эн}$ – значения электромагнитной мощности и электромагнитного момента; ω – угловая частота напряжения сети.

Основное оборудование кустовой насосной станции (КНС): трансформаторы ТГТН 25000/110/35/6 и ТМН 4000/35/6, асинхронных двигатели марок А113-4М, А114-4М, 4АР225М4 и др. Средняя потребляемая мощность узла нагрузки: P_{av} = 2470 кВт; $Q_{ср}$ = 1434 кВАр. Значения параметров модели:

$T_1 = 0,31$ с; $\varepsilon_1 = 0,1$; $T_f' = 0,367$ с; $T_{Д1} = 162$ Ас; $E_{q0} = 11,8$ кВ; $T_{Д2} = 0,034$ с/Ом; $k_1 = -0,75$; $k_2 = 1,25$; $k_3 = -0,078$ кА; $k_4 = -1300$ кВА; $k_5 = 0,147$ кА; $k_6 = 2074$ кВА; $k_7 = 0,26$ кВА; $k_8 = 0$; $k_8' = 0$; $k_8'' = 450$ кВА; $k_9 = -0,014$ кА$^{-1}$; $k_{10} = -0,24$ кА$^{-1}$; $k_{11} = 1,04$; $\theta_0 = 36,8°$.

V. Схемы и динамические характеристики многосвязной САУ КРМ

Структурная схема САУ КРМ кустовой насосной станции с отрицательной обратной связью (ООС) по $\Delta tg\varphi$ показана на рис.3.

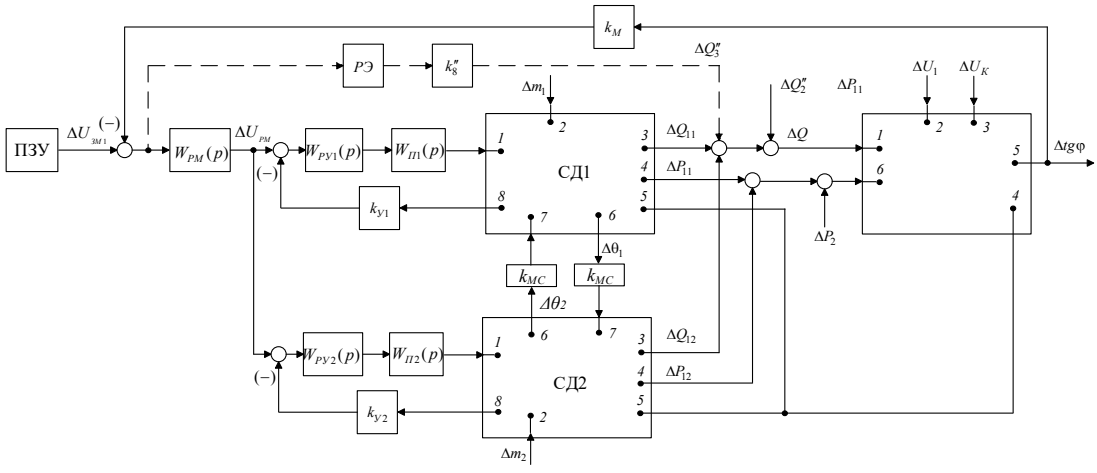


Рис. 3. Многосвязная САУ КРМ кустовой насосной станции.

Коэффициент передачи этой связи равен k_M . Каждый канал системы имеет внутреннюю ООС по току возбуждения двигателя с коэффициентом передачи k_{i1} и k_{i2} .

Передаточные функции регуляторов токов возбуждения $W_{РУ1}(p)$, $W_{РУ2}(p)$ и регулятора $W_{РМ}(p)$ получены из условия настройки сепаратных каналов и всей системы по условию модульного оптимума с последующей оценкой влияния действия межканальных связей по переменным $\Delta\theta_i(p)$ и $\Delta\theta_2(p)$.

Из за действия многоканальных связей понижается величина запаса устойчивости всей системы по фазе почти в 2 раза : с $\Delta\varphi_1 = 57°$ до $\Delta\varphi_2 = 27°$. В результате этого повышается колебательность переходного процесса регулируемой переменной $\Delta tg\varphi$ при скачкообразном изменении задающего сигнала $\Delta U_{зм}$ (рис.4) почти в 3 раза, перерегулирование усиливается с $\sigma_1 = 8\%$ до $\sigma_2 = 33\%$, а время переходного процесса с $t_1 = 0{,}08$ с до $t_2 = 0{,}13$ с.

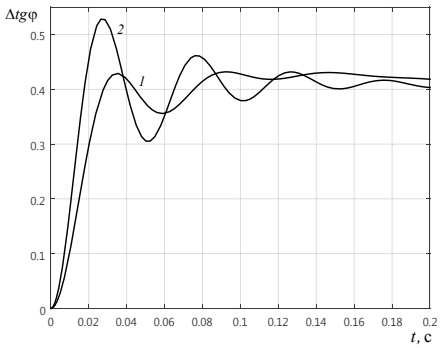


Рис. 4. Переходные характеристики $\Delta tg\varphi(t)$ при $\Delta U_{зм} = 4$ В :
1 – без учета действия межканальных связей; 2 – с их учетом

Для случая, когда реактивной мощности синхронных двигателей недостаточно для компенсации реактивной мощности асинхронных двигателей в системе управления предусмотрен дополнительный канал с конденсаторной установкой мощностью Q_3 (обозначен пунктирной линией на рис.3), которая включается релейным элементом РЭ.

При этом погрешность регулирования:

$$\delta = \frac{Q_3}{Q_{ср} - Q_3} 100\%$$

уменьшается при $Q_3 =$ 450 кВАр , $Q_{ср} =$ 1434 кВАр на $\delta =$ 45,7%.

При параллельной работе однотипных синхронных электроприводов [4] экономически целесообразно применение многосвязной САУ КРМ с общим для них возбудителем.

Достоинство такой системы – простота. Основной недостаток – неравномерность распределения реактивных мощностей между синхронными электродвигателями. Это может произойти при нагреве их обмоток возбуждения до различных температур. В результате этого из-за неравенства сопротивлений обмоток реактивная мощность у одних электродвигателей понижается, а у других – увеличивается вплоть до их перегрузки. Поэтому в случае применения такой системы управления необходимо производить оценочные расчеты на возможность перегрузки синхронных электродвигателей реактивной мощностью.

VI. Заключение

В работе рассмотрена математическая модель узла нагрузки как многосвязного объекта управления коэффициентом реактивной мощности, которая, в отличии от существующих моделей, учитывает взаимодействие электромагнитных процессов параллельно работающих синхронных электродвигателей через общий источник питания.

На базе этой модели построены многосвязные САУ КРМ индивидуальными и общим источником питания обмоток возбуждения синхронных электродвигателей и дана оценка взаимовлияния электромагнитных процессов синхронных электродвигателей на погрешность регулирования системы управления.

Дана оценка погрешности многосвязной САУ при дискретном изменении мощности конденсаторной батареи и непрерывном изменении реактивной мощности синхронного электродвигателя.

Проверка силовых регуляторов работы производилась на экспериментальном стенде с синхронными машинами модели ЕС52-4-М101, асинхронными двигателями 4А71В2У3 и 4А82А2У3, конденсаторной батареей, собранной из конденсаторов МБГО, а также частично на действующей кустовой насосной станции «Бариновская» Самаранефтегаз.

Предложенные системы управления могут быть применены на электроустановках нефтяных промыслов, газоперерабатывающих агрегатов, химических, машиностроительных и других предприятий, в системах электроснабжения которых имеются электродвигатели переменного тока.

Список литературы

[1] Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. – Москва: ЭНАС, 2009. – 454 с.

[2] Абакумов А.М. и др. Применение современного электропривода переменного тока в технологиях газовой и нефтяной промышленности. – М.: Машиностроение -1, 2009. – 132 с.

[3] Кирилин И.В., Козлов П.М. Выбор средств управления реактивной мощностью в системах электроснабжения предприятий цветной металлургии // Промышленная энергетика. 2010. № 8. С. 46-52.

[4] Петелин Д.П. Автоматическое управление синхронными электроприводами. – Москва: Энергия, 1968. – 193 с.

[5] Ершов С.В., Карницкий В.Ю. Разработка системы адаптивного регулирования компенсации реактивной мощности // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. № 8. С. 32 - 39.

[6] Пантелеев В.И., Филатов А.Н. Управление режимами реактивной мощности и напряжения промышленного предприятия. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 2005. – 125 с.

[7] Fei Wang Y., Xin Yuan Y., Chen J.,Jian Cheng Q. A dynamic reactive power compensation method of super high-power and high-voltage motor, Applied Mechanics and Materials, vol. 602-605, pp. 2828-2831, 2014.

[8] Khabdullin A., Khabdullin A., Khabdullina Z.,Khabdullina G. Mathematical model of synchronous motors for static characteristics power loss, Energy Procedia, vol. 95, pp. 487-490, 2016/09/01/ 2016.

[9] Jun Liu H., Long Wang J.,Di Bao F. Modeling of the three-phase asynchronous motor based on MATLAB/Simulink, Applied Mechanics and Materials, vol. 313-314, pp. 1042-1045, 2013.

[10] Guimarães J.M.C., Bernardes J.V., Hermeto A.E.,Bortoni E.D.C. Parameter determination of asynchronous machines from manufacturer data sheet, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 29, pp. 689-697, 2014.

[11] Cheng Q.J., Chen J., Yuan Y.X., Zhou X.S.,Deng S.J. Research on a dynamic reactive power compensation method of composite power load, Applied Mechanics and Materials, vol. 602-605, pp. 2840-2843, 2014.

[12] Joshi B.S., Mahela O.P.,Ola S.R. Reactive power flow control using Static VAR Compensator to improve voltage stability in transmission system, in 2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 2016, pp. 1-5.

[13] Campaner R., Chiandone M., Sulligoi G.,Milano F. Automatic voltage and reactive power control in distribution systems: Dynamic coupling analysis, in 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2016, pp. 934-939.

[14] Hongbo L., Biping G., Wangjun Z., Xinyi S., Haobin Y., Guangyu H. Study on reactive power optimal control of distribution systems based on hybrid control theory, in CICED 2010 Proceedings, 2010, pp. 1-6.

[15] Lakra N.S., Prakash P.,Jha R.C. Power quality improvement of distribution system by reactive power compensation, in 2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC), 2017, pp. 415-420.

[16] Zhou X., Ma Y., Gao Z.,Zhang S. Reactive power compensation in motor, in 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2017, pp. 295-299.

[17] Котенев В.И.,Кочетков В.В. Обобщенная функциональная схема система автоматического управления параметрами режима системы электроснабжения изменением реактивной мощности синхронного двигателя и статических компенсирующих устройств // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки». 2014. № 4(44). С.122-129.

[18] Котенев В.И. и др. Математическая модель синхронной машины при управлении ее возбуждением // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки». 2012. № 2 (34). С. 128-136.

[19] Котенев В.И.,Кочетков В.В. Обобщенная модель системы электроснабжения при управлении параметрами ее режима // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 5. С. 103-106.

[20] Kotenev V.I., Kochetkov V.V.,Elkin D.A. "The reactive power control of the power system load node at the voltage instability of the power supply," in 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2017, pp. 1-4.

Система автоматического регулирования реактивной мощности в узле нагрузки с управлением в функции параметров режима системы электроснабжения

Котенев В.И.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
kotenev.viiv@gmail.com

Котенев А.В.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
kotenev.av.sci@gmail.com

Зангиев С.А.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
stepanzangiev@gmail.com

***Abstract* — In order to reduce electric power and voltage losses, increase network capacity, and fulfill regulatory requirements for reactive power regulation, the reactive power factor control system has been developed with the programmatically controlled reactive power factor values during large and small daily loads. The block diagram of the system contains: power line (power line with a power transformer); asynchronous electric motors; one or several synchronous electric motors of the same type; capacitor bank; sensors of full, active and reactive power of the capacitor bank, asynchronous and synchronous electric motors; thyristor converter; regulator and programmer. The original control system scheme is considered by the re-active power factor for steady state with a nonlinear control algorithm, consisting of multiplication and division elements, as well as several non-linear links of the synchronous motor and the power line. The scheme provides a switching device, which allows considering problems of the synthesis of a system with various configurations using the synchronous motor excitation current and reactive power feedback. Non-linear links control characteristics with their transmission coefficients are determined; the values of the coefficients of the matching elements of the control system with different internal environmental protection are obtained. The linearized model of the power supply system is considered as an object of control of the reactive power factor, on the basis of which a linear control system is developed. The results of computer simulation of transient processes in the system are given, and an estimate of the control error is given. This ACS can be used at enterprises of various industries, whose power supply systems contain synchronous and asynchronous electric motors.**

Ключевые слова — регулирование реактивной мощности, коэффициент реактивной мощности, система электроснабжения

I. Введение

Современное обеспечение потребителей электрической энергией требуемого качества с минимальными потерями при её доставке является основной проблемой энергоснабжающей организации. В действительности потери составляют значительную величину, так как питающие и распределительные сети электрической системы работают с достаточно высоким коэффициентом реактивной мощности (РМ). Снижение этих потерь невозможно без использования соответствующих устройств для регулирования реактивной мощности на стороне потребителя электрической энергии.

Для стимулирования применения этих устройств установлена система надбавок и скидок к тарифу за израсходованную электрическую энергию посредством начисления повышающих или понижающих тарифных коэффициентов [1], величину которых можно изменять за счет управления коэффициентом РМ в узле нагрузки – в точке подключения системы электроснабжения (СЭС) к электрической системе.

Поэтому разработка более совершенных систем автоматического управления (САУ) реактивной мощностью, позволяющих понизить величину тарифных коэффициентов до рационального уровня, является актуальной проблемой.

II. Степень разработанности проблемы

Проблеме регулирования реактивной мощности в СЭС уделяется большое внимание, как в отечественной литературе [2-6], так и зарубежной [7-16]. Причем в установках с синхронными электродвигателями их системы автоматического регулирования возбуждения сконструированы таким образом, что обеспечивается стабилизация одной или нескольких из следующих переменных: тока обмотки возбуждения; тока статора (активного, реактивного или полного значения); угла нагрузки; коэффициента мощности или комбинации из этих величин и т.д.

В этих публикациях, как и в более поздних изданиях [17-21], не учитывается нелинейность характеристик элементов СЭС, системы управления имеют достаточно сложное конструктивное исполнение, они построены без возможного участия статических компенсирующих устройств совместно с синхронными двигателями в регулировании реактивной мощности.

III. Постановка задачи

Цель работы – повышение эффективности САУ коэффициентом РМ. Для её достижения необходимо уточнить модель узла нагрузки и на её основе построить более совершенную систему управления с учетом вышеперечисленных недостатков.

Значения коэффициентов РМ ($tg\varphi$), установленные Правительством Российской Федерации (приказ Минпромэнерго №49 от 22.02.2007г.) в зависимости от номинальных напряжений $U_н$ электрических сетей, при работе в часы больших суточных нагрузок (с 7:00 до

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

23:00) не должны превышать допустимых значений $tg\varphi_б = 0,5$, при $U_н = 110$ кВ , $tg\varphi_б = 0,4$ при $U_н = 6-35$ кВ и $tg\varphi_б = 0,35$ при $U_н = 0,4$ кВ . В часы минимальных нагрузок (с 23:00 до 7:00) их значения должны быть не менее $tg\varphi_м = 0$ для всех напряжений.

При участии потребителя электроэнергии в регулировании РМ в договоре указываются допустимые пределы регулирования $tg\varphi$: в часы больших нагрузок его значение должно поддерживаться в пределах $tg\varphi_{бн} \le tg\varphi_б \le tg\varphi_{бв}$ с погрешностью не более $\Delta tg\varphi = \Delta tg\varphi_б$ а в часы минимальных нагрузок $-tg\varphi_{мн} \le tg\varphi_м \le tg\varphi_{мв}$ с погрешностью не более $\Delta tg\varphi = \Delta tg\varphi_м$.

В этом случае временная программа задания коэффициента РМ будет иметь вид, представленный на рис. 1.

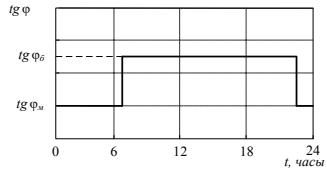


Рис. 1. Временная программ задания $tg\varphi$

IV. Математическая модель установки при управлении коэффициентом РМ и напряжением узла нагрузки

Функциональная схема САУ коэффициентом РМ с однолинейной схемой СЭС показана на рис. 2.

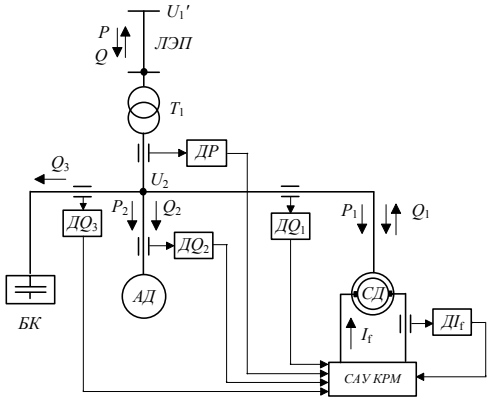


Рис. 2. Функциональная схема САУ коэффициентом РМ с однолинейной схемой СЭС

Основными элементами схемы являются: линия электропередачи (ЛЭП), трансформатор T_1, батарея конденсаторов БК, асинхронный электродвигатель АД, синхронный электродвигатель СД.

Остальные обозначения на схеме: ДР – датчик полной активной мощности; ДQ1, ДQ2, ДQ3 – датчики реактивной мощности соответственно синхронного и асинхронного электродвигателей и батареи конденсаторов; ДI$_f$ – датчик тока возбуждения; P_1, P_2, P – активные мощности синхронных и асинхронных электродвигателей и полная мощность; Q_1, Q_2, Q_3 – реактивные мощности соответственно синхронных, асинхронных электродвигателей и батареи конденсаторов; U_1' , U_2' – действующие значения напряжений соответственно в начале ЛЭП и в узле нагрузки; САУ КРМ – система автоматического управления коэффициентом реактивной мощности.

В состав уравнений математической модели СЭС входят дифференциальные уравнения электромагнитных и электромеханических процессов синхронного двигателя:

$$x_{ad}\left(I_f\right)\frac{dI_f}{dt} + RI_d + x_q I_q = -U_d; \qquad (1)$$

$$-x_d I_d - E_q\left(I_f\right) + RI_q = -U_q; \qquad (2)$$

$$\frac{3}{2}x_d\frac{dI_d}{\omega_0 dt} + x_f\frac{dI_f}{\omega_0 dt} + R_f I_f = U_f; \qquad (3)$$

$$\frac{\omega_{mn}J}{p_m}\cdot\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{P_a\left(s_1\right)}{p_m s_1\omega_{mn}}\cdot\frac{d\theta}{dt} + \frac{U_2 E_q}{x_d}sin\theta = P_n, \qquad (4)$$

и также уравнения реактивной мощности синхронного двигателя:

$$Q_1 = U_2\left(E_q cos\theta - U_2\right)\Big/ x_d \qquad (5)$$

асинхронных двигателей мощностью 20 кВт [22]:

$$Q_2 = \left(9,3-18,7\frac{U_2}{U_{02}} + 10,5\frac{U_2^2}{U_{02}^2}\right)Q_{02}, \qquad (6)$$

конденсаторной батареи:

$$Q_3 = \left(U_2/U_{02}\right)^2 Q_{03}, \qquad (7)$$

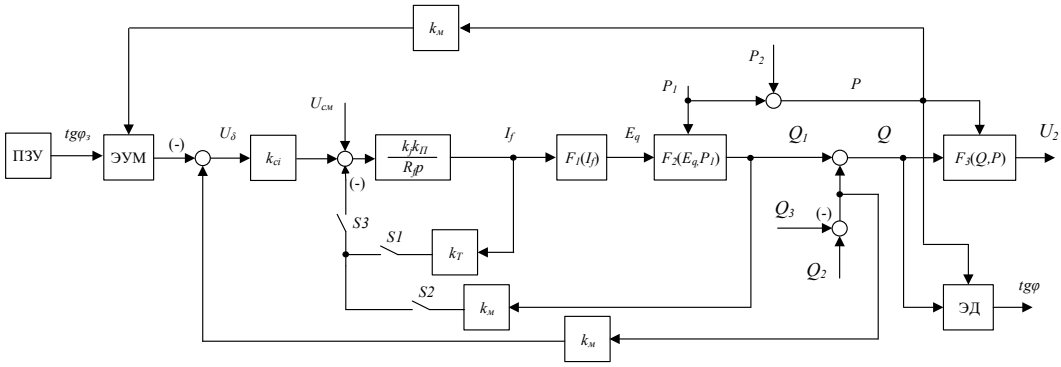


Рис. 3. САУ коэффициентом РМ в статике

и уравнения напряжения линии питания:

$$U_2 = \frac{U_1}{2} + \sqrt{\frac{U_1^2}{4} - P\left(R_л + R_m\right) - Q\left(x_л + x_m\right)}, \quad (8)$$

которое получено из решения уравнения линии электропередачи [23] при известном значении U_1.

Полные значения активной и реактивной мощности составляют:

$$P = P_1 + P_2; \quad (9)$$

$$Q = Q_2 \pm Q_1 - Q_3. \quad (10)$$

Коэффициент реактивной мощности узла нагрузки

$$tg\varphi = \frac{Q}{P} \quad (11)$$

В этих уравнениях: x_d, x_q, x_{ad} – соответственно индуктивные сопротивления по осям d и q и сопротивление взаимоиндукции между обмоткой возбуждения и фазными обмотками статора; E_q – электродвижущая сила в обмотке статора от потока обмотки возбуждения; x_f, R_f – индуктивное и активное сопротивления обмотки возбуждения; U_f, I_f – напряжение и ток обмотки возбуждения; I_d, I_q – действующие значения токов по осям d и q; R – активное сопротивление фазных обмоток статора; ω_0 – синхронное значение угловой скорости; $U_1 = U_1'/k_{mp}$ – приведенное напряжение линии электропередачи к напряжению узла нагрузки; k_{mp} – коэффициент трансформации; $P_a\left(s_1\right)$ – асинхронная мощность при скольжении равном s_1; ω_{mn} – номинальное значение угловой скорости синхронного двигателя; p_m – число пар полюсов; P_n – статическая мощность приводимого в движение механизма; θ – угол нагрузки; Q_{02}, Q_{03} – номинальные значения реактивной мощности асинхронных двигателей и конденсаторной батареи; U_{02} – номинальное значение напряжения; $R_л$, R_m, $x_л$, x_m – соответственно активные и реактивные сопротивления линии электропередачи и трансформатора; $+Q_1$ – в (10) соответствует режиму работы синхронного двигателя при потреблении реактивной мощности,. $-Q_1$ – режиму генерации реактивной мощности.

V. Характеристики и схемы нелинейных САУ коэффициентом РМ

Структурная схема САУ коэффициентом РМ в статике представлена на рис. 3.

Обозначения, принятые на схеме: $S1, S2, S3$ – ключи; k_m, $k_м$ – коэффициенты передачи датчиков тока возбуждения и мощности соответственно; k_{ci} – коэффициент передачи согласующего элемента; k_r, k_n – коэффициенты передачи регулятора и тиристорного преобразователя; p – оператор Лапласа; ЭУМ и ЭД – элементы умножения и деления.

В зависимости от положений ключей $S1, S2, S3$ система управления может иметь внутренние контуры с различными отрицательными обратными связями (ООС). При этом коэффициент передачи согласующего элемента может принимать следующие значения:

$$k_{ci} = \begin{cases} k_{c1}, \ i = 1 \ \left(\text{S3 разомк., } k_r/p = 1, \text{ без ООС}\right) \\ k_{c2}, \ i = 2 \ \left(\text{S2 и S3 замкн., S1 разомк., с ООС по } Q_1\right) \\ k_{c3}, \ i = 3 \ \left(\text{S2 и S3 замкн., S2 разомк., с ООС по } I_f\right) \end{cases}$$

Нелинейная функция $F_1\left(I_f\right) = x_{*ad}\left(I_{*f}\right) X_{adн}$ получена на основании стандартной характеристики холостого хода синхронной машины, которая приведена на рис. 4.

Относительные значения $E_{*q} = E_q / E_{qн}$ и $I_{*f} = I_f / I_{fн}$, в которых $E_{qн}$ равно номинальному

напряжению двигателя, а $I_{fн}$ – такое значение тока, при котором в режиме холостого хода синхронной машины напряжение на обмотке статора равно номинальному значению.

Остальные нелинейные функции:

$$F_2\left(E_q, P_1\right)=\left(cos\left(arcsin\frac{x_d P_n}{U_2 E_q}\right)\right)\frac{U_{02}E_{q0}}{x_d}-\frac{U_{02}^2}{x_d}; \quad (12)$$

$$F_3\left(Q,P\right)=\frac{U_1}{2}+\sqrt{\frac{U_1^2}{4}-P\left(R_л+R_m\right)-Q\left(x_л+x_m\right)}; \quad (13)$$

получены из выражений (4), (5) и (8).

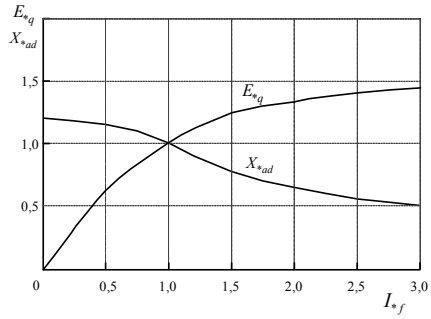


Рис. 4. Характеристики синхронной машины: $E_{*q}(I_{*f})$ – характеристика холостого хода, $x_{*ad}\left(I_{*f}\right)$ – относительные изменения сопротивлений X_{ad}.

Алгоритм функционирования системы управления

$$U_\delta = k_м\left(Q_2-Q_3\right)-k_м P tg\varphi_з$$

вытекает из выражения входного воздействия

$$tg\varphi_з=\frac{Q_2-Q_1-Q_3}{P}. \quad (14)$$

Напряжение смещения

$$U_{см}=\frac{E_{q0}R_f}{k_n x_{ad}}$$

характеризуется значением ЭДС двигателя при $Q_1=0$.

В этом случае из (5) следует

$$E_{q0}\cos\theta_0=U_{02},$$

а так как при загрузке двигателя с коэффициентом $k_з=1$, $P_{1н}=1250$ кВт согласно (4) установившееся значение угла составляет

$$\theta_0=arcsin\,\gamma,$$

где $\gamma=k_з P_{1н}x_d\big/\left(\eta_н U_{02}E_{q0}\right)$, то значение ЭДС может быть определено из решения нелинейного уравнения:

$$E_{q0}cos\left(arcsin\,\gamma\right)-U_{02}=0.$$

Значение напряжения смещения, полученное из (15), (16) при $k_з=1$, $P_{1н}=1250$ кВт, $x_d=32{,}7$ Ом, $\eta_н=0{,}958$, $U_{02}=6$ кВ, $R_f=0{,}18$ *Ом*, $E_{q0}=9{,}3$ кВ, $x_{ad}=52$ Ом, $k_n=4$ составило $U_{см}=8{,}05$ В.

Значение коэффициента передачи согласующего элемента k_{ci} может быть получено из (14), которое при

$$Q_2-Q_3-Ptg\varphi_з=Q_1;\ U_\delta=\frac{Q_1}{k_{npi}}$$

принимает вид:

$$k_{npi}=\frac{1}{k_м}.$$

Коэффициент передачи прямого канала

$$k_{npi}=\begin{cases}\dfrac{k_{c1}k_д x_{ad}}{k_T},\ i=1;\\ \dfrac{k_{c2}}{k_м},\ i=2;\\ \dfrac{k_{c3}k_n k_д x_{ad}}{R_f},\ i=3.\end{cases}$$

Тогда из (15) и (16) следует

$$k_{npi}=\begin{cases}\dfrac{k_T}{k_м k_д x_{ad}},\ i=1;\\ 1,\ i=2;\\ \dfrac{R_f}{k_м k_n k_д x_{ad}},\ i=3.\end{cases}$$

Коэффициент передачи двигателя $k_д$ получен из соотношения

$$Q_1=\frac{U_{02}}{x_d}\left(E_{q0}cos\left(arcsin\,\gamma\right)-U_{02}\right)$$

Значение $k_д$ у двигателя СТД 1250 составляет

$$k_д = \begin{cases} 0,25\ ,\ E_{q0} \geq 9,3\ \text{кВ} \\ 0,33\ ,\ E_{q0} < 9,3\ \text{кВ} \end{cases}.$$

Коэффициенты передачи согласующего элемента:

$$k_{c1} = \begin{cases} 0,35\ ,\ U_\delta \geq 0 \\ 0,26\ ,\ U_\delta < 0 \end{cases};$$

$$k_{c3} = \begin{cases} 0,25\ ,\ \ U_\delta \geq 0 \\ 0,19\ ,\ \ U_\delta < 0 \end{cases}.$$

VI. Математическая модель СЭС в приращениях и линейная САУ коэффициента РМ

Структурная схема СЭС, построенная по линеаризованным уравнениям в приращениях, показана на рис.5. Линия питания состоит из ЛЭП и трансформатора T_1 . Значения параметров элементов схемы приведены в [19-21].

На основании структурной схемы СЭС (рис.5) и линеаризованного уравнения (14) построена схема САУ коэффициентом РМ узла нагрузки, которая показана на рис.6.

Коэффициенты:

$$k_{эд} = k_м P_0;\ k_p = k_м tg\varphi_{э0}.$$

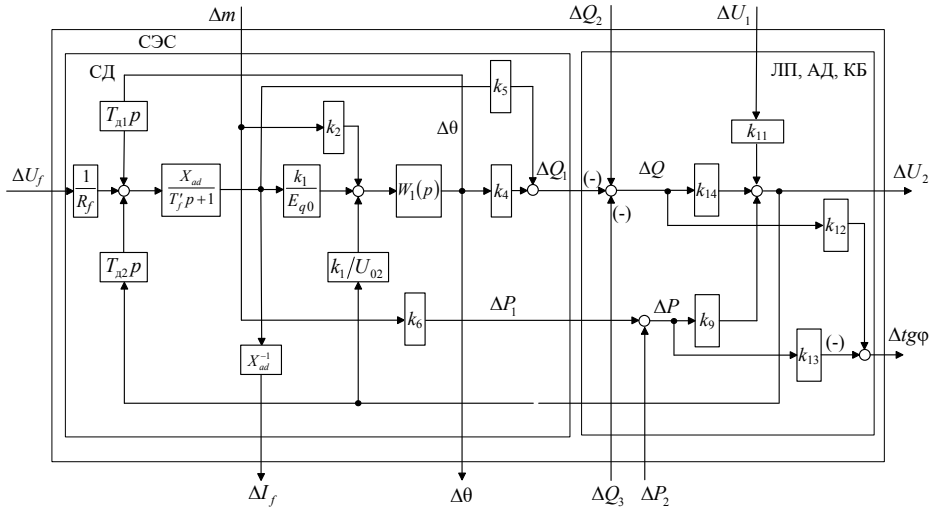


Рис. 5. Структурная схема СЭС

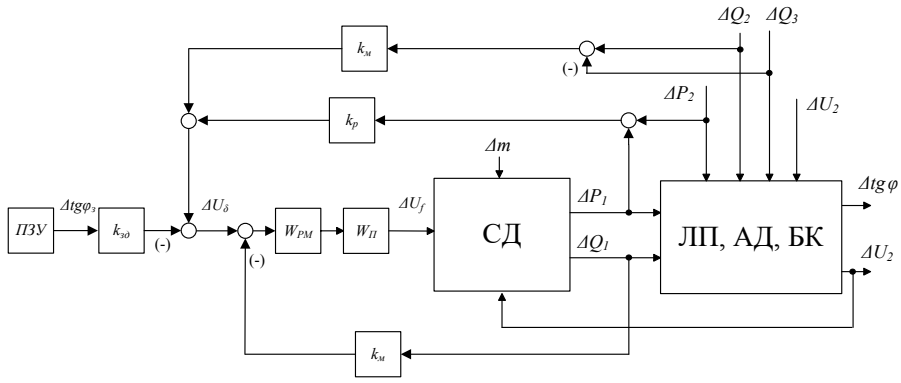


Рис. 6. Структурная схема САУ коэффициентом РМ

Регулятор $W_{рм}$ выбран из условия настройки контура регулирования величины ΔQ_1 на технический оптимум, при котором время возможной перегрузки синхронного двигателя реактивной мощностью (рис.7) будет практически минимальным – $t_{рег} \approx 0,07c$.

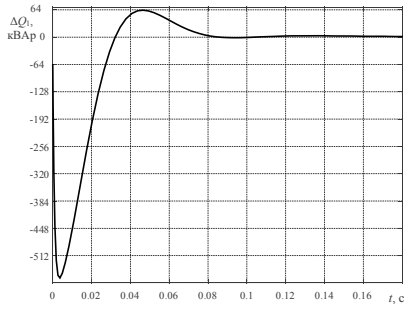


Рис. 7. Переходная характеристика при изменении напряжения в сети на $\Delta U_1 / U_{01} = 0,1$

Погрешность регулирования определяется погрешностью задающего устройства и датчиков электрической мощности. Суммарная погрешность системы управления с датчиками активной и реактивной мощности типа E849M (погрешность 1%) и нормирующими преобразователями модули НПСИ-УНТ (погрешность 0.1%) не превышает 4%.

VII. Заключение

Разработанная САУ коэффициентом РМ узла нагрузки с управляющим воздействием, сформированным в функции параметров режима системы электроснабжения, обеспечивает требуемые показатели качества управления в условиях нестабильности активной и реактивной мощности ее элементов и колебаний напряжения в сети. Погрешность в статике – менее 4%, в динамике – время регулирования менее 0.07с. Проверка основных результатов работы проводилась на экспериментальной установке с синхронной машиной модели ЕС52-4-М101.

Данная система уравнения может быть использована на установках нефтяных промыслов, нефтеперерабатывающих заводах, газоперерабатывающих станциях, машиностроительных заводах и других предприятиях, система электроснабжения которых содержит асинхронные и синхронные электродвигатели.

Список литературы

[1] Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. – Москва: ЭНАС, 2009. – 454 с.

[2] А.М. Абакумов, С.В. Алимов, В. Зипман, Л.А. Мигачева, Г.Р. Шварц. Применение современного электропривода переменного тока в технологиях газовой и нефтяной промышленности – М.: Машиностроение–1, 2009. – 132 с.

[3] Кирилин И.В., Козлов П.М. Выбор средств управления РМ в системах электроснабжения предприятий цветной металлургии // Промышленная энергетика, 2010. №8 - С.46-52.

[4] Петелин Д.П. Автоматическое управление синхронным электрическим приводом. – М.: Энергия, 1968;

[5] Ершов С.В. Карницкий В.Ю. Разработка системы адаптивного регулирования компенсации реактивной мощности // Известия Тульск. гос. ун-та. Технические науки. – 2014. – Вып. 8, С. 32-39.

[6] Пантелеев В. И., Филатов А. Н. Управление режимами реактивной мощности и напряжения промышленного предприятия // Краснояр. гос. техн. ун-т. - Красноярск : КГТУ, 2005. - 125 с.

[7] Fei Wang Y., Xin Yuan Y., Chen J.,Jian Cheng Q. A dynamic reactive power compensation method of super high-power and high-voltage motor, Applied Mechanics and Materials, vol. 602-605, pp. 2828-2831, 2014.

[8] Khabdullin A., Khabdullin A., Khabdullina Z.,Khabdullina G. Mathematical model of synchronous motors for static characteristics power loss, Energy Procedia, vol. 95, pp. 487-490, 2016/09/01/ 2016.

[9] Jun Liu H., Long Wang J.,Di Bao F. Modeling of the three-phase asynchronous motor based on MATLAB/Simulink, Applied Mechanics and Materials, vol. 313-314, pp. 1042-1045, 2013.

[10] Guimarães J.M.C., Bernardes J.V., Hermeto A.E.,Bortoni E.D.C. Parameter determination of asynchronous machines from manufacturer data sheet, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 29, pp. 689-697, 2014.

[11] Cheng Q.J., Chen J., Yuan Y.X., Zhou X.S.,Deng S.J. Research on a dynamic reactive power compensation method of composite power load, Applied Mechanics and Materials, vol. 602-605, pp. 2840-2843, 2014.

[12] Joshi B.S., Mahela O.P.,Ola S.R. Reactive power flow control using Static VAR Compensator to improve voltage stability in transmission system, in 2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 2016, pp. 1-5.

[13] Campaner R., Chiandone M., Sulligoi G.,Milano F. Automatic voltage and reactive power control in distribution systems: Dynamic coupling analysis, in 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2016, pp. 934-939.

[14] Hongbo L., Biping G., Wangjun Z., Xinyi S., Haobin Y.,Guangyu H. Study on reactive power optimal control of distribution systems based on hybrid control theory, in CICED 2010 Proceedings, 2010, pp. 1-6.

[15] Lakra N.S., Prakash P.,Jha R.C. Power quality improvement of distribution system by reactive power compensation, in 2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC), 2017, pp. 415-420.

[16] Zhou X., Ma Y., Gao Z.,Zhang S. Reactive power compensation in motor, in 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2017, pp. 295-299.

[17] Котенев В.И., Кочетков В.В. Обобщенная функциональная схема системы автоматического управления параметрами режима системы электроснабжения // Вестник СамГТУ. 2014. № 1 (41). С. 128-135.

[18] Котенев В.И., Котенев А.В., Осипов В.С., Кочетков В.В. Математическая модель синхронной машины при управлении ее возбуждением // Вестник СамГТУ. 2012. № 2 (34). С. 128-135.

[19] Котенев В.И., Кочетков В.В. «Обобщенная математическая модель узла нагрузки при управлении параметрами режимов в СЭС// Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 5. С. 103-106.

[20] .I. Kotenev, V.V. Kochetkov, D.A.Elkin, “The reactive power control of the power system load node at the voltage instability of the power supply,” SIBCON, IEEE Xplore, 2017.

[21] Kotenev V.I., Kotenev A.V., Kochetkov V.V., Elkin D.A. Electrical engineering unit for the reactive power control of the load bus at the voltage instability // Journal of Physics: Conference series. Vol. 944, 2018.

[22] Карпов Ф.Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях. – М.:Энергия, 1975. - 184 с.

[23] Лыкин А.В. Электрические системы и сети. – М.: Университетская книга, ЛОГОС, 2006. – 254 с.

Контроль расходования ресурса ГТД с учетом циклограмм фактического нагружения на основе диаграммы Ларсена — Миллера

Кривошеев И.А.
УГАТУ
РФ, Уфа
krivosh777@mail.ru

Рожков К.Е.
УГАТУ
РФ, Уфа
rke85@mail.ru

Симонов Н.Б.
УГАТУ
РФ, Уфа
sventigo@yandex.ru

***Abstract* — Considered the organization of the operation of the CCD on the technical condition. To control the development of the resource, taking into account the actual cyclograms of loading (during the flight of the aircraft, according to the results of the trend analysis of the gas compressor units, control of the GTU operation), it is proposed to use the dependence of the resource on the parameter characterizing the mode (PCM). To establish the connection of the resource with PCM, it was proposed to use the Larsen-Miller diagram, supplemented by a number of constructions, as well as the TC (throttle characteristic) of the GTE, obtained experimentally or as a result of the "factory" GTE tests.**

Ключевые слова — газотурбинный двигатель, газоперекачивающий агрегат, газотурбинная энергоустановка, контроль выработки ресурса, эксплуатация по техническому состоянию, циклограмма нагружения, трендовый анализ, диаграмма Ларсена-Миллера.

I. Введение

В настоящее время при эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД) в авиации), газотурбинных установок (ГТУ) в энергетике, газотурбинных приводов (ГТП) в судостроении и при транспортировке газа используется метод "эксплуатации по техническому состоянию" [1,2,4,5]. Это требует развития и использования методов диагностики. Однако практически нет методов контроля выработки ресурса с учетом индивидуальных особенностей циклограмм нагружения каждого экземпляра ГТД (за время каждого полета), ГТП, ГТУ при различных внешних условиях. Известно, что при эксплуатации при высоких температурах, в условиях запыленности выработка ресурса ГТД происходит быстрее, чем при эксплуатации в северных условиях. Это же касается различных полетов самолета, работы наземных или судовых силовых установок с различными программами нагружения.

II. Предлагаемое решение

В любом изделии, включая ГТД, можно выделить элементы конструкции, которые лимитируют ресурс. В ГТД это обычно рабочая лопатка [3] турбины высокого давления (РЛ ТВД), опоры роторов (чаще всего радиально упорная опора ротора ВД). Одновременно, в ГТД выделяют ПЗР- параметр, задающий режим. Чаще всего это $n_{1пр}$ - приведенная (к САУ- стандартным атмосферным условиям) частота вращения ротора низкого давления (РНД). Для ресурса РЛ ТВД основными аргументами являются $T_л$ - температура лопатки в наиболее нагруженном "критическом" сечении и n_2 - "физическая" частота ротора высокого давления (РВД). Значение $T_л$ на разных режимах определяется глубиной охлаждения θ, температурой газа в камере сгорания $T^*_Г$ и температурой охлаждающего воздуха $T^*_{охл}$, подводимого к ТВД из-за КВД (компрессора высокого давления). При этом в зависимости от способа охлаждения лопатки

$$\theta = \frac{\left(T_Г^* - T_л\right)}{\left(T_Г^* - T_{охл}^*\right)} \approx 0,3...0,6. \qquad (1)$$

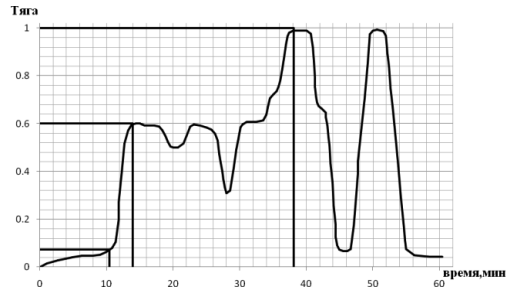


Рис. 1. Типовое изменение режимов ТРДФ за время полета истребителя

На основных режимах в диапазоне МГ...М....ПФ ("малый газ"..."максимал"..."полный форсаж") для конкретного ГТД можно полагать θ≈const. Поэтому с учетом дроссельной характеристики (ДрХ) конкретного ГТД (расчетной или полученной при ПСИ - приемо-сдаточных "заводских" испытаний) можно выявить зависимость $T=f(n_2)$, где T - ресурс (в данном случае РЛ ТВД). Величина T обычно измеряется в часах (ч). За время полета самолета, особенно фронтового истребителя во время воздушного боя, режимы работы ГТД (типа ТРДДФсм) меняются в широком диапазоне (рис.1). При этом контролируются параметры ГТД, в т.ч. выводится циклограмма изменения параметра n_2. На рис.2 приведена такая циклограмма для одного из полетов.

При этом контролируются параметры ГТД, в т.ч. выводится циклограмма изменения параметра n_2 . На рис.2 приведена такая циклограмма для одного из полетов. При этом уже в следующем полете этого же самолета или для другого самолета (дальний бомбардировщик) такая же циклограмма может иметь

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

иной вид (рис.3). Связь $T=f(n_2)$ для конкретного ГТД выявляется с учетом материала РЛ ТВД, напряжений в критическом сечении РЛ и с учетом $T_л$ - температуры лопатки. За время конкретного полета (для самолета типа дальнего бомбардировщика) циклограмма температуры ротора ТВД может иметь вид, показанный на рис.4.

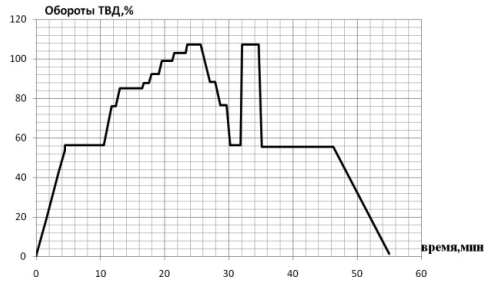


Рис. 2. Типовое изменение частоты вращения ротора ВД двигателя (АЛ-31Ф) в типовом полетном цикле истребителя-бомбардировщика (Су-27)

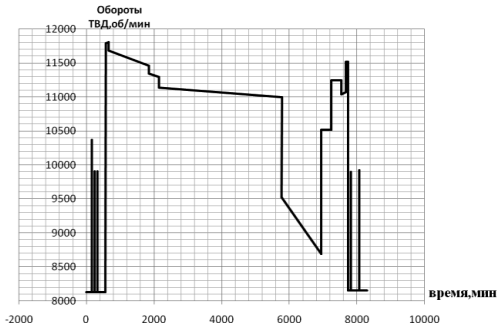


Рис. 3. Типовое изменение частоты вращения ротора ТВД в типовом полетном цикле двигателя дальнего бомбардировщика

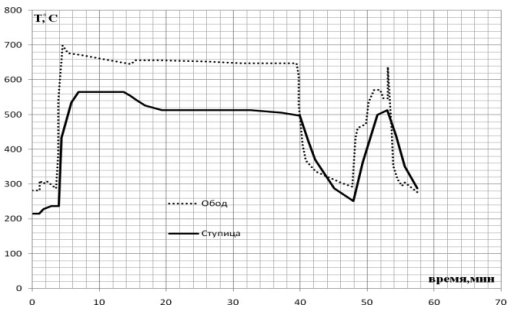


Рис. 4. Изменение температуры ротора ТВД в типовом полетном цикле двигателя дальнего бомбардировщика

В каждом из рассмотренных случаев расходование ресурса R определяется выражением: $d\delta R = d\tau/T(n_2)$ и $\delta R = \int d\tau/T(n_2)$, где δR - доля выработанного ресурса (в часах) за очередной полет (от общего ресурса), τ - текущее время полета (измеряется в с. или ч.). Если время полета, за который выработана доля δR составляет Δτ, то общий ресурс (при таком же характере нагружения) оценивается значением $R=\Delta\tau/\delta R$. Исчерпанию ресурса соответствует $\delta R = 1$ (или $\delta R = 100\%$).

Для установления связи Т- ресурса РЛ ТВД с n_2 - частотой вращения ротора ВД $T=f(n_2)$ для конкретного ГТД предлагается использовать диаграмму Ларсена-Миллера [2] с рядом дополнительных построений. Такая диаграмма (рис.5) позволяет для конкретного материала РЛ ТВД связать допустимый предел длительной прочности $\sigma_{дл}$, температуру лопатки $T_л$ и ресурс рабочей лопатки ТВД.

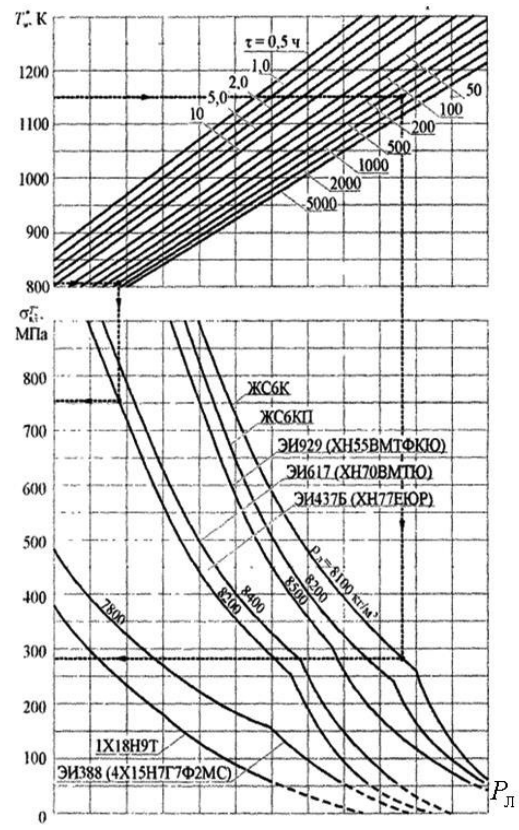


Рис. 5. Зависимость предела длительной прочности $\sigma_{дл}$ жаропрочных материалов лопаток турбин ГТД от температур и ресурса

На диаграмме (рис.5) для конкретного ГТД для заданного ресурса Т на конкретном режиме могут быть отмечены (например для взлетного режима "М" или "ПФ") точки, соответствующие значениям $T_{лм}$ и $\sigma_{дл_м}$. Так например, в [6] указано, что на режиме "м" (максимальный для взлетных условий) в наиболее нагруженном сечении пера лопатки ТВД экспериментально замеренное распределение температуры соответствует приведенному на рис.6. Видно, что в опасной точке $T_{лм}$ =1035К.

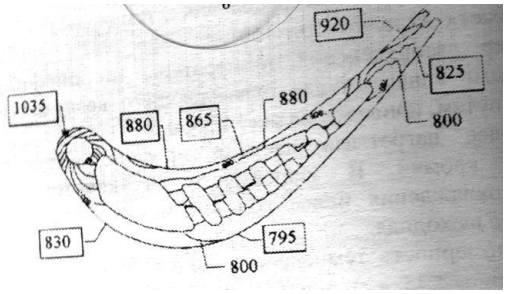


Рис. 6. Распределение температуры вдоль профиля пера лопатки ТВД в наиболее нагруженном сечении на режиме "м" (максимал)

Кроме того, там же указано, что для системы охлаждения рабочей лопатки ТВД в этом двигателе глубина охлаждения θ составляет θ=0,4...0,6. С учетом того, что на режиме "м" у этого двигателя температура перед СА турбины составляет $T_г^*$=1650К заторможенная температура в относительном движении перед рабочей лопаткой ТВД

$$T_w^* = T_\Gamma^* + \frac{(w_1^2 - c_1^2)}{2C_p} \approx T_\Gamma^* - \frac{c_{1u}^2}{2C_p}, \qquad (2)$$

где c_1 - скорость в абсолютном движении, w_1 - скорость в относительном движении, C_p - теплоёмкость рабочего тела, T_w^* - заторможенная температура в относительном движении.

Полагая $\lambda_{c1u}\approx 1$ с учетом

$$c_{1u} = \sin\alpha_1 \sqrt{\frac{2k}{k+1} R} \qquad (3)$$

$$C_p = \frac{k}{k-1} R \qquad (4)$$

имеем

$$T_w^* = T_\Gamma^* (1 - \sin\alpha_1^2 \frac{k-1}{k+1}), \qquad (5)$$

где α_1 - угол входа потока в абсолютном движении, k - показатель адиабаты, R - универсальная газовая постоянная.

При k≈1,33 и α_1=20° это дает T_w^*=1622К.

Поскольку

$$\theta = \frac{\left(T_w^* - T_{лм}\right)}{\left(T_w^* - T_{охл}^*\right)} \qquad (6)$$

то

$$T_{лм} = T_w^* - \theta(T_w^* - T_{охл}^*). \qquad (7)$$

Полагая θ≈0,5 и $T_{охл}^*$=500К получим $T_{лм}$ =1061 К.

Это достаточно близко к приведенным экспериментальным значениям. Для последующего важно, что на режиме "м" частота вращения ротора ВД составляет n_2=13300 об/мин. Для построения дополнительных шкал $T_Г^*$ (параллельно шкале $T_л$) и n_2 (параллельно шкале $\sigma_{дл}$) используются условия линейной зависимости: $T_Г^*$ -288К=$const_1 \cdot T_л$ -288К и $n_2 = const_2 \cdot \sqrt{\sigma}$.

Для ТРДДФ АЛ-31Ф (устанавливаемого на истребителе-бомбардировщике Су-27) такое дополнительное построение приведено на рис.8. Из ДрХ ГТД (рис.7) выделяется зависимость температуры газов $T_г^*$ от частоты вращения ротора высокого давления (ТВД) $T_г^*=f(n_2)$. На рис. 7 значения $T_г^*$ указаны в К, значения в % (где значению 100% соответствует n_2=13340 об/мин).

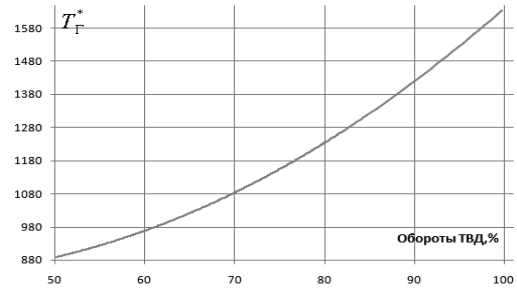


Рис. 7. Зависимость (в рамках ДрХ) температуры газов Тг* от частоты вращения ротора высокого давления (ТВД) Тг*=f(n2) для ТРДДФсм АЛ-31Ф

Это позволяет на диаграмме (рис.8) построить линию L (рис.7). Она характеризует рабочие точки ДрХ двигателя в данных координатах. Вдоль линии L определяется искомая зависимость (рис.9) ресурса Т от n_2 - частоты вращения ротора ВД $T=f(n_2)$ для данного ГТД (АЛ-31Ф). В свою очередь это позволяет организовать контроль выработки ресурса с учетом фактических циклограмм нагружения ГТД за каждый полет или за все время эксплуатации. При этом может аналогичным образом контролироваться выработка ресурса не только РЛ ТВД, но и подшипников и других элементов конструкции, лимитирующих ресурс двигателя.

Такая зависимость позволяет по введенному выше алгоритму $\delta R=\int d\tau/T(n_2)$ получить график (рис.10) выработки ресурса за время очередного полета (рис.2). Здесь τ - текущее время полета. В данном случае за время полета доля выработанного ресурса δR=0,00101079.

Общий межремонтный ресурс двигателя (если характер нагружения сохранится), составит R=Δτ/δR=1ч/0,00101079=981,6322 ч, где Δτ=1 ч - время рассмотренного полета Су-27. При этом величина выработанного ресурса за данный полет (в часах) составляет ΔR= R·δR=1500*0,00101079=1,52ч.

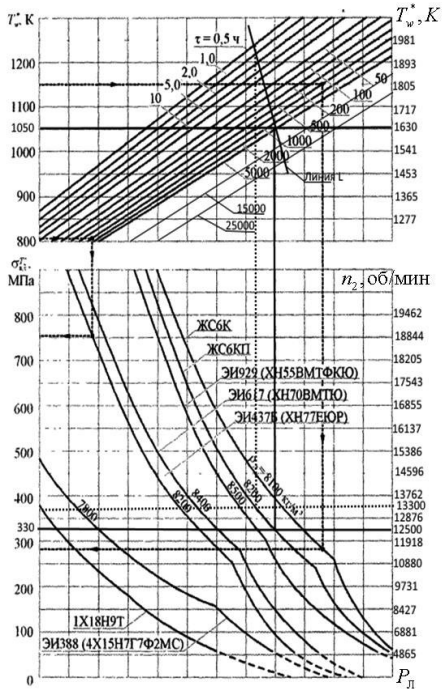


Рис. 8. Построение ЛРР для определения связи ресурса РЛ ТВД из сплава ЖС-6КП с температурой газа и частотой вращения ротора ВД в ТРДДФсм АЛ-31Ф

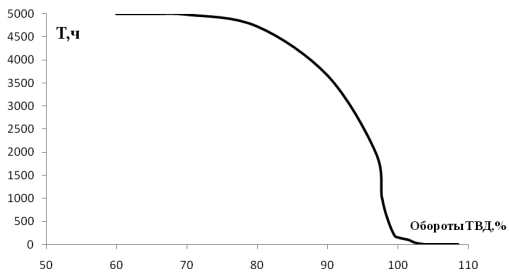


Рис. 9. Зависимость ресурса Т от n_2 - частоты вращения ротора ВД $T=f(n_2)$ для ТРДДФсм АЛ-31Ф

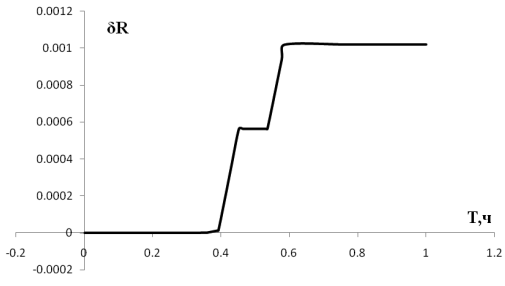


Рис. 10.График расходования ресурса δR(τ) ГТД (АЛ-31Ф) за время полета τ для циклограммы изменения $n_2(\tau)$, представленной на рис.2

Аналогичным образом может быть установлена зависимость ресурса Т других узлов и деталей, лимитирующих ресурс ГТД, в т.ч. подшипника в опоре (например в передней радиально-упорной опоре ротора НД от n_1 или ВД от n_2). В этом случае по предложенному алгоритму для конкретной циклограммы $n_1(\tau)$ или $n_2(\tau)$ за время полета может быть определена циклограмма и величина выработки ресурса соответствующего подшипника выделенной опоры. Предложенный алгоритм позволяет организовать контроль выработки ресурса каждого из наиболее ответственных узлов и деталей в составе двигателя за время отдельных полетов и в течение жизненного цикла двигателя.

Это позволяет для каждого изделия с учетом фактических условий эксплуатации индивидуально определять моменты проведения профилактик, ремонтов и момента снятия с эксплуатации.

III. Заключение

Таким образом показано, что предложенный способ использования диаграмма Ларсена-Миллера с рядом дополнительных построений позволяет организовать контроль выработки ресурса лопаток ТВД с учетом циклограмм нагружения двигателя за время каждого полета и в рамках жизненного цикла двигателя. Аналогичным образом может быть организован контроль выработки ресурса других элементов в составе ГТД (подшипников опор и т.д.).

Список литературы

[1] Кривошеев И.А., Кожинов Д.Г. Развитие методов моделирования и автоматизированного проектирования газотурбинных двигателей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение, № 5-3(47), 2014. С. 9-18.

[2] Емин О.Н., Карасев В.Н., Ржавин Ю.А. Выбор параметров и газодинамический расчет осевых компрессоров и турбин авиационных ГТД Учебное пособие под ред. проф. Ю.А. Ржавина Рекомендовано УМО в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Авиа и ракетостроение», специализации «Авиационные двигатели и энергетические установки». Москва. Издательство МАИ. 2003 г.

[3] Патент РФ, МПК F01D № 2467177 Способ изготовления интегрального блиска с неохлаждаемыми рабочими лопатками для газотурбинного двигателя и интегральный блиск. Приоритет 15.06.2011. опубликовано 20.11.2012. Бюл. № 32.

[4] Кривошеев И.А., Суханов А.В., Симонов Н.Б. Метод диагностики газотурбинных приводов в составе газоперекачивающих агрегатов. Международный научно - исследовательский журнал "Успехи современной науки". №11 , Том 5, 2016 год.

[5] Способ оценки технического состояния газотурбинного двигателя. В.В.Куприк, Ю.Н.Балабан, И.А.Хотеенков - ОКБ им. А.Люльки, филиал ПАО "УМПО" - Газотурбинные технологии, июль-август 2016, с.32-34.

[6] Конструкция основных узлов авиационных ГТД: учебное пособие/ В.Ф.Харитонов, Б.К.Галимханов - Уфа, Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. - 2015. - 237 с.

[7] Кривошеев И.А., Рожков К.Е., Симонов Н.Б. Применение метода параметрической диагностики с использованием комплексных показателей для оценки состояния газотурбинного привода в составе газоперекачивающего агрегата. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. № 50. С. 46-57.

[8] 8. Krivosheev I.A., Rozhkov K.E., Simonov N.B. Complex diagnostic index for technical condition assessment for GTE. Procedia Engineering Сер. "International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017" 2017. С. 176-181.

Колебания пластины при тепловом ударе на её внешних поверхностях

Кудинов И.В.
Кафедра «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Самара, Россия
igor-kudinov@bk.ru

Стефанюк Е.В.
Кафедра «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Самара, Россия
stef-kate@yandex.ru

Гаврилова Т.Е.
Кафедра «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Самара, Россия
totig@yandex.ru

Максименко Г.Н.
Кафедра «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Самара, Россия
totig@yandex.ru

Михеева Г.В.
Кафедра «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Самара, Россия
totig@yandex.ru

***Abstract* — Представлена математическая модель колебаний пластины при тепловом ударе на её внешних поверхностях с учётом пространственно – временной нелокальности в задачах теплопроводности и динамической термоупругости. Нелокальность учитывалась использованием при выводе уравнений теплопроводности и динамической термоупругости модифицированных формул законов Фурье и Гука, включающих релаксационные слагаемые. Показано, что при тепловом ударе на внешних поверхностях в пластине возникают высокочастотные гармонические колебания, связанные с её периодическим сжатием и расширением.**

Ключевые слова — динамическая термоупругость, точное аналитическое решение, пространственно – временная нелокальность, тепловой удар, гармонические колебания, коэффициенты релаксации.

I. Введение

При решении задач термоупругости в квазистатической постановке скорость изменения температуры во времени не учитывается, то есть напряжения определяются в данный конкретный момент времени, исходя из пространственного распределения температуры. В динамических задачах время приобретает смысл независимой переменной и, в связи с чем, в уравнениях термоупругости появляются инерционные члены, учитывающие изменение напряжений во времени. Получаемые таким путем уравнения являются гиперболическими (волновыми) [1 – 8, 14 – 21]. Их решения описывают колебательные процессы изменения напряжений во времени в каждой точке пространства. То есть напряжения периодически изменяют свой знак, достигая максимальных значений в центре пластины (при симметричной тепловой нагрузке). Наряду с определением термических напряжений большой практический интерес представляет нахождение динамических перемещений в краевых задачах с учётом релаксационных свойств материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18 – 38 – 00029 мол_а.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

II. Математическая постановка задачи

В работах [9 – 10] приводятся результаты разработки математических моделей динамической термоупругости с учётом релаксационных явлений в температурной задаче. В работе [11] дана модель в которой учитывается локальная неравновесность, как в температурной, так и в упругой задачах. Математическая постановка задачи в данном случае имеет вид

$$\frac{\partial^2\sigma}{\partial\xi^2}+\mathrm{Fo}_1\frac{\partial^3\sigma(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi^2\partial\mathrm{Fo}}-\frac{\partial^2\sigma(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\mathrm{Fo}^2}-\mathrm{Fo}_3\frac{\partial\sigma(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\mathrm{Fo}}=$$

$$=\mathrm{Fo}_2\frac{\partial^3\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi^2\partial\mathrm{Fo}}+\frac{\partial^2\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\mathrm{Fo}^2}+\mathrm{Fo}_3\frac{\partial\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\mathrm{Fo}}$$

$$\left(\mathrm{Fo}>0;\quad 0<\xi<1;\quad 0\le\Theta\le 1\right) \tag{1}$$

$$\sigma(\xi,0)=0\,; \tag{2}$$

$$\frac{\partial\sigma(\xi,0)}{\partial\mathrm{Fo}}=0\,; \tag{3}$$

$$\sigma(0,\mathrm{Fo})=\sigma(1,\mathrm{Fo})=0\,, \tag{4}$$

где $\Theta=\dfrac{T-T_w}{\Delta T}$; $\mathrm{Fo}=\dfrac{ct}{2\delta}$; $\Delta T=T_0-T_w$; $\sigma=\dfrac{\sigma_x(1-2\nu)}{2E\Delta T}$; $\xi=\dfrac{x}{2\delta}$; Θ, ξ, Fo, σ – соответственно безразмерные температура, координата, время, напряжение; T, x, t, σ_x – соответствующие размерные величины указанных параметров; δ – толщина пластины; c – скорость упругой волны (скорость звука в теле);

T_0 – начальная температура; T_w – температура стенки при $x=0$ и $x=\delta$; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости $\mathrm{Fo}_1 = c(\tau_2 - \tau_1 E/(c^2\rho))/(2\delta)$, $\mathrm{Fo}_2 = 0{,}5\tau_1 E/(\delta\nu\rho)$ – безразмерные коэффициенты релаксации; ρ – плотность; τ_1, τ_2 – коэффициенты релаксации; $\mathrm{Fo}_3 = 2\beta\delta/c$ – безразмерный коэффициент сопротивления среды; β – коэффициент сопротивления.

Если положить $\mathrm{Fo}_1 = \mathrm{Fo}_2 = \mathrm{Fo}_3 = 0$, то задача (1) – (4) приводится к классической задаче динамической термоупругости [1 – 5, 13, 22].

Температурная функция $\Theta(\xi, \mathrm{Fo})$ задачи (1) – (4) находится из решения следующей задачи теплопроводности

$$\frac{\partial\Theta(\xi,\mathrm{Fo}_\tau)}{\partial\mathrm{Fo}_\tau} + \mathrm{Fo}_r\frac{\partial^2\Theta(\xi,\mathrm{Fo}_\tau)}{\partial\mathrm{Fo}_\tau^2} =$$

$$= \frac{\partial^2\Theta(\xi,\mathrm{Fo}_\tau)}{\partial\xi^2} + \mathrm{Fo}_r\frac{\partial^3\Theta(\xi,\mathrm{Fo}_\tau)}{\partial\xi^2\partial\mathrm{Fo}_\tau}; \qquad (5)$$

$$(\mathrm{Fo}_\tau > 0;\ 0 < \xi < 1)$$

$$\Theta(\xi,0) = 1; \qquad \partial\Theta(\xi,0)/\partial\mathrm{Fo}_\tau = 0; \qquad (6)$$

$$\Theta(0,\mathrm{Fo}_\tau) = \Theta(1,\mathrm{Fo}_\tau) = 0, \qquad (7)$$

где $\mathrm{Fo}_\tau = at/\delta^2$ – безразмерное время температурной задачи; $\mathrm{Fo}_r = a\tau_r/\delta^2$ – безразмерный коэффициент релаксации; τ_r – коэффициент релаксации в задаче теплопроводности; a – коэффициент температуропроводности.

В работе [12] приводится точное аналитическое решение задачи (5) – (7), имеющее вид

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) = \sum_{k=1}^{\infty}\left[C_{1k}\,exp\,(z_{1k}\,\mathrm{Fo}_\tau) + C_{2k}\,exp\,(z_{2k}\,\mathrm{Fo}_\tau)\right]\times$$

$$\times\cos\left((r\pi/2)(1-2\xi)\right), \qquad (8)$$

где $z_{1k} = -\mu_k$; $\mu_k = r^2\pi^2$; $z_{2k} = -1/\mathrm{Fo}_r$; $C_{1k} = -A_1 z_{2k}$; $C_{2k} = A_1 z_{1k}$; $r = 2k-1$; $A_1 = 4\sin(r\pi/2)\left[r\pi(z_{1k}-z_{2k})\right]^{-1}$.

Решение вида (8) используется в правой части уравнения (1) путём непосредственной подстановки этого решения в данное уравнение и определения соответствующих производных. Следовательно, правая часть уравнения (1) после определения производных от соотношения (8) представляет свободный член, зависящий от координаты ξ и времени Fo.

Используя метод разделения переменных, в работе [11] получено следующее точное аналитическое решение задачи (1) – (4)

$$\sigma(\xi,\mathrm{Fo}) = \sum_{k=1}^{\infty}\left[(C_{1nk}\mathrm{e}^{-\nu_{1k}\mathrm{Fo}} + C_{2nk}\mathrm{e}^{-\nu_{2k}\mathrm{Fo}}) -\right.$$

$$\left.-(A_2H_1\mathrm{e}^{z_{1k}m\mathrm{Fo}} + BH_2\mathrm{e}^{z_{2k}m\mathrm{Fo}})/(H_1H_2)\right]\times$$

$$\times cos\left(r\frac{\pi}{2}(1-2\xi)\right) \qquad (9)$$

где z_{1k}, z_{2k} – собственные числа температурной задачи; ν_{1k}, ν_{2k} – собственные числа термоупругой задачи; C_{1k}, C_{2k} – константы интегрирования, определяемые из начальных условий (2), (3); $m = 2a/(c\delta)$;

$H_1 = C_{1k}z_{1k}(z_{1k} + \mathrm{Fo}_3 - \mu_k\mathrm{Fo}_2)$;

$H_2 = C_{2k}z_{2k}(z_{2k} + \mathrm{Fo}_3 - \mu_k\mathrm{Fo}_2)$;

$A_2 = -mC_{1k}z_{1k}(\mu_k\mathrm{Fo}_2 - mz_{1k} - \mathrm{Fo}_3)$;

$B = -mC_{2k}z_{2k}(\mu_k\mathrm{Fo}_2 - mz_{2k} - \mathrm{Fo}_3)$;

$\nu_{1k,2k} = 0{,}5(\mathrm{Fo}_4 \pm \sqrt{\mathrm{Fo}_4^2 - 4\mu_k})$; $\mathrm{Fo}_4 = \mathrm{Fo}_1\mathrm{Fo}_2\mu_k$.

III. Анализ результатов исследования

Распределение напряжений, найденное по формуле (9), приведено на рис. 1, 2. Из их анализа следует, что при неучёте релаксационных свойств материалов $(\mathrm{Fo}_1 = \mathrm{Fo}_2 = 0)$ напряжения изменяются скачкообразно с течением времени, периодически изменяя свой знак. Учёт релаксационных свойств приводит к сглаживанию скачков и изменение напряжений приобретает вид гармонических колебаний.

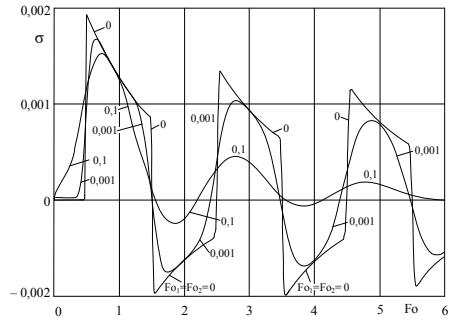


Рис. 1. Распределение напряжений в точке $\xi = 0{,}5$ при различных значениях $\mathrm{Fo}_1 = \mathrm{Fo}_2$ и при $\mathrm{Fo}_3 = 0{,}11$; $m = 0{,}0011$; $\mathrm{Fo}_r = 0{,}001$; $n = 100$ (число членов ряда (9))

По известному напряжению перемещения могут быть найдены из формулы закона Гука

$$\sigma_x = E\partial u/\partial x. \qquad (10)$$

Обозначив $\bar{u} = u/\delta$, с учётом ранее введенных обозначений для σ и ξ соотношение (10) в безразмерном виде будет

$$d\bar{u} / d\xi = \sigma(\xi, \mathrm{Fo})\eta, \qquad (11)$$

где $\eta = 2\alpha\Delta T /(1-2\nu)$ – безразмерный комплекс.

Интегрируя уравнение (11), находим

$$\bar{u}(\xi,0) = \eta\int \sigma(\xi, \mathrm{Fo})d\xi + C, \qquad (12)$$

где C – константа интегрирования, определяемая из начальных условий $\sigma(\xi,0) = 0$; $\bar{u}(\xi,0) = \delta$. Отсюда $C = \delta$.

Результаты расчётов по формуле (12) приведены на рис. 2, 3. Из их анализа следует, что наблюдается периодическое изменение перемещений относительно центра симметрии $\xi = 0{,}5$, где перемещения равны нулю. С течением времени перемещения периодически изменяют знак и, следовательно, происходит пульсационное изменение толщины пластины в результате воздействия тепловой нагрузки, приложенной на её торцах.

Отметим, что при $\mathrm{Fo}_1 = \mathrm{Fo}_2 = 0$, то есть, когда не учитываются релаксационные свойства среды, на кривых колебаний отмечается перемещающийся по координате ξ во времени излом, связанный с отсутствием релаксационных слагаемых в формуле закона Гука. При коэффициенте сопротивления равном нулю $(\mathrm{Fo}_3 = 0)$ наблюдаются незатухающие колебания (рис. 2).

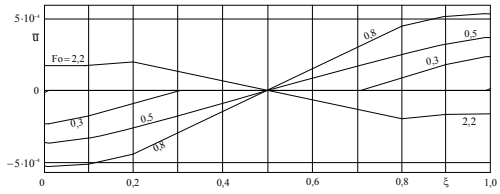


Рис. 2. Изменение перемещений в пластине. $\mathrm{Fo}_1 = \mathrm{Fo}_2 = \mathrm{Fo}_3 = 0$; $\mathrm{Fo}_r = 0{,}0012$; $m = 0{,}0001$; $n = 150$ (число членов ряда (9))

При учёте сопротивления и релаксационных свойств среды наблюдаются высокочастотные гармонические затухающие колебания, при которых пластина сжимается и расширяется относительно неподвижного центра симметрии (рис. 3).

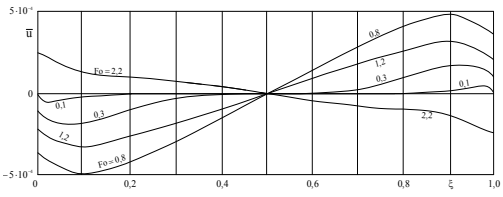


Рис. 3. Изменение перемещений в пластине. $\mathrm{Fo}_1 = \mathrm{Fo}_2 = 0{,}011$; $\mathrm{Fo}_3 = 0{,}11$; $\mathrm{Fo}_r = 0{,}0012$; $m = 0{,}0001$; $n = 150$

IV. ВЫВОДЫ

1) Используя точное аналитическое решение динамической задачи термоупругости, найдены температурные напряжения в пластине при тепловом ударе (граничные условия первого рода) на её внешних поверхностях с учётом локальной неравновесности процессов теплопроводности и динамической термоупругости.

2) Показано, что воздействие теплового удара на внешних поверхностях пластины приводит к возникновению волновых изменений перемещений и напряжений, приводящих к высокочастотным гармоническим колебаниям вследствие периодического сжатия и расширения пластины относительно центра её тепловой симметрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Даниловская В.И., Зубчанинова В.А. Температурные поля и напряжения, возникающие в пластинке вследствие потока лучистой энергии // Прикладная механика. Отделение математики, механики и кибернетики АН УССР. 1968. Т. 4. Вып. 1. С. 103 – 110.

[2] Даниловская В.И. Тепловые волны // Прикладная механика. Отделение математики, механики и кибернетики АН УССР. 1968. Т. 1. Вып. 11. С. 126.

[3] Карташов Э.М., Кудинов В.А. Аналитическая теория теплопроводности и прикладной термоупругости. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. 656 с.

[4] Боли Э., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. М.: Мир, 1964. 517 с.

[5] Коваленко А.Д. Введение в термоупругость. Киев: Наукова думка, 1965. 202 с.

[6] Семерак Ф.В., Борисенко О.И. Динамическая задача термоупругости для бесконечной пластинки // Математические методы и физико – механические поля. Сб. науч. тр. Киев: Наукова думка, 1977. Вып. 6. С. 61 – 63.

[7] Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения. М.: Физматгиз, 1963.

[8] Гавдзинский В.Н., Мальцев Д.В. Динамическая задача термоупругости для полого цилиндра // Инженерно – физический журнал. 1971. Т. XXI, № 1. С. 145 – 151.

[9] Кудинов И.В., Кудинов В.А. Определение динамических напряжений в пластине на основе точного аналитического решения гиперболического уравнения теплопроводности // Инженерно – физический журнал. 2015. Т. 88, № 2. С. 386 – 392.

[10] Кудинов И.В., Кудинов В.А. Задачи динамической термоупругости на основе аналитического решения гиперболического уравнения теплопроводности // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53, №4. С. 551 – 555.

[11] Кудинов И.В., Кудинов В.А. Математическая модель локально – неравновесной динамической термоупругости // Тезисы докладов и сообщений XV Минского международного форума по тепло – и массообмену. Минск. Институт тепло – и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. Т. 2. С. 379 – 383.

[12] Кудинов В.А., Кудинов В.И. Методы решения параболических и гиперболических уравнений переноса тепла, массы, импульса. М.: Ленанд, 2017. 336 с.

[13] Sudenkov Yu.V., Zimin B.A. Effect of «the thermal piston» in a dynamic thermoelastic problem // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, Vol. 85, pp. 781–786.

[14] Guo S.L, Wang B.L. Thermal shock fracture of a cylinder with a penny-shaped crack based on hyperbolic heat conduction // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, Vol. 91, pp. 235–245.

[15] Yang Yu-Ching, Chen Wen-Lih, Chou Huann-Ming, Salazar Jose Luis Leon. Inverse hyperbolic thermoelastic analysis of a functionally

graded hollow circular cylinder in estimating surface heat flux and thermal stresses // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, Vol. 60, pp. 125–133.

[16] Jiang Hao-Jie, Dai Hong-Liang. Analytical solutions for three-dimensional steady and transient heat conduction problems of a double-layer plate with a local heat source // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, Vol. 89, pp. 652–666.

[17] Zhang Hengliang, Kim Taehwan, Choi Geehong, Hee Cho Hyung. Ther-moelastic damping in micro- and nanomechanical beam resonators considering size effects // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, Vol. 103, pp. 783–790.

[18] Berezovski A., Berezovski M. Influence of microstructure on thermoelastic wave propagation // Acta Mech, 2013, Vol. 224(11), pp. 2623–2633.

[19] Sweilam N.H, Abou Nasan M.M. Numerical solutions of a general coupled nonlinear system of parabolic and hyperbolic equations of thermoelasticity // The European Physical Journal Plus, 2017, 132:212.

[20] Ostoja-Starzewski M. Viscothermoelasticity with finite wave speeds: thermomechanical laws // Acta Mech, 2014, Vol. 225, pp. 1277–1285.

[21] Najafabadi M.M., Ahmadian M.T., Taati E. Effect of thermal wave propagation on thermoelastic behavior of functionally graded materials in a slab symmetrically surface heated using analytical modeling // Composites Part B: Engineering, 2014, Vol. 60, pp. 413–422.

[22] Edfawy E. Thermal stresses in a non-homogeneous orthotropic infinite cylinder. Structural Engineering and Mechanics, 2016, Vol. 59, Is. 5, pp. 841–852, 2016.

Математическое моделирование процессов секвестирования антропогенных продуктов сгорания углей на тепловых электростанциях

Кузнецов Г.В.
НИ ТПУ
г. Томск, Россия
marisha@tpu.ru

Янковский С.А.
НИ ТПУ
г. Томск, Россия
jankovsky@tpu.ru

Сыродой С.В.
НИ ТПУ
г. Томск, Россия
ssyrodoy@yandex.ru

***Abstract* — a mathematical model of heat and mass transfer processes and physicochemical transformations in the wet coal particle during the period of thermal preparation for combustion has been developed. A numerical analysis of the processes of nitrogen oxides sequestering has been conducted during the interaction of intermediate products of thermal decomposition of coal with water vapor with using the model. The possibility of partial suppression of the process of anthropogenic oxides at the initial stage of coal combustion has been established.**

Ключевые слова — математическое моделирование, угли, горение, антропогенные оксиды, секвестирование, пары воды, термохимическое взаимодействие.

I. Введение

По результатам экспериментальных исследований установлено, что при сжигании смесей длиннопламенного и тощего углей с отходами лесопиления снижение доли оксидов серы и азота в продуктах сгорания таких «смесевых топлив» составляет до 60% [1]. Аналогичные результаты получены авторами [2] при добавках других видов биомассы (соломы, лесных горючих материалов, отходов переработки подсолнечника и др.) в топлива, основным компонентом которых являются угли. Особенность процессов «секвестирования» антропогенных оксидов в рассматриваемых условиях высокотемпературного пиролиза и последующего горения заключается в том, что снижение доли SO_x и NO_x в продуктах сгорания угольно-древесных смесей не соответствует доле биомассы в такой концентрации (в 1,5÷3 раза больше в зависимости соотношения и вида компонентов) [1-3]. Сформулирована гипотеза о термохимическом механизме снижения выхода антропогенных оксидов в результате интенсивного взаимодействия между собой промежуточных продуктов пиролиза органической части углей и древесины.

Экспериментальное обоснование этой гипотезы затруднено в связи с необходимостью регистрации твердых, жидких и газообразных продуктов физико-химических превращений смеси углей и древесины при высоких температурах в широком диапазоне изменения последних. Влияние древесной компоненты проявляется в основном в генерации древесно-угольной смесью паров воды. В этой связи проведено математическое моделирование тепломассопереноса и физико-химических превращений во влажном угле в условиях нагрева до высоких температур.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 18-29-24099

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

II. Основная часть

При моделировании в качестве основного механизма «секвестирования» NO_2 в рассматриваемых условиях принято взаимодействие этого оксида с парами воды, образующимися при испарении содержащейся в угле влаги, и последующие реакции паров азотной кислоты с оксидами металлов (твердыми продуктами пиролиза угля).

Рассматривался процесс, который в теплоэнергетики принято называть термической подготовкой топлива к сжиганию, протекающий в период времени, достаточный для осушения угля, его нагрева до интенсивного пиролиза органической части топлива и воспламенения летучих. В этот период времени в слое топлива протекают все физические и химические процессы, соответствующие в последующем горению (как газофазному, так и гетерогенному). Поэтому математическое моделирование проводилось до выполнения условий зажигания угля [4].

Математическая постановка задачи воспламенения, соответствующая сформулированной выше физической модели, включает систему нестационарных дифференциальных уравнений, записанных в безразмерных переменных (сферическая система координат).

Область решения задачи - «частица – газовая среда». В период термической подготовки частицу топлива можно условно разделить на две зоны: исходное (насыщенное влагой) топливо и сухой угольный каркас. Распределение температуры в такой неоднородной гетерогенной системе описывает уравнение энергии. Оно учитывает кроме процесса теплопроводности удаление влаги, пиролиз угля, взаимодействие водяных паров и углерода кокса, а также фильтрационный тепло- и массоперенос по аналогии с [5]:

$$\frac{1}{Fo_{wcf}}\frac{\partial \mathrm{E}}{\partial \tau}-C_{gm}\mathrm{P}_{gm}\frac{Pe_{gm}}{Da}\left[\frac{\partial H}{\partial R}\frac{\partial \theta}{\partial R}+\frac{1}{R^2}\frac{\partial H}{\partial \Phi}\frac{\partial \theta}{\partial \Phi}\right]\Psi(\xi)=\frac{1}{R^2}\frac{\partial}{\partial R}\left(R^2\left(\Lambda_{wcf}+N_r\right)\frac{\partial \theta}{\partial R}\right)+$$

$$+\frac{1}{R\sin\Phi}\frac{\partial}{\partial \Phi}\left(\frac{\sin\Phi}{R}\left(\Lambda_{wcf}+N_r\right)\frac{\partial \theta}{\partial \Phi}\right)-\frac{Ku\cdot\Delta(\xi)}{\Omega}\frac{d\xi}{d\tau}-\Psi(\xi)\sum_{i=1}^{m}Pom_i^{wcf}$$

Теплофизические характеристики (теплопроводность, теплоемкость, плотность) рассчитывались в соответствии с положением фронта испарения воды. Координата границы испарения вычислялась из выражения:

$$R_{eva} = R_{out} - \frac{t}{r_{out}} \int_0^{\tau} V_F d\tau$$

где $V_F=(W_{eva}/\rho_{wat})$ – линейная скорость испарения воды, м/с. Массовая скорость испарения (W_{eva} [кг/(м^{2}с)]) вычислялась из выражения :

$$W_{eva} = \frac{A\left(P_s - P_{gm}\right)}{\sqrt{\frac{2\pi RT}{M_s}}}$$

При постановке задачи принято, что водяные пары совместно с продуктами термического разложения движутся сквозь пористый угольный каркас. Распределение давления (Н) по радиусу частицы вычислялось при решении уравнения пьезопроводности:

$$\frac{1}{Fo_H}\frac{\partial(\Pi\mathrm{H})}{\partial\tau} = \frac{1}{R^2}\frac{\partial}{\partial R}\left(R^2 \mathrm{X}\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial R}\right) + \\ + \frac{1}{R\sin\Phi}\frac{\partial}{\partial\Phi}\left(\frac{\sin\Phi}{R}\mathrm{X}\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial\Phi}\right) + \sum_{i=1}^{m} Pom_i^H$$

Распределение температуры в тонком слое газа вокруг частицы описывается уравнением энергии. Последнее учитывает экзотермические эффекты реакций окисления основных горючих компонентов воздухом:

$$\frac{1}{Fo_g}\frac{\partial \mathrm{E}_g}{\partial\tau} + Pe\left[U_g\frac{\partial \mathrm{E}_g}{\partial R} + \frac{V_g}{R}\frac{\partial \mathrm{E}_g}{\partial\Phi}\right] = \frac{1}{R^2}\frac{\partial}{\partial R}\left(R^2\Lambda_g\frac{\partial\theta}{\partial R}\right) + \\ + \frac{1}{R\sin\Phi}\frac{\partial}{\partial\Phi}\left(\frac{\sin\Phi}{R}\Lambda_g\frac{\partial\theta}{\partial\Phi}\right) + \sum_{i=1}^{n} Pom_i$$

Учитывалось цепное протекание окисления водорода, метана и окиси углерода. Скорость в пограничном слое частицы топлива вычислялась из решения системы уравнений Навье-Стокса, записанных в переменных «функции тока-вихрь»:

$$\frac{\partial\Omega}{\partial\tau} + U_g\frac{\partial\Omega}{\partial R} + \frac{V_g}{R}\frac{\partial\Omega}{\partial\Phi} + U_g\frac{\partial V}{\partial R} = \frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\nabla\Omega - \frac{\Omega}{R^2\sin^2\Phi} - \frac{2}{R}\frac{\partial\Omega}{\partial R}\right) + \\ + Ri\left(\frac{\partial\theta}{\partial\Phi} + R\sin\Phi\frac{\partial\theta}{\partial R}\right)$$

$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial\Phi^2} - \cot\Phi\frac{\partial\Psi}{\partial\Phi} + R^2\frac{\partial^2\Psi}{\partial R^2} = \Omega R^2\sin\Phi$$

Также принято, что водяной пар вступает в эндотермическое химическое взаимодействие с твердыми продуктами пиролиза угля (коксом). При этом учитывалось параллельное протекание двух реакции паровой газификации с образование трех продуктов реакции (CO_2, CO, H_2).

Процесс термического разложения органической части угля описывается уравнением химической кинетики:

$$\frac{\partial\eta_i}{\partial\tau} = \left[1-\eta_i\right]K_{td-i}\left(-Arr_i\right)$$

где M^i – содержание газообразных продуктов пиролиза.

Один основных рассматриваемых процессов - вдув газообразных продуктов термического разложения и химического взаимодействия твердого остатка и водяных паров в пограничный слой. В результате формируется газовая смесь, воспламеняющаяся при достижении критических значений температуры и концентрации горючего. Период времени от начала теплового воздействия на частицу до момента интенсивного химического взаимодействия парогазовой смеси с окислителем считался временем задержки воспламенения. При этом скорость выделения теплоты в результате термохимического реагирования окислителя и горючего превышает скорость поступления теплоты от внешней среды. При постановке задачи учитывалось, что в пограничном слое частицы топлива протекают наиболее значимые реакции воспламенения трех основных компонентов продуктов пиролиза: водорода; окиси углерода и метана. Рассматривался цепной характер протекания этих реакций.

Концентрации компонентов парогазовой смеси в пограничном слое частицы и в высокопористой структуре рассчитывались при решении уравнений диффузии для соответствующего компонента реакции:

$$\frac{1}{Fo_{dif}}\frac{\partial \mathrm{P}_g Y_i}{\partial\tau} + Pe_{dif}\left[U_g\frac{\partial \mathrm{P}_g Y_i}{\partial R} + \frac{V_g}{R}\frac{\partial \mathrm{P}_g Y_i}{\partial\Phi}\right] = \frac{1}{R^2}\frac{\partial}{\partial R}\left(R^2 \mathrm{P}_g \mathrm{D}_i\frac{\partial Y_i}{\partial R}\right) + \\ + \frac{1}{R\sin\Phi}\frac{\partial}{\partial\Phi}\left(\frac{\sin\Phi}{R}\mathrm{P}_g D_i\frac{\partial Y_i}{\partial\Phi}\right) \pm \sum_{i=1}^{n} Pom_i^{dif}$$

При термическом разложении угля происходит увеличение размеров пор. В этих условиях при постановке задачи учитывалось изменение плотности (ρ) и пористости (П) топлива:

$$\frac{\partial \mathrm{P}_c}{\partial\tau} = \left(\mathrm{P}_c - \mathrm{P}_c^{etd}\right)K_{td}\left(-Arr\right),$$

$$\Pi = \Pi_0\frac{\mathrm{P}_c - \mathrm{P}_c^0}{\mathrm{P}_c^{etd} - \mathrm{P}_c^0}$$

Система уравнений решалась при следующих начальных:

$$\tau = 0 \rightarrow \begin{cases} \left.\begin{cases} \theta(R,\Phi,0) = \theta_0 = \frac{T(\tau,\varphi,0) - T_0}{\Delta T};\ \mathrm{H}(R,\Phi,0) = \mathrm{H}_0 = 1; \\ \mathrm{P}(R,\Phi,0) = \mathrm{P}_0;\ \eta(R,\Phi,0) = 0; \end{cases}\right\} 0 < R < R_{out},\ 0 < \Phi < \pi \\ \left.\begin{cases} \theta(R,\Phi,0) = \theta_g = \frac{T_g - T_0}{\Delta T};\ Y_i(R,\Phi,0) = 0; \\ Y_{O_2}(R,\Phi,0) = 0.21; \end{cases}\right\} R_{out} < R < R_g,\ 0 < \Phi < \pi \end{cases}$$

и граничных условиях:

$$\left.\frac{\partial\theta}{\partial R}\right|_{\substack{R=0\\0<\Phi<\pi}}=0;\ \left.\frac{\partial\theta}{\partial\Phi}\right|_{\substack{0<R<R_g\\\Phi=0\\\Phi=\pi}}=0;\ \left.\frac{\partial^2\theta}{\partial R^2}\right|_{\substack{R=R_g\\0<\Phi<\pi}}=0;$$

$$\left.\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial R}\right|_{\substack{R=0\\0<\Phi<\pi}}=0;\ \left.\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial\Phi}\right|_{\substack{0<R<R_{out}\\\Phi=0\\\Phi=\pi}}=0;\ \left.\mathrm{H}\right|_{\substack{R=R_{out}\\0<\Phi<\pi}}=1;$$

$$\mathrm{D}_{i\to ox}\mathrm{P}_g\left.\frac{\partial Y_i}{\partial R}\right|_{\substack{R=R_{out}\\0<\Phi<\pi}}=\mathrm{P}_{gm}\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{Da}}\left.\frac{\partial H}{\partial R}\right|_{R=R_{out}-0};$$

$$\left.\frac{\partial Y_j}{\partial R}\right|_{\substack{R=R_{out}\\0<\Phi<\pi}}=0;\ \left.\frac{\partial^2 Y_{i,j}}{\partial R^2}\right|_{\substack{R=R_g\\0<\Phi<\pi}}=0;\ \left.\frac{\partial Y_i}{\partial\Phi}\right|_{\substack{0<R<R_g\\\Phi=0\\\Phi=\pi}}=0.$$

На границе раздела системы «частица ВУТ – газовая среда» принято граничное условие 4-го рода (для уравнений энергии и диффузии).

$$\frac{\partial\theta}{\partial R}=\mathrm{K}_\lambda\frac{\partial\theta}{\partial R}+Ki;\ \frac{\partial Y_i}{\partial R}=\mathrm{K}_i^{dif}\frac{\partial Y_i}{\partial R};$$

$$Ki_\Sigma=Sk(\theta)\cdot\sum_{i=1}^{n=4}\left[\chi\cdot\left(\frac{T_0}{\Delta T}\right)^{i-1}\left(\theta_g^{n+1-i}-\theta\Big|_{R=R_{out}}^{n+1-i}\right)\right];$$

$$\chi=\begin{cases}1,\ i=1\\4,\ i=2\vee 4.\\6,\ i=3\end{cases}$$

Теплопроводность, теплоемкость, плотность влажной и «обезвоженной» частей водоугольного топлива рассчитывались с учетом объемных долей компонент:

$$\Lambda_{wcf}=\begin{cases}\Lambda_1,\ R\le R_{eva}\\\Lambda_2,\ R>R_{eva}\end{cases};\ C_{wcf}=\begin{cases}C_1,\ r\le r_{eva}\\C_2,\ r>r_{eva}\end{cases};\ \mathrm{P}_{wcf}=\begin{cases}\mathrm{P}_1,\ R\le R_{eva}\\\mathrm{P}_2,\ R>R_{eva}\end{cases};$$

$$C_1=\gamma_c C_c+\gamma_{wat}C_{wat};\ C_2=\gamma_c C_c+\gamma_{gm}C_{gm};$$

$$\Lambda_1=\gamma_c\Lambda_c+\gamma_{wat}\Lambda_{wat};\ \Lambda_2=\gamma_c\Lambda_c+\gamma_{gm}\Lambda_{gm};$$

$$\mathrm{P}_1=\gamma_c\mathrm{P}_c+\gamma_{wat}\mathrm{P}_{wat};;\mathrm{P}_2=\gamma_c\mathrm{P}_c+\gamma_{gm}\mathrm{P}_{gm}.$$

Теплофизические характеристики парогазовой смеси также рассчитывались с учетом объемных долей компонент:

$$\Lambda_g=\sum_{i=1}^{n}\gamma_i\Lambda_i+\left(1-\sum_{i=1}^{n}\gamma_i\right)\Lambda_{oxi};$$

$$C_g=\sum_{i=1}^{n}\gamma_i C_i+\left(1-\sum_{i=1}^{n}\gamma_i\right)C_{oxi};$$

$$\mathrm{P}_g=\sum_{i=1}^{n}\gamma_i\mathrm{P}_i+\left(1-\sum_{i=1}^{n}\gamma_i\right)\mathrm{P}_{oxi}.$$

Объемные доли компонентов парогазовой смеси вычислялись по их массовым концентрациям:

$$\gamma_i=\frac{Y_i/\mathrm{P}_i}{\sum_{i=1}^{n}\frac{Y_i}{\mathrm{P}_i}}.$$

Коэффициент диффузии многокомпонентной смеси рассчитывался из выражения:

$$D_i=\frac{1-\gamma_i}{\sum_{i\ne k}\frac{\gamma_i}{D_{i-k}}}.$$

Условные обозначения

Размерные величины:

T – температура, К; $\Delta T=T_{eva}-T_0$ – температура нагрева до начала процесса парообразования, К; T_{eva} – максимально возможная температура испарения =373К; T_0 – температура в начальный момент времени; σ — постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м^2·К^4); $\varepsilon(T)$ — интегральная степень черноты, зависящая от температуры; p — давление, Па; η — степень пиролизации топлива; Ф – угловая координата; k — предэкспонент гетерогенной (м/с) или гомогенной (1/с) реакции; u — скорость движения смеси водяных паров и газообразных продуктов пиролиза в порах топлива в радиальном направлении, м/с; v — скорость движения смеси водяных паров и газообразных продуктов пиролиза в порах в азимутальном направлении, м/с; K_p — коэффициент проницаемости угля, м^2; ω — динамическая вязкость, Па·с; Q — тепловой эффект, Дж/кг; λ — коэффициент теплопроводности Вт/(м·К); c — теплоемкость, Дж/(кг·К); $\chi=\mathrm{K_p}\cdot(\omega\beta\Pi_0)^{-1}$ – коэффициент пьзопроводности, м^2/с; ρ — плотность, кг/м^3; $a=\lambda c^{-1}\rho^{-1}$ – коэффициент температуропроводности, м^2/с. r — радиус, м; Δ — параметр трансформации фронта испарения, м; s – характерный размер поры м; t — время, с; $t_{hw}=(r^*)^2a^*$ - характерное время распространения волны теплового возмущения по радиусу r^*, с.

Безразмерные величины:

$\theta=(T-T_0)/\Delta T$ — температура; $\tau=t/t^*$ - время; $C=c/c^*$- теплоемкость; $\mathrm{P}=\rho/\rho^*$ - плотность; $\Lambda=\lambda/\lambda^*$ - коэффициент теплопроводности; $U=u/u^*$ - скорость в радиальном направлении; $V=v/u^*$ - скорость в азимутальном направлении; $R=r/r^*$ –радиус; $\Pi=m/m^*$ - пористость; $\mathrm{H}=p/p^*$ - давление парогазовой смеси в пористой структуре частицы; $\mathrm{X}=\chi/\chi^*$ - коэффициент пьзопроводности; $\mathrm{D_i}=\mathrm{d_i}/\mathrm{d_i}^*$ - коэффициент диффузии; $\mathrm{Y_i}$ – массовая концентрация i-го компонента газовой смеси (CH_4, H_2O, H_2, CO); Ψ – функция Хевисайда; δ – функция Дирака; $\xi=\mathrm{r_{eva}}/\mathrm{r}^*$ – координата границы фронта испарения.

Безразмерные комплексы и критерии:

$Arr=E\cdot R^{-1}\cdot T^{-1}$– критерий Аррениуса; $Da=\omega r^* u^*/(K_p p^*)$ - критерий Дарси; $Ku=Q_{eva}\cdot(\Delta T\cdot c^*)^{-1}$ - критерий Кутателадзе; $K_{td}=k\cdot t^*$ - постоянная процесса термического разложения; $K_\lambda=\lambda_g/\lambda_{wcf}$ –комплекс,

характеризующий интенсивность перетока теплоты из пограничного слоя частицы в слой топлива; $K_i^{dif}=d_i \cdot m/d_i$ – комплекс, характеризующий интенсивность перетока i-го компонента летучих из пограничного слоя частицы в слой топлива; $N_r=16\sigma T^3 s/(\varepsilon\lambda_{wcf})$ – радиационно-кондуктивный параметр; $Fo=a^*t^*/(r^*)^2$ - критерий Фурье; $Fo=\chi^*t^*/(r^*)^2$ – аналог критерия Фурье в уравнении пьзопроводности; $Pe=u^*r^*/a^*$ -критерий Пекле; $Po=Q^iW^i(r^*)^2/(\lambda\Delta T)$ - критерий Померанцева для i-ой химической реакции; $Po_i^H=\omega W_i(r^*)^2/(p^*\rho_{gm}K_p)$ - аналог критерия Померанцева (уравнение пьзопроводности) для химических реакций (термическое разложение, взаимодействие водяных паров и углерода кокса); $Po_i^H=\omega W_{eva}(r^*)^2/(sp^*\rho_{gm}K_p)$ - аналог критерия Померанцева (уравнение пьзопроводности) для процесса испарения; $Po_i^{dif}=W_i(r^*)^2/(\rho_g d^*)$ - аналог критерия Померанцева (уравнение диффузии); *Ki* - критерий Кирпичева; $Sk(\theta)=(\varepsilon\sigma\Delta T^3)/\lambda_{wcf}$ - критерий Старка; $\Omega=(V_F/\Delta)t_{hw}$ – скорость испарения воды; $N=\rho^*u^*r^*/(d^*\rho_g)$.

Подстрочные индексы:

0 — начальный момент времени; 1 — область исходного топлива; 2 – область сухого топлива; 3 – уголь; 4 – вода; 5 – водяные пары; F — фронт испарения; g — высокотемпературный газ; c – коксовый остаток (coke); i — номер реакции; s — пар (steam); atm — внешняя среда; eva — граница раздела системы “влажное топливо — сухой углеродистый каркас”; out — внешний радиус частицы; *oxi* – окислитель (кислород воздуха); etd – окончание процесса термического разложения; wcf — водоугольная суспензия; wat – жидкая вода.

Надстрочные индексы:

г – на горючую массу; * - масштаб величин:

$T^*=T_{oxi}$;; $t^*=1$ *c*; $c^*=c_1$; $\rho^*=\rho_1$ - для уравнения (1); $\rho^*=\rho_{oxi}$; $\lambda^*=\lambda_1$; $u^*=u_{oxi}$; $r^*=r_{out}$; $m^*=m_0$; $p^*=p_0$; $\chi^*=\chi_1$; $d^*_{i\to oxi}=d_{i\to oxi}$.

Сформулированная краевая задача решена методом конечных разностей с использованием итерационной неявной разностной схемы, хорошо зарекомендовавшей себя при решении группы задач зажигания водоугольных топлив (например, [5]).

Типичные результаты математического моделирования исследовавшихся процессов приведены на рис. 1, 2 в виде распределений безразмерных температур и концентраций NO_2 по радиусу частицы. Зависимости рис. 1, 2 иллюстрируют влияние влаги (WCF) на выход оксида азота в сравнении с сухим углем (Coal).

Приведенные на рис. 2 типичные результаты численного моделирования показывают масштабы влияния протекающих при испарении влаги и пиролизе угля химических реакций между газообразными и твердыми продуктами физико-химических превращений в топливе при его интенсивном нагреве на концентрацию типичного оксида азота в продуктах термического разложения угля. Установлено, что при интенсивном химическом взаимодействии образующихся паров азотной кислоты с оксидом железа, присутствующем в неорганической части топлива, происходит образование солей железа с поглощением паров азотной кислоты (и, соответственно, существенным снижением выхода оксида азота в область горения).

Можно отметить, что задача моделирования процессов секвестирования антропогенных продуктов сгорания углей в присутствии избыточной влаги решена с описанием только одной реакции – взаимодействие паров азотной кислоты с оксидом железа. В реальных условиях многие угли содержат оксиды и других металлов (алюминия, магния, кальция и др.) в меньших объемах по сравнению с железом. Но их вклад может быть значим при описании выхода оксидов азота. Кроме того, пока не рассматривались возможные процессы трансформации оксидов серы с образованием паров серной кислоты, которые также могут интенсивно секвестироваться оксидами металлов. Пока эти процессы не рассматривались в связи с недостаточной информацией по кинетики вышеупомянутых реакций в диапазоне достаточно высоких (характерных для углей в процессе их термического разложения) температур.

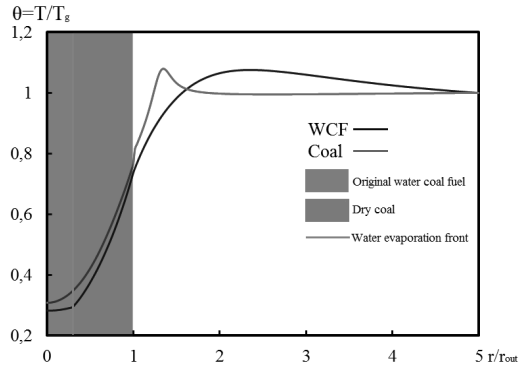


Рис. 1. Распределение безразмерной температуры ($\theta=T/T_g$, где T_g – температура внешней среды Tg=1273K (влажный уголь) Tg=1473K (сухой уголь)) в момент воспламенения частицы

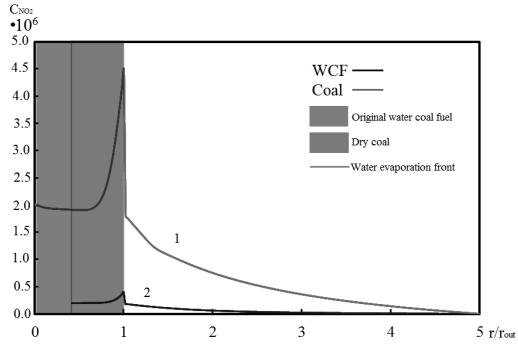


Рис. 2. Распределение концентрации диоксида азота (NO_2) в пористой структуре топливной частицы и в ее малой окрестности в момент воспламенения. 1 – зажигании сухого угля; 2 – зажигании влажного угля

III. Заключение

Результаты математического моделирования тепломассопереноса и физико-химических превращений в слое влажного угля в период термической подготовки топлива к сжиганию показали возможность существенного снижения концентрации антропогенных оксидов в продуктах сгорания углей в условиях работы тепловых электрических станций. Разработанная математическая модель существенно отличается от известных, описанием процессов взаимодействия промежуточных продуктов термического разложения углей с парами воды и может быть использована при разработке технологий сжигания водоугольных топлив, а также смесей диспергированных углей с влажной биомассой.

Список литературы

[1] Кузнецов Г.В., Янковский С.А. Условия и характеристики зажигания композиционных топлив на основе угля с добавлением древесины // Теплоэнергетика. 2019. № 2. С. 70-75.

[2] Янковский С.А., Кузнецов Г.В. Особенности физико-химических превращений смесевых топлив на основе типичных каменных углей и древесины при нагреве // Химия твердого топлива. 2019. № 1. С. 26-33.

[3] Кузнецов Г.В., Янковский С.А. Потенциал использования композитного топлива на основе каменного угля и отходов лесопромышленного производства в теплоэнергетике // Промышленная энергетика. 2017. № 11. С. 40-43.

[4] Syrodoy, S.V., Kuznetsov, G.V., Salomatov, V.V. The influence of heat transfer conditions on the parameters characterizing the ignition of coal-water fuel particles // Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika). Volume 62, Issue 10, 2015, Номер статьи A002, Pages 703-707.

[5] Kuznetsov, G.V., Salomatov, V.V., Syrodoy, S.V. Numerical simulation of ignition of particles of a coal–water fuel // Combustion, Explosion and Shock Waves. Volume 51, Issue 4, 22 July 2015, Pages 409-415.

Модель стохастической динамики распространения в компьютерных сетях эволюционирующих вирусов при условии устаревания и запаздывания действия защиты

Лесько С.А.
Кафедра КБ-3 «Управление и моделирование систем»
МИРЭА - Российский технологический университет
г. Москва, Российская Федерация
Sergey@testor.ru

Алёшкин А.С.
Кафедра КБ-8 «Информационное противоборство»
МИРЭА - Российский технологический университет
г. Москва, Российская Федерация
Antony@testor.ru

Ермак Д.О.
Кафедра КБ-3 «Управление и моделирование систем»
МИРЭА - Российский технологический университет
г. Москва, Российская Федерация
dmi3dmi3@mail.ru

***Abstract* — The paper considers creating of the dynamic model of the stochastic spread of evolving viruses in the address space of computer networks, subject to obsolescence and lag of antivirus.**

The evolutionary properties of viruses are taken into account in the model by the formal rule that previously immunized or cured nodes, at some interval (the size of which is the model parameter), can be re-infected, and exposure of antivirus protection has a lag time (also is a model setting). As part of the model, it was accepted that any network node could be in one of three states: in a protected (immunized) state; in an infected state; in neutral state. In a neutral state, the node may be infected or immunized. In an immunized state, the node can send out antiviruses, which cures infected and immunizes neutral nodes. In this state, copies of antiviruses (useful viruses) are sent to the nodes of the network randomly chosen (random choice in the address space indicates of the stochastic behavior). In an infected state, the node can send copies of viruses to nodes on the network, also by randomly selecting them in the address space (this also shows the stochastic behavior).

The stochastic dynamics model of the spread of evolving viruses in the computer network was described graphically using a diagram of possible transitions between nodes states, allowing create a system of kinetic differential equations describing these processes.

One of the advantages of the model being developed is the ability to modifying and expanding it by creating more complex state changes graphs of and transitions between them. For advice, that allows to supplement the system of kinetic equations with a member that considers the overall increasing in the number of users and devices in computer networks over time, described by a function of any kind.

Ключевые слова — эволюционирующие компьютерные вирусы; динамика эпидемий вирусов; времена запаздывания; логистический рост.

I. Введение

Развитие методов искусственного интеллекта уже сейчас позволяет создавать вирусы, которые могут эволюционировать и приспосабливаться к появлению новых антивирусных программ, что в значительной степени схоже с эволюцией биологических объектов. Не далек тот день, когда появится возможность автоматического создания в сетях новых вирусов, которая будет основана на эволюционных принципах и анализе текущих свойств среды существования вирусов. Такие объекты будут обладать развитым искусственным интеллектом и демонстрировать роевое поведение. Построение моделей распространения таких объектов и моделей борьбы с ними представляет большой научный интерес.

Анализ динамики эпидемий компьютерных вирусов показывает, что они обладают почти-периодическим характером распространения.

Впервые кинетика развития вирусной эпидемии в адресном пространстве компьютерных сетей была проанализирована с помощью принятых в биологии простых феноменологических SI и SIR моделей [1-3]. Под SI-моделью распространения вирусов подразумевают, что любой из компьютеров, входящих в атакуемую сеть, может находиться в одном из двух состояний: уязвимом (S) и инфицированном (I). Согласно этой модели имеется сеть, состоящая из постоянного числа (N) компьютеров, причем N=S+I, а на каждом инфицированном узле может существовать только одна копия червя, которая случайным образом выбирает в доступном адресном пространстве потенциальную жертву с некоторой постоянной средней скоростью атак в единицу времени. В модели SIR сетевые узлы существуют в трех состояниях: уязвимом (S), зараженном (I) и невосприимчивом (R). Отметим, что узлы оказываются неуязвимыми только после излечения от инфекции, а N – общее число узлов сети равно S+I+R. Вводя постоянную среднюю скорость иммунизации и атак в единицу времени, для описания динамики развития эпидемий, можно получить системы дифференциальных кинетических уравнений [1-3], описывающих процесс распространения эпидемии вирусов.

Кроме того, среди ранних работ можно упомянуть оригинальную работу V. Misra и его коллег, которые применили для моделирования распространения вирусов гидродинамическую модель, в которой этот процесс рассматривался как протекание жидкости [4].

Тем не менее, после 2001 года, когда произошли массовые эпидемии таких червей как CodeRed I, CodeRed II, Nimda, Slammer и ряда других вирусов – выяснилось, что созданные модели не всегда адекватно описывают подобные процессы.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

Дальнейшее развитие ранее существовавшие SI и SIR кинетические модели получили в значительном числе работ [5-7]. Например, в работе [5] были рассмотрены два типа процессов в компьютерной сети: один определяемый серверными инфицированными узлами сети, имеющими высокий темп интенсивности вредоносных атак, а другой – инфицированными узлами клиента, имеющими низкий темп интенсивности вредоносных атак. Для построения системы кинетических уравнений было принято, что общее количество компьютерных узлов (N) можно разделить на две группы: NH, которые имеют высокий темп интенсивности нападения (сервера) и NL, которые имеют низкий темп интенсивности нападения (клиенты): NH + NL = N. Группа NH в свою очередь состоит из трех классов: восприимчивые, но еще не зараженные (SH), иммунизированные и невосприимчивые (A), заразные (IH): SH + A + IH = NH. Группа NL состоит из четырех классов: восприимчивые (SL), иммунизированные и невосприимчивые (EL), заразные (IL) и вылеченные (RL): SL + EL + IL + RL = NL.

Для перечисленных типов узлов была записана система, состоящая из семи кинетических дифференциальных уравнений первого порядка, описывающая переходы между состояниями узлов и их материальный баланс. Моделирование и анализ динамики заражения и равновесия состояний с помощью полученной системы уравнений и подбора в них величин соответствующих коэффициентов позволили сделать вывод о том, что для получения сети, свободной от злонамеренных объектов, необходимо обновлять антивирус в нерегулярные интервалы времени, длительность которых определяется кинетическими свойствами вирусной эпидемии.

В работе [6] рассмотрена кинетическая модель описания развития вирусных эпидемий на основе решения системы трех дифференциальных уравнений первого порядка для баланса узлов находящихся в уязвимом (S), зараженном (I) и невосприимчивом (R) состояниях. Авторы работы развивают кинетические модели описания вирусных эпидемий в компьютерных сетях на основе представлений об эпидемиологическом пороге, времени ожидания заражения, факторе репликации (коэффициент размножения), вероятности заражения и иммунизации, времени неприкосновенности узла и т.д. В разработанной модели узел, удаленный из зараженного класса (иммунизированный) временно восстанавливается и получает с некоторой вероятностью неприкосновенность, или может с некоторой вероятностью снова заразится. Численное решение полученной авторами работы системы дифференциальных уравнений показывает возможность развития вирусных эпидемий имеющих ярко выраженный периодический характер.

В работе [7] на основе кинетических подходов были усовершенствованы математические модели распространения компьютерных вирусов в гетерогенной компьютерной сети, учитывающие ее топологические и архитектурные особенности. Обобщенная структура компьютерной сети рассматривалась на основе модели PSIDR: N = S(t) + I(t) + D(t) + R(t), где: N – общее количество объектов в системе; S(t) – количество уязвимых объектов; I(t) – количество зараженных объектов; R(t) – количество вылеченных объектов, обладающих иммунитетом; D(t) – количество объектов, в которых обнаружен вирус. Учет топологических и архитектурных особенностей сетей осуществлялся за счет умножения некоторых членов кинетических дифференциальных уравнений на эмпирические поправочные коэффициенты. В частности для топологии сети “звезда” член учитывающий убыль (заражение) уязвимых объектов умножался на коэффициент равный 0,6. Анализ на основе данных развития эпидемий и сравнительные исследования разработанных математических моделей, проведенные авторами работы, позволили сделать вывод о повышении их точности по сравнению с известными математическими моделями и возможности применения разработанных моделей для моделирования вирусных эпидемий в компьютерных сетях.

Общие вопросы развития эпидемий вирусов в компьютерных сетях были рассмотрены в работах [8, 9]. В частности, [8] указывается на необходимость разработки стратегий защиты неуязвимых к изменениям в топологии сети и не требующих знания механизмов развития эпидемии. Например, создание механизмов регулирования числа соединений между узлами в единицу времени и их ограничение при возникновении атак или разработка методов превентивной вакцинации.

В статье [9] обсуждаются вопросы разработки контрмер препятствующих распространению вирусов. Авторы работы утверждают, что выпуск обновлений для программного обеспечения после обнаружения уязвимостей не дает надежной гарантии по безопасности. Для повышения уровня защиты авторы работы предлагают идею, согласно которой в компьютерной сети необходимо выделить подсеть, в которой будет целенаправленно распространяться антивирус, поведение которого будет схоже с поведением вредоносного программного обеспечения, но его задачей будет борьба с вирусами, а не нанесение вреда (“хороший вирус” с конкурирующей стратегией распространения). Распространение вирусов и антивирусов будет представлять два конкурирующих процесса. При этом для распространения антивирусов возможна реализация двух механизмов: случайная иммунизация и целенаправленная конкурирующая стратегия. Моделирование показало, что целенаправленная конкурирующая стратегия борьбы с вирусами наиболее эффективно работает, если скорость распространения антивирусов превышает скорость заражения, а инфицированные узлы могут быть легко идентифицированы. Преимуществом целенаправленной конкурирующей стратегии является то, что её эффективность не зависит от топологии распространения вирусов в компьютерной сети. На основе этого результата антивирусные компании могут использовать социальную сеть своих клиентов, или создать сеть из их компьютеров (для распространения контрмеры) в который узлы сами могут распространять контрмеры.

В работе [10] проводится анализ четырех моделей распространения вирусов: классическая SI модель, независимая каскадная модель, динамическая модель распространения и модель учитывающая топологию сетей. Сравнение результатов моделирования показало,

что наиболее перспективными с точки зрения разработки механизмов защиты являются модели, основанные на графе сети.

В работах, на которые наиболее часто опираются современные исследователи, осуществляется разработка интеллектуальных моделей развития и описания вирусных эпидемий в компьютерных сетях. Например, подходы, схожие с теорией клеточных автоматов. В работе [11] рассматривается модель развития вирусной эпидемии не с произвольным порядком распространения вирусов, а с учетом погрешности результатов атак вследствие воздействия вирусов, на уже зараженные узлы сети. Для этого авторы работы представляют сеть в виде направленного вероятностного графа без петель, узлы которого описываются переменными, задающими вероятности их состояния (зараженный, иммунизированный, восприимчивый) и дуги задают взаимодействие между переменными графической модели. Вирусное распространение определяется характеристиками сети и похоже на действие клеточного автомата. Вирусы могут блуждать в произвольном порядке по пространству графа, иметь различные позиции и скорость. Их перемещение по узлам описывается набором правил. Восприимчивый узел заражается, когда на него попадает вирус. Узел, который является носителем болезни, не может быть заражен второй болезнью (т.е. активная болезнь блокирует вторичную инфекцию), иммунизированный узел не может быть заражен повторно и т.д. Следует отметить, что предлагаемый авторами подход устраняет многие проблемы существовавшие в более ранних эпидемиологических моделях.

Также в последнее время очень активно развиваются модели на основе цепей Маркова. В работе [12] рассматривается модель описания развития вирусных эпидемий на основе стохастических моделей интерактивных цепей Маркова, в которых состояние узлов сети на каждом следующем шаге развития эпидемии зависит от его состояния и состояния соседей на предыдущем шаге, а сама сеть представляется в виде ненаправленного графа.

Использование цепей Маркова по мнению авторов [12] позволяет оценить защищенность сетей с различной топологией от компьютерных вирусов, и позволяет выбирать их наиболее безопасные структуры уже на раннем этапе проектирования.

Для анализа и моделирования эпидемий вирусов в компьютерных сетях можно использовать методы сопоставления. В частности в работе [13] для этого были использованы две различных модели: одна на основе авторегрессионного анализа, другая на основе Фурье анализа. Данные модели были применены для описания эпидемий двух червей и трояна: wormnetsky.p, wormmytob.mr, trdir.stration.ge. Результаты анализа показывают приемлемую корреляцию между временем распространением выбранных вирусов. Авторегрессионный и Фурье анализ представляют возможность предсказания по увеличению и уменьшению тенденций в распространении определенного типа вируса при помощи накопленного опыта по другим эпидемиям. Всё это, по мнению авторов работы [13], позволяет использовать разработанную методику, чтобы предсказывать и управлять уровнями заражения заранее, обеспечивая превентивные меры, увеличивая тем самым безопасность и надежность.

Целью данного исследования является создание модели распространения вирусных эпидемий в компьютерных сетях, хорошо описывающую динамику реальных вирусных эпидемий, происходящих в прошлом, а также выявление основных недостатков и неучтенных факторов при использовании подобной модели.

Задачами данного исследования являются:

- разработка и рассмотрение математической модели динамики распространения в компьютерных сетях эволюционирующих вирусов (при условии устаревания и запаздывания действия защиты)
- получение решений для систем кинетических дифференциальных уравнений математической модели
- рассмотрение полученных решений в сравнении с ранее наблюдаемыми эпидемиями компьютерных вирусов

II. Построение математической модели

Для построения модели стохастической кинетики распространения эволюционирующих (видоизменяющихся или приспосабливающихся под среду) вирусов и кластеризации блокированных узлов компьютерных сетей в адресном пространстве мы предлагаем следующий подход нашей разработки. Рассмотрим сеть, в которой происходит процесс распространения вирусов, начинающийся раньше, чем появятся эффективные способы организационного и технического противодействия (антивирусная защита имеет время запаздывания).

Долю узлов сети находящихся в момент времени t в зараженном состоянии обозначим как $y_1(t)$; в защищенном (иммунизированном) состоянии - $y_2(t)$; в нейтральном состоянии (не инфицирован, не защищен и может быть заражен), как $y_3(t)$.

Общее число узлов сети примем равным L. В начальный момент времени (t=0) имеется некоторое количество (или доля $y_1(t=0)$) зараженных узлов, которые могут рассылать копии вирусов по узлам сети, случайно выбирая их в адресном пространстве. Кроме того, имеется некоторое число узлов сети (или доля $y_2(t=0)$) которые занимаются борьбой с вирусами (излечивают зараженные и иммунизируют свободные узлы), рассылая копии антивирусов (полезные вирусы) по узлам сети случайным образом выбирая их в адресном пространстве и $y_3(t=0)$ - в нейтральном состоянии (не инфицирован, не защищен и может быть заражен). Антивирусы могут устаревать вследствие чего ранее иммунизированные узлы могут быть вновь инфицированы. Введем следующие времена: τ_1 – запаздывание действия антивируса, τ_2 – устаревания антивируса, то есть узел становится уязвим для новых видов вирусов спустя некоторое время после иммунизации, что во многом отражает реально существующее положение дел.

Необходимо отметить, что если рассматривать модели, в которых рассылка вирусов происходит целенаправленным образом [14, 15], с учетом ранее выбранных узлов в адресном пространстве и интеллектуальных стратегий поведения, то захват сети должен происходить быстрее, так как при случайной рассылке, на завершающем этапе развития эпидемий начинаются взаимные DDoS атаки инфицированных узлов. Однако в предлагаемой нами модели происходит и процесс иммунизации за счет рассылки антивирусов. Поскольку распространение вирусов и антивирусов является независимым, то, на наш взгляд, для их распространения следует выбирать механизм случайной рассылки.

Описанный нами процесс стохастической кинетики распространения эволюционирующих вирусов в компьютерной сети можно описать диаграммой, представленной на рисунке 1 и системой кинетических уравнений (1-3).

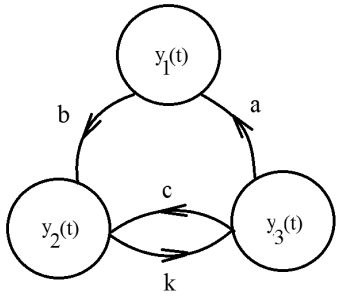


Рис. 1. Диаграмма, описывающая рассматриваемую модель процесса распространения вирусов в компьютерной сети

$$\frac{dy_1(t)}{dt} = ay_1(t)y_3(t) - by_1(t)y_2(t-\tau_1) \quad (1)$$

$$\frac{dy_2(t)}{dt} = cy_2(t-\tau_1)y_3(t) + by_1(t)y_2(t-\tau_1) - ky_2(t-\tau_2) \quad (2)$$

$$\frac{dy_3(t)}{dt} = -ay_1(t)y_3(t) - cy_2(t-\tau_1)y_3(t) + ky_2(t-\tau_2) \quad (3)$$

Производные по времени определяют скорости изменения долей соответствующих узлов, a; b; c и k – некоторые коэффициенты, характеризующие соответствующие переходы па рисунке 1 (эти коэффициенты задают стохастическую динамику системы и являются интегральными параметрами, зависящими например от числа копий рассылаемых вирусов и антивирусов, вероятности встречи и т.д.). Перемножение различных функций (например, $y_1(t)*y_3(t)$) характеризует вероятность соответствующих встреч. Естественно, что в любой момент времени *t* сумма $y_1(t) + y_2(t) + y_3(t) = 1$, а количество узлов находящихся в момент времени *t* в заданном состоянии можно получить как $y_i(t)*N$, где N – общее число узлов в сети.

Для пояснения модели рассмотрим более подробно одно из кинетических уравнений, например (2). Член уравнения $(dy_2(t))/dt$ описывает скорость изменения доли узлов находящихся в защищенном (иммунизированном) состоянии, $cy_2(t-\tau_1)\, y_3(t)$ определяет прирост за счет иммунизации уязвимых узлов, $by_1(t)\, y_2(t-\tau_1)$ определяет прирост за счет излечивания зараженных узлов, $ky_2(t-\tau_2)$ убыль за счет устаревания антивируса (иммунизированный узел может сначала переходить в незащищенное состояние, а затем заражаться вирусом). Аналогичным образом определяется смысловое значение членов кинетических уравнений (1) и (2).

Для анализа полученной модели возьмём в качестве примера следующие значения коэффициентов, характеризующие переходы на диаграмме, представленной на рисунке 2: a=0,02; b=0,001; c=0,0001 и k=0,1, общее число узлов (L) сети мы брали равным 1000, времена запаздывания и устаревания τ_1=38 и τ_2=12 условных единиц, начальные значения $y_3(t=0)$=1000, $y_2(t=0)$=1, $y_1(t=0)$=10.

Результаты решения системы уравнений (1) с использованием прикладного пакета MatLab и заданными значениями коэффициентов и начальных значений представлены на рисунке 2.

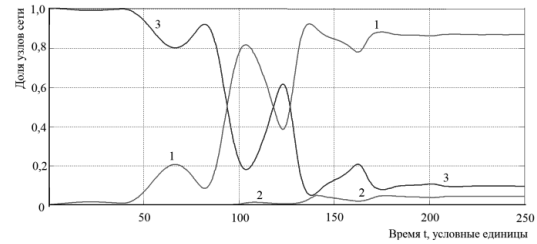


Рис. 2. Кинетика взаимных переходов между узлами компьютерной сети при распространении эпидемий эволюционирующих вирусов при коэффициентах переходов a=0,02; b=0,001; c=0,0001 и k=0,1

Кривая 1 на рисунке 2 построена для $y_1(t)$ - доли узлов сети, находящихся в момент времени t в зараженном состоянии, кривая 2 для доли узлов $y_2(t)$, находящихся в момент времени t в защищенном (иммунизированном) состоянии, кривая 3 для доли узлов $y_3(t)$, находящихся в момент времени t в нейтральном состоянии (не инфицирован, не защищен и может быть заражен).

При изменении набора величин коэффициентов, характеризующих соответствующие переходы на рисунке 3 (например: a=0,007; b=0,0025; c=0,0001; k=0,1), но прежних начальных значениях функций $y_1(t)$, $y_2(t)$ и $y_3(t)$ и временах запаздывания действия и устаревания антивируса, вид зависимостей $y_1(t)$, $y_2(t)$ и $y_3(t)$ от времени несколько изменяется (см. рис. 3). Однако в любом случае характер их поведения имеет осциллирующий вид и при больших временах значения $y_1(t)$, $y_2(t)$ и $y_3(t)$ стремятся к стационарным значениям, величина которых зависит от a; b; c и k (см. рис. 2 и 3).

Рассмотренная модель показывает осциллирующий и почти-периодический характер развития эпидемий в компьютерных сетях (см. кривые 1 на рисунках 2 и 3) с течением времени, что хорошо согласуется с историей

их реального наблюдения. Необходимо заметить, что систему кинетических уравнений (1-3) нужно дополнить членом, учитывающим общий рост числа устройств в компьютерных сетях с течением времени, что связано с ростом числа пользователей. Такой член позволит моделировать распространение эпидемий в растущих и развивающихся сетях.

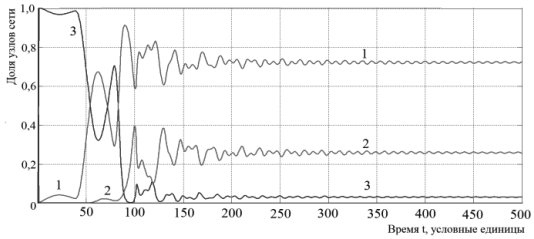


Рис. 3. Кинетика взаимных переходов между узлами компьютерной сети при распространении эпидемий эволюционирующих вирусов при коэффициентах переходов a=0,007; b=0,0025; c=0,0001; k=0,1

На рисунке 4 представлена динамика изменения числа пользователей сети интернет и устройств подключенных к сети [16], в обычном и полулогарифмическом масштабе. Анализ данных в полулогарифмическом масштабе показывает, что увеличение числа пользователей и устройств их выхода в интернет идёт с падающими темпами, а угол наклона меняется в районе 2001 года.

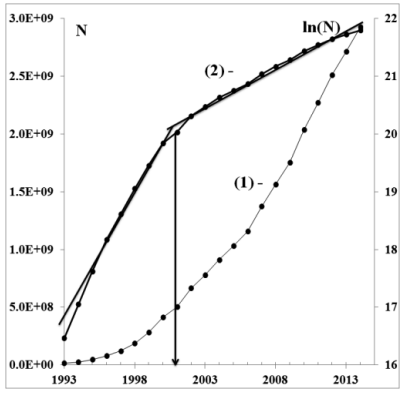


Рис. 4. Динамика пользователей сети интернет с 1993 по 2014 год. (1) – в обыкновенном масштабе. (2) - в полулогарифмическом масштабе

В целом динамика роста числа пользователей сети интернет и подключенных к сети устройств может быть описана моделью ограниченного роста Гомперца, у которой имеется предел, к которому стремятся данные, а развитие на длительных интервалах характеризуется падающими темпами. Результат сопоставления модели Гомперца и реальных данных представлен на рисунке 5.

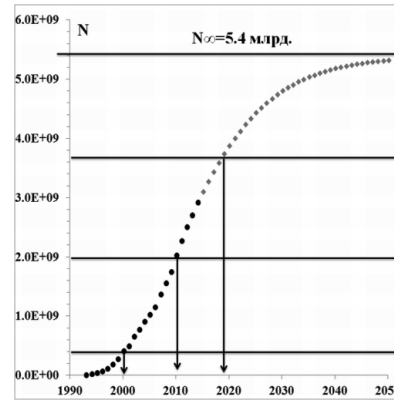


Рис. 5. Сопоставление модели Гомперца и реальных данных.

Таким образом, предел в рамках реализуемой системы технологий составляет 5.4 млрд. пользователей, что в 1.6 раза больше значения имеющегося к настоящему времени. Точка перегиба на кривой скорости приходится в район 2019 года при числе пользователей около 3,7 млрд. В таких точках часто доминировать начинают принципиально новые технологии. Возможно, в это время произойдет активизация развития интернета вещей (IoT). Другая возможность — это развитие и использование отличающихся от текущих способов подключения к глобальной сети (спутниковый интернет, 5G).

Учитывая, что социальные процессы, в том числе и рост числа пользователей, имеют, как правило, логистический характер, то мы предлагаем дополнить уравнение (3) в системе уравнений (1) – (3) эмпирическим членом следующего вида:

$$\frac{y_3(t=0)\cdot e^{k_1\cdot t}}{1+\frac{y_3(t=0)}{k_2}\cdot\left\{e^{k_1\cdot t}-1\right\}}$$

где k_1 и k_2 характеризующие логистический рост числа пользователей интернет. Таким образом, получим:

$$\frac{dy_1(t)}{dt}=ay_1(t)y_3(t)-by_1(t)y_2(t-\tau_1) \qquad (1)$$

$$\frac{dy_2(t)}{dt}=cy_2(t-\tau_1)y_3(t)+by_1(t)y_2(t-\tau_1)-ky_2(t-\tau_2) \qquad (2)$$

$$\frac{dy_3(t)}{dt}=-ay_1(t)y_3(t)-cy_2(t-\tau_1)y_3(t)+ky_2(t-\tau_2)+$$

$$+\frac{y_3(t=0)\cdot e^{k_1\cdot t}}{1+\frac{y_3(t=0)}{k_2}\cdot\left\{e^{k_1\cdot t}-1\right\}} \qquad (3A)$$

Такое изменение позволит модели учитывать рост числа пользователей или узлов сети интернет. Однако, следует отметить, что с появлением интернета вещей, характер роста числа устройств в глобальной сети вероятно изменится и будет существенно отличен от описанного выше. По прогнозам аналитиков суммарное число устройств может увеличиться в ближайшее время до нескольких миллиардов, что в свою очередь будет являться новым полем для распространения вирусных эпидемий[17].

III. Заключение

1) Рассмотрена новая модель распространения эволюционирующих вирусов. Эволюционные свойства вирусов учитываются в модели формальным правилом, согласно которому, ранее иммунизированные или вылеченные узлы, через некоторый интервал времени (величина которого является параметром модели), могут быть снова инфицированы, а воздействие антивирусной защиты имеет время запаздывания (также является параметром модели). В рамках модели было принято, что любой узел сети может находиться в одном из трех состояний: в защищенном (иммунизированном) состоянии и сам может рассылать антивирусы (излечивает зараженные и иммунизирует свободные узлы), рассылая копии антивирусов (полезные вирусы) по узлам сети случайным образом выбирая их в адресном пространстве (стохастичность поведения); в зараженном состоянии (может рассылать копии вирусов по узлам сети, случайно выбирая их в адресном пространстве – стохастичность поведения); или в нейтральном состоянии (может быть заражен).

2) Модель стохастической динамики распространения эволюционирующих вирусов в компьютерной сети была описана в графическом виде с помощью диаграммы возможных переходов между состояниями узлов. Это позволило получить систему кинетических дифференциальных уравнений, описывающих указанные процессы. Анализ полученных решений показывает возможность существования в рамках модели различных режимов распространения вирусов. Причем, при некоторых наборах величин коэффициентов дифференциальных уравнений наблюдается осциллирующий и почти-периодический характер распространения вирусных эпидемий, что в значительной степени совпадает с реальными наблюдениями.

3) Разработанная модель может быть модифицирована и расширена на основе создания более сложных графических диаграмм изменения состояний и переходов между ними. В частности, это позволяет дополнить систему кинетических уравнений членом, учитывающим общий рост числа пользователей и устройств в компьютерных сетях с течением времени, описываемым функцией любого вида.

Список литературы

[1] H. Anderson, T. Britton. Stochastic Epidemic Models and Their Statistical Analysis. Springer – Verlag, New – York, 2000.

[2] Benjamin M. Bolker David J. D. Earn, Pejman Rohani, Bryan T. Grenfell. A simple model for complex dynamical transitions in epidemics. Science, 287:667–670, 2000.

[3] C. Wang, J.C. Knight, M.C. Elder. On Viral Propagation and the Effect of Immunization. Proc. of 16th ACM Annual Computer Applications Conference, New Orleans, LA, 2000.

[4] V. Misra, W. Gong, D. Towsley. A fluid based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED. Proc. of ACM/SIGCOMM, 2000, pp. 151 – 160.

[5] Munna Kumar, Bimal Kumar Mishra, T.C. Panda. A New Model on the Spread of Malicious Objects in Computer Network. International Journal of Hybrid Information Technology, Vol.6, No.6 (2013), pp.161-176.

[6] Bimal Kumar Mishra, Gholam Mursalin Ansari. Dierential Epidemic Model of Virus and Worms in Computer Network. International Journal of Network Security, 2012, Vol.14, No.3, pp. 149-155.

[7] С.Г. Семенов, В.В. Давыдов. Математическая модель распространения компьютерных вирусов в гетерогенных компьютерных сетях автоматизированных систем управления технологическим процессом. Вестник НТУ "ХПИ", 2012, № 38, с. 163-171.

[8] Justin Balthrop, Stephanie Forrest, M. E. J. Newman, Matthew M. Williamson. Technological Networks and the Spread of Computer Viruses. SCIENCE, vol. 304, 2004, pp. 527-529.

[9] Li-Chiou Chen, Kathleen M. Carley. The Impact of Countermeasure Propagation on the Prevalence of Computer Viruses. IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS—PART B: CYBERNETICS, Vol. 34, No. 2, 2004, pp. 823-833.

[10] Arnold Adimabua Ojugo, Fidelis Obukowho Aghware, Rume Elizabeth Yoro, Mary Oluwatoyin Yerokun, Andrew Okonji Eboka, Christiana Nneamaka Anujeonye, Fidelia Ngozi Efozia. Evolutionary Model for Virus Propagation on Networks. Automation, Control and Intelligent Systems, 2015; 3(4), pp. 56-62.

[11] Honoriu Vălean, Adina Pop, Camelia Avram. Intelligent model for virus spreading. The International Symposium on System Theory, Automation, Robotics, Computers, Informatics, Electronics and Instrumentation, 18-20 October 2007, Craiova, Romania.

[12] Я.М. Далингер, Д.В. Бабанин, С.М. Бурков. Математические модели распространения вирусов в компьютерных сетях различной структуры. Моделирование систем, 2011, №4(30), с.3-11.

[13] Jos´e R. C. Piqueira, Felipe Barbosa Cesar. Dynamical Models for Computer Viruses Propagation. Mathematical Problems in Engineering, Volume 2008, Article ID 940526, 11 pages, doi:10.1155/2008/940526.

[14] Жуков Д.О., Гусаров А.Н., Косырева А.В. Исследование эффективных стратегий распространения компьютерных угроз. Вестник компьютерных и информационных технологий, 2010, № 7 (73), с. 40-46.

[15] Жуков Д.О., Гусаров А.Н., Сычев И.Ю., Косарева А.В., Рогожина М.Н. Математическое моделирование кинетики и топологии распространения компьютерных угроз в информационно-вычислительных сетях различной структуры с использованием параллельных вычислений. Промышленные АСУ и контроллеры. 2011, № 2 С. 50-58.

[16] https://www.internetlivestats.com (дата последнего обращения 12 декабря 2018 года).

[17] Лесько С.А., Гадзаов А.Ф., Жуков Д.О. Прогнозирование эпидемий компьютерных вирусов на основе метода почти-периодических функций. Нелинейный мир. 2016. Т. 14. № 6. С. 65-70

.

Распределенное управление температурными режимами конструкционных элементов автономных объектов

Лившиц М.Ю.
СамГТУ
Самара, Россия
usat@samgtu.ru

Бородулин Б.Б.
СамГТУ
Самара, Россия
usat@samgtu.ru

Ненашев А.В.
СамГТУ
Самара, Россия
usat@samgtu.ru

Савельева Ю.О.
СамГТУ
Самара, Россия
usat@samgtu.ru

***Abstract* — The temperature field control system of the autonomous object support structure the information-measuring system is located at, is introduced. For compensation of the thermal deformation of the construction due to the temperature field irregularity, caused by information-measuring system elements heating, the control algorithm for specially placed on the construction controlled heat-sources has been proposed. The imitation modeling in program software environment ANSYS shows high efficiency of the presented algorithm and management system.**

Ключевые слова — алгоритм управления, термодеформация, температурное поле, несущая конструкция, управляемый теплоисточник

I. Введение

Эффективность работы автономных аппаратов в существенной степени зависит от погрешностей установленной на них информационно-измерительной системы. Значительную часть этой погрешности составляет нестабильность термодеформаций несущей конструкции. К неравномерности и нестационарному влиянию внешних тепловых потоков на элементы несущих конструкций добавляется неоднородность и нестационарное тепловыделение самих измерительных приборов, что приводит к увеличению термической деформации этих конструкций и вносит дополнительную погрешность. Этот эффект особенно опасен для автономных объектов, поскольку может привести к недопустимым ошибкам информационно-измерительной системы (ИИС) при определении местоположения и курса, что в некоторых случаях вызывает серьезные аварии и катастрофы [1, 2]. Поэтому терморазмерная стабилизация элементов несущих конструкций автономного объекта путем создания соответствующих систем автоматического управления (САУ) температурным распределением в элементах несущих конструкций является актуальной задачей.

II. Постановка задачи

Рассмотрим для примера массивную конструкцию, в форме прямоугольной призмы из изотропного материала, изображенную на рис. 1.

На внешней стороне и боковых поверхностях конструкции устанавливается аппаратура, необходимая для выполнения целевой задачи. Для обеспечения размерной стабильности конструкции и минимизации величин ее возможной термодеформации, обеспечения контроля и регулирования температуры платформы на боковых поверхностях конструкции размещаются средства термоградиентной стабилизации - управляемые теплоисточники (УТ).

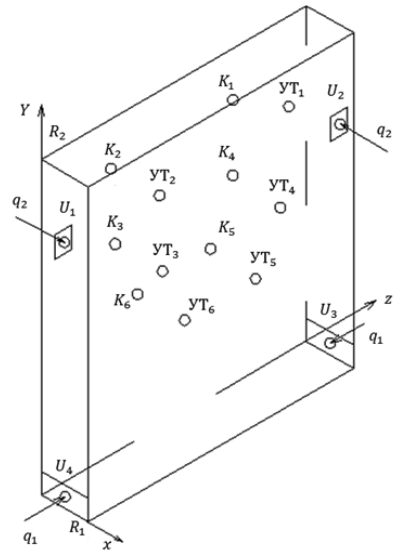


Рис. 1. Тепловая схема несущей конструкции

Для терморазмерной стабилизации предлагается специальная система регулирования. Поскольку конструкция представляет собой достаточно массивное в теплотехническом смысле тело, а функция, характеризующая его температурное распределение $T(x,y,z,\tau)$, зависит от времени τ, и от пространственных координат (x,y,z) точек рассматриваемой области, систему управления температурным распределением конструкции следует рассматривать как систему с распределенными параметрами (СРП), для чего приходится использовать математический аппарат, существенно отличающийся от классического.

Схема размещения на конструкции тепловыделяющих элементов приведена на рис.1. $U_1 \div U_4$ - тепловыделяющие приборы ИИС, работающие попарно синхронно по заданной варьируемой циклограмме, поэтому каждый из тепловых потоков

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований проект № 17-08-00593

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

$q_1(\tau)$ и $q_2(\tau)$ воздействует симметрично на соответствующих областях конструкции. Для компенсации неравномерности температурного поля конструкции в ответственной зоне размещены управляемые теплоисточники $УТ_1 \div УТ_6$, мощность которых изменяется под управлением бортового компьютера, а результат виртуально контролируется в точках $K_1 \div K_6$ с помощью предварительного прогноза на математической модели в режиме «offline».

Местоположение точек контроля температуры $K_1 \div K_6$ выбрано из условий максимального уровня термодеформации конструкции вызывающей соответствующую погрешность ИИС.

Температурное поле конструкции $T(x,y,z,\tau)$ в рассматриваемом примере описывается трехмерным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} = a\left[\frac{\partial^2 T(x,y,z,\tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,z,\tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,z,\tau)}{\partial z^2}\right] \quad . \quad (1)$$

$$\tau > 0,\ 0 < x < R_1,\ 0 < y < R_2,\ 0 < z < R_3$$

с краевыми условиями:

$$\begin{aligned}
-\lambda \frac{\partial T(x,y,z,\tau)}{\partial x}\Big|_{x=0} &= Q_{X_1}(y,z,\tau),\\
-\lambda \frac{\partial T(x,y,z,\tau)}{\partial x}\Big|_{x=R_1} &= Q_{X_2}(y,z,\tau),\\
-\lambda \frac{\partial T(x,y,z,\tau)}{\partial y}\Big|_{y=0} &= q_{Y_1}(\tau),\\
-\lambda \frac{\partial T(x,y,z,\tau)}{\partial y}\Big|_{y=R_2} &= q_{Y_2}(\tau),\\
-\lambda \frac{\partial T(x,y,z,\tau)}{\partial z}\Big|_{z=0} &= Q_{Z_1}(x,y,\tau),\\
-\lambda \frac{\partial T(x,y,z,\tau)}{\partial z}\Big|_{z=R_3} &= Q_{Z_2}(x,y,\tau).
\end{aligned} \quad . \quad (2)$$

где $a = \dfrac{\lambda}{c \cdot \rho}$ - коэффициент температуропроводности; λ - коэффициент теплопроводности; c - удельная теплоемкость; ρ - плотность материала; $Q_{X_1}(y,z,\tau)$, $Q_{X_2}(y,z,\tau)$, $Q_{Z_1}(x,y,\tau)$, $Q_{Z_2}(x,y,\tau)$ - суммарные тепловые потоки на соответствующие грани конструкции:

$$Q_{X_1} = q_{X_1}(\tau) + q_2(\tau)V_2(y,z) + \sum_{i=1}^{3} P_i(\tau)U_i(y,z);$$

$$Q_{X_2} = q_{X_2}(\tau) + \bar{q}_2(\tau)\bar{V}_2(y,z) + \sum_{i=4}^{6} P_i(\tau)U_i(y,z);$$

$$Q_{Z_1} = q_{Z_1}(\tau) + q_1(\tau)V_1(x,y);$$

$$Q_{Z_2} = q_{Z_2}(\tau) + \bar{q}_1(\tau)\bar{V}_1(x,y).$$

Теплообмен соответствующих граней с внешней средой отражается тепловыми потоками $q_{X_1}(\tau)$, $q_{X_2}(\tau)$, $q_{Y_1}(\tau)$, $q_{Y_2}(\tau)$, $q_{Z_1}(\tau)$, $q_{Z_2}(\tau)$, интенсивность тепловых потоков элементов ИИС $q_1(\tau)$, $q_2(\tau)$, $\bar{q}_1(\tau)$, $\bar{q}_2(\tau)$, сосредоточенных в областях $V_1(x,y)$, $\bar{V}_1(x,y)$, $V_2(y,z)$, $\bar{V}_2(y,z)$ граней призмы изменяется по соответствующей циклограмме, а интенсивность $P_i(\tau)$ тепловых потоков $УТ_i$, сосредоточенных в соответствующих областях на гранях $x = 0$ и $x = R_1$ изменяется в соответствии с заданным алгоритмом по командам бортового компьютера для предотвращения недопустимых термодеформаций.

III. Система автоматического управления тепловым режимом конструкции

Для синтеза САУ воспользуемся преобразованием по Лапласу соответствующей функции Грина краевой задачи (1),(2), которое определяет передаточную функцию объекта управления (ОУ).

$$G(x,\xi_x,y,\xi_y,z,\xi_z,p) = \frac{1}{c\rho R_1}\left[\frac{1}{p} + 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{k_{x,\xi_x}}{p+\mu_n^2}\right] + \frac{1}{c\rho R_2}\left[\frac{1}{p} + 2\sum_{m=1}^{\infty}\frac{k_{y,\xi_y}}{p+\psi_m^2}\right] + \frac{1}{c\rho R_3}\left[\frac{1}{p} + 2\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{z,\xi_z}}{p+\gamma_k^2}\right] \quad . \quad (3)$$

$$k_{x,\xi_x} = 2\frac{R_1}{a\pi^2 n^2}\cos\left(\pi n\frac{x}{R_1}\right)\cos\left(\pi n\frac{\xi_x}{R_1}\right). \quad (4)$$

$$k_{y,\xi_y} = 2\frac{R_2}{a\pi^2 m^2}\cos\left(\pi m\frac{y}{R_2}\right)\cos\left(\pi m\frac{\xi_y}{R_2}\right). \quad (5)$$

$$k_{z,\xi_z} = 2\frac{R_3}{a\pi^2 k^2}\cos\left(\pi k\frac{z}{R_3}\right)\cos\left(\pi k\frac{\xi_z}{R_3}\right). \quad (6)$$

где x,y,z - координаты точек контроля $K_1 \div K_6$, а ξ_x, ξ_y, ξ_z - координаты точек дислокации теплоисточников $U_1 \div U_4$ и $УТ_1 \div УТ_6$.

Собственные числа в рассматриваемой краевой задаче имеют вид: $\mu_n = \dfrac{1}{\sqrt{T_{xn}}}, \psi_m = \dfrac{1}{\sqrt{T_{ym}}}, \gamma_k = \dfrac{1}{\sqrt{T_{zk}}}$.

Тем самым в соответствии с (3) ОРП допускает структурное представление по каждой координате в виде параллельного соединения интегрирующего звена и бесконечного числа типовых апериодических звеньев

$$W(x,\xi_x,y,\xi_y,z,\xi_z,p)=\frac{1}{c\rho R_1}\left[\frac{1}{p}+2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{k_{x,\xi_x}}{T_{xn}p+1}\right]+\frac{1}{c\rho R_2}\left[\frac{1}{p}+2\sum_{m=1}^{\infty}\frac{k_{y,\xi_y}}{T_{ym}p+1}\right]+\frac{1}{c\rho R_3}\left[\frac{1}{p}+2\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{z,\xi_z}}{T_{zk}p+1}\right]. \quad (7)$$

с коэффициентом передачи $K_{об}=f(k_{x,\xi_x},k_{y,\xi_y},k_{z,\xi_z})$ и постоянными времени:

$$T_{xn}=\frac{R_1^2}{a\pi^2n^2},\ T_{ym}=\frac{R_2^2}{a\pi^2m^2},\ T_{zk}=\frac{R_3^2}{a\pi^2k^2}. \quad (8)$$

На рис. 2 представлен обобщённый алгоритм управления системой с регулятором переменной структуры, реализующим, в зависимости от величины рассогласования, релейный и пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования.

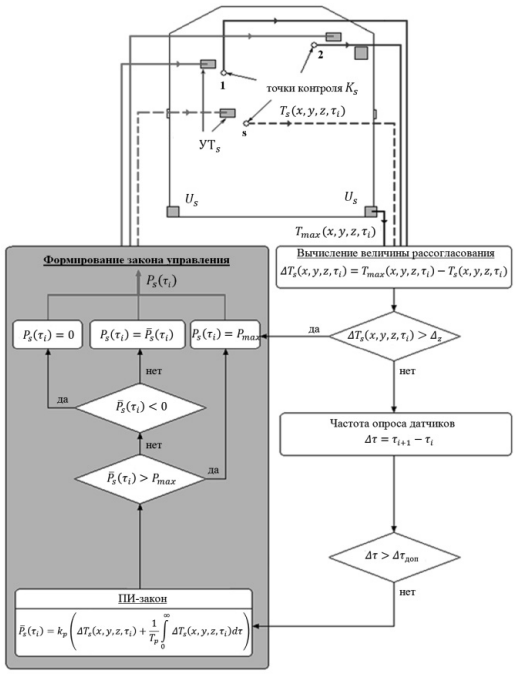


Рис. 2. Обобщенный алгоритм управления

Вычисленная путем решения краевой задачи (1), (2) или полученная от встроенных датчиков информация о температуре максимально нагретой точки конструкции $T_{max}(x,y,z,\tau_i)$ поступает на контроллер, в котором на первом шаге вычисляется величина рассогласования:

$$\Delta T_s(x,y,z,\tau_i)=T_{max}(x,y,z,\tau_i)-T_s(x,y,z,\tau_i). \quad (9)$$

между максимальной температурой $T_{max}(x,y,z,\tau_i)$ и температурой в s-ой точке контроля $T_s(x,y,z,\tau_i)$.

На втором шаге значение $\Delta T_s(x,y,z,\tau_i)$ сравнивается с заданным значением Δ_z при котором происходит переключение регулятора между релейным и ПИ-законом регулирования. Упрощенная структурная схема САУ представлена на рис. 3. Если $\Delta T_s(x,y,z,\tau_i)\le\Delta_z$, то значение $\Delta T_s(x,y,z,\tau_i)$, в зависимости от дискретизации шага по времени $\Delta\tau$, участвует в формировании ПИ-закона регулирования (рис. 4). На третьем шаге ограничивается мощность $P_s(\tau_i)$ $УТ_s$:

$$0\le P_s(\tau_i)\le P_{max}. \quad (10)$$

На четвертом шаге контроллер формирует мощность каждого элемента $УТ_s$, при релейном управлении в зависимости от значения $\Delta T_s(x,y,z,\tau_i)$. Алгоритм работает в режиме реального времени τ_i, i - номер шага дискретизации времени τ.

Распределение $УТ_s$ определяется по результатам имитационного конечно-элементного моделирования в программном комплексе ANSYS, причем $УТ_s$ располагаются в самых «холодных точках», выявленных на модели.

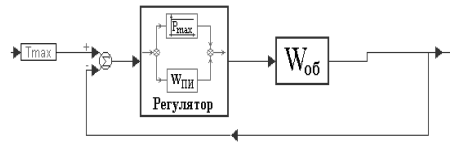


Рис. 3. Упрощенная структурная схема САУ

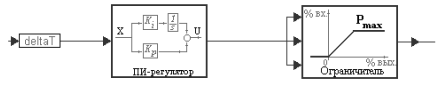


Рис. 4. Структурная схема ПИ-регулятора

На вход блока «Регулятор» (рис. 3) поступает разность (9). На выходе регулятора формируется значение мощности $УТ_s$. При этом выполняются ограничения (10). Максимальная мощность P_{max} определяется в зависимости от допустимой мощности $P_{доп}$, $P_{max}\ge P_{доп}$, которая определяется выражением: $P_{доп}=\frac{\Delta T^0}{K_{об}}$, где $K_{об}$ - эквивалентный коэффициент передачи в передаточной функции (7). Регулятор, меняя свою структуру, реализовывает:

1) релейный закон управления

$$P(\tau)=\begin{cases}P_{s\,max}, \Delta T_s \geq \varepsilon \\ 0, \Delta T_s < \varepsilon\end{cases}, \; s=1,2,3.... \qquad (11)$$

2) ПИ-закон

$$P(\tau)=\begin{cases}P_{max}, \Delta T \geq \Delta_z \\ k_p \Delta T(\tau)+\dfrac{k_p}{T_p}\int_0^{\infty}\Delta T(\tau)d\tau, \varepsilon \leq \Delta T \leq \Delta_z \\ 0, \Delta T < \varepsilon\end{cases}. \qquad (12)$$

Здесь ε - зона нечувствительности регулятора.

На рис. 5 представлены переходные процессы при различных настройках ПИ-регулятора.

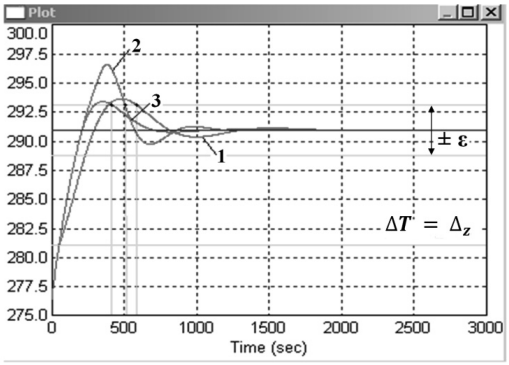


Рис. 5. Переходные процессы в САУ с ПИ-регулятором

IV. Заключение

Анализ системы, работающей по предложенному алгоритму, представленному на рис. 2, выполнен в программной среде ANSYS и учитывает циклограммы тепловыделений измерительных приборов и внешних тепловых потоков по шести направлениям.

Распределение температур в конструкции до и после регулирования приведено на рис. 6-7.

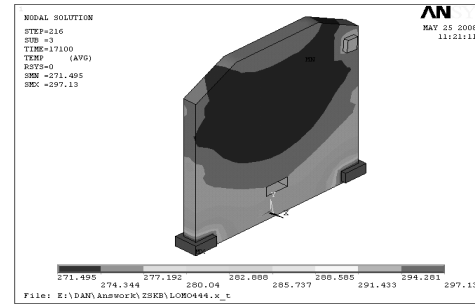


Рис. 6. Температурное поле несущей конструкции без регулирования

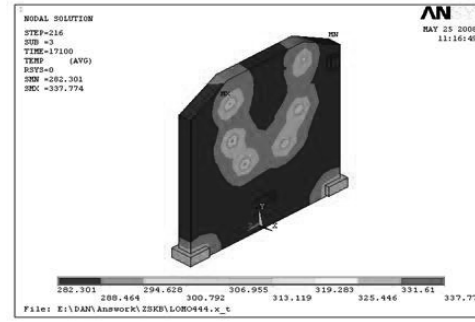


Рис. 7. Температурное поле несущей конструкции с САУ

Список литературы

[1] Лившиц М.Ю., Деревянов М.Ю., Копытин С.А. Распределенное управление температурными режимами элементов конструкций автономных объектов // Материалы XIV Минского международного форума по тепло и массообмену / Минск, 2012. Т. 1. Часть 1. С. 719-722.

[2] Borodulin B.B., Livshits M.Y. Optimal Control of Temperature Modes of the Instrumental Constructions of Autonomous Objects // EPJ Web of Conferences / Volume 110, 2016 / Thermophysical Basis of Energy Technologies 2015

[3] Borodulin B.B., Livshits M.Y., Korshikov S.E. Optimization of Temperature Distributions in Critical Cross-sections of Load-bearing Structures of Measurement Optical Systems of Autonomous Objects// MATEC Web of Conferences//Volume 92, 2017// Thermophysical Basis of Energy Technologies (TBET-2016) Tomsk, Russia, October 26-28, 2016

Оптимальный дискретный закон управления вращением зонда с малой инерционной асимметрией при спуске в атмосфере Марса

Любимов В.В.
Самарский университет
Самара, Россия
vlubimov@mail.ru

Куркина Е.В.
Самарский университет
Самара, Россия
ekaterina.kurkina@mail.ru

***Abstract* — We consider a dynamic system describing the perturbed motion of a descent probe with small inertial asymmetry about the center of mass in the atmosphere of Mars. The aim of this work is obtaining an approximate discrete optimal control law of angular velocity of the probe. The dynamic programming method and the non-resonant averaging method are used in the synthesis of the angular velocity control law. The reliability of the obtained controlling law is confirmed by the results of numerical modeling of the angular velocity.**

Ключевые слова — оптимальное управление, дискретный закон, спускаемый зонд, асимметрия, атмосфера, Марс

I. Введение

Одной из основных задач современной космонавтики является перелёт автоматических космических аппаратов с Земли на Марс. Следует отметить, что указанный перелёт представляет собой сложную научно-техническую задачу. Негативное возмущающее воздействие в процессе атмосферного спуска может оказывать влияние асимметрии космического аппарата. Известно [1-5], что присутствие асимметрии может способствовать реализации разнообразных резонансных явления, которые может привести к развитию аварийных ситуаций при движении космических аппаратов и спутников. Кроме того, в современной науке часто возникает необходимость учёта информационной асимметрии [6]. История применения автоматических космических аппаратов (КА) для выполнения межпланетных перелётов Земля-Марс содержит несколько аварийных ситуаций. Например, космические аппараты «Schiaparelli», «Mars-2», «Марс-5», «Beagle-2» разбились о поверхность планеты из-за неправильной ориентации спускаемого аппарата или сбоев в инерциальной навигационной измерительной системе [7-9]. Кроме того, спускаемый космический аппарат по исследованию климата и поверхности Марса «Mars Polar Lander» также не выполнил своей целевой задачи, потерпев аварию во время посадки [10]. Известно, что увеличение угловой скорости приводит к сбоям в работе парашютной системы и может привести к аварии при посадке на поверхность планеты. По этой причине необходимо соблюдать заданные малые ограничения величины угловой скорости спускаемого КА [11]. Рассматривается динамическая система, описывающая возмущенное движение спускаемого зонда как твёрдого тела с малой инерционной асимметрией относительно центра масс в атмосфере Марса. Для исследования устойчивости управляемого движения зонда производится линеаризация исходной системы. Целью работы является получение приближенного дискретного оптимального закона управления угловой скоростью зонда. Предполагается, что управление угловой скоростью на практике осуществляется в нерезонансном случае посредством бортовых реактивных двигателей малой тяги. При синтезе дискретного управления используется метод динамического программирования [12] и нерезонансная схема метода усреднения [13].

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

II. Математическая модель

Квазилинейные уравнения движения космического аппарата относительно центра масс [14] при малых положительных угловых скоростях, малых значениях пространственного угла атаки, малых инерционных асимметриях с учетом малого момента от действия реактивных двигателей и малого демпфирующего момента примут вид [15]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\varepsilon \frac{\bar{m}_I}{\bar{I}_x} \omega_x \cos(\theta + \theta_1), \qquad (1)$$

$$\frac{d\omega_x}{dt} = \varepsilon \frac{m_x^{\omega_x} qSL^2}{\bar{I}_x V} \omega_x + \varepsilon u, \qquad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = (1 - \bar{I}_x)\omega_x, \qquad (3)$$

где ε - малый параметр, характеризующий величину инерционной асимметрии, управляющего и демпфирующего моментов, $u = M_x^d / I_x$ - управление двигателями малой тяги, M_x^d - механический момент от действия двигателей малой тяги, ω_x - угловая скорость зонда относительно оси OX, α - пространственный угол атаки, θ - быстрая переменная, $\theta = \varphi - \pi/2$, φ - аэродинамический угол крена, $m_x^{\omega_x}$ - коэффициент демпфирующего аэродинамического момента, $\bar{m}_I$ - параметр, определяющий величину инерционной асимметрии, $\bar{m}_I = \sqrt{\bar{I}_{xz}^2 + \bar{I}_{xy}^2}$, θ_1 - параметр, который определяет расположение инерционной асимметрии относительно системы координат OXYZ, $\bar{I}_x = I_x / I$; I_x и $I_y = I_z = I$ - осевые моменты инерции зонда, $\bar{I}_{xy} = I_{xy} / I$, $\bar{I}_{zx} = I_{zx} / I$, I_{xy}, I_{zx} - центробежные

моменты инерции зонда, q - скоростной напор, S-площадь миделевого сечения, L - длина зонда.

III. Оптимальное управление

Предположим, что начальная величина угловой скорости равна $\omega_0 = \omega(t_0)$. Определим управление $u_0 \in U$, переводящее угловую скорость $\omega_0 = \omega(t_0)$ за минимальное время в нулевое положение $\omega_T = \omega(T) = 0$.

Применяя метод Беллмана [16], запишем квадратичный критерий оптимальности в следующем виде:

$$I = \varepsilon \int_0^T (C_1 \omega_x^2 + C_2 u^2) dt . \qquad (4)$$

где C_1 , C_2 - весовые коэффициенты критерия оптимальности.

При решении задачи оптимизации угловой скорости используем принцип Беллмана. В результате для системы уравнений (1) – (3) с учётом критерия (4) получаем уравнение:

$$\min_u \left(\varepsilon C_1 \omega_x^2 + \varepsilon C_2 u^2 + \frac{\partial \nu}{\partial \omega_x}\frac{d\omega_x}{dt} + \frac{\partial \nu}{\partial \alpha}\frac{d\alpha}{dt} + \frac{\partial \nu}{\partial \theta}\frac{d\theta}{dt} \right) = 0. \qquad (5)$$

Здесь $\nu(\alpha, \omega_x, \theta)$ - производящая функция.

После подстановки в уравнение (5) производных $\frac{d\omega_x}{dt}, \frac{d\theta}{dt}, \frac{d\alpha}{dt}$ системы уравнений (1) - (3), получаем:

$$\min_u \left(C_1 \omega_x^2 + C_2 u^2 + \frac{\partial \nu}{\partial \omega_x}(K\omega_x + u) + \right.$$

$$\left. + \frac{\partial \nu}{\partial \alpha}\left(-\frac{\bar{m}_I}{\bar{I}_x}\omega_x \cos(\theta + \theta_1) \right) + \frac{\partial \nu}{\partial \theta}\left((1 - \bar{I}_x)\omega_x\right) \right) = 0 , \qquad (6)$$

Здесь $K = \frac{m_x^{\omega_x} qSL^2}{\bar{I}_x V}$ - известная функция (K<0). При выделении в уравнении (6) отдельно слагаемых, зависящих от управления u , получим функцию:

$$F(u) = C_2 u^2 - \frac{\partial \nu}{\partial \omega_x} u.$$

Необходимое условие минимума функции $F(u)$ имеет следующий вид:

$$\frac{\partial F}{\partial u} = 2C_2 u - \frac{\partial \nu}{\partial \omega_x} = 0. \qquad (7)$$

Следует отметить, что осуществляется выполнение достаточного условия минимума $F(u)$. Действительно, получаем:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial u^2} = 2C_2 > 0. \qquad (8)$$

Таким образом, оптимальное управление u^0 находится из решения уравнения (7):

$$u^0 = -\left(\frac{\partial \nu}{\partial \omega_x}\right)\frac{1}{2C_2}. \qquad (9)$$

После подстановки управления (9) в уравнение (6) получаем уравнение Беллмана:

$$C_1 \omega_x^2 + C_2 \left(\frac{\partial \nu}{\partial \omega_x}\right)^2 \frac{1}{4C_2^2} + \frac{\partial \nu}{\partial \omega_x}(K\omega_x) - \left(\frac{\partial \nu}{\partial \omega_x}\right)^2 \frac{1}{2C_2} -$$

$$- \frac{\partial \nu}{\partial \alpha}\left(\frac{\bar{m}_I}{\bar{I}_x}\omega_x \cos(\theta + \theta_1) \right) + \frac{\partial \nu}{\partial \theta}\left((1 - \bar{I}_x)\omega_x\right) = 0. \qquad (10)$$

Далее будем искать решение уравнения (10) с учётом уравнений (1)-(3) в нерезонансном случае в виде асимптотических рядов:

$$\begin{cases} \omega_x = \omega_x^0 + \varepsilon u_1\left(\omega_x^0, \alpha^0, \theta^0\right) + \ldots \\ \alpha = \alpha^0 + \varepsilon u_1^{\alpha}\left(\omega_x^0, \alpha^0, \theta^0\right) + \ldots \\ \theta = \theta^0 + \varepsilon U^{\theta}\left(\omega_x^0, \alpha^0, \theta^0\right) + \ldots \\ \nu = \nu^0 + \varepsilon \nu_1\left(\omega_x^0, \alpha^0, \theta^0\right) + \ldots \end{cases} \qquad (11)$$

Здесь $\omega_x^0, \theta^0, \alpha^0$ - усреднённые переменные системы (1)-(3), функции $u_x^j\left(\omega_x^0, \theta^0, \alpha^0\right)$, $\theta_1\left(\omega_x^0, \theta^0, \alpha^0\right)$, $\nu^0\left(\omega_x^0, \alpha^0\right)$, $\nu_j\left(\omega_x^0, \theta^0, \alpha^0\right), (j = 1, 2, ..)$ требуется найти.

В соответствии с нерезонансной схемой метода усреднения получаем:

$$\begin{cases} \left\langle \frac{\partial \nu_1}{\partial \theta^0}\left((1 - \bar{I}_x)\omega_x^0\right) \right\rangle = 0, \\ \nu = \nu^0(\omega_x, \alpha) + \varepsilon \nu^1(\omega_x, \alpha, \theta) + \ldots \end{cases} \qquad (12)$$

Пусть $\alpha = const$ и $\nu = A(\omega_x)^2$.

Подставляя асимптотические ряды (11) в уравнение Беллмана (10) и, учитывая условия (12), получим с точностью до членов второго порядка малости $o(\varepsilon^2)$:

$$C_1\left(\omega_x^0\right)^2+C_2\left(\frac{\partial\nu^0}{\partial\omega_x^0}\right)^2\frac{1}{4{C_2}^2}+\left(\frac{\partial\nu^0}{\partial\omega_x^0}\right)(K\omega_x^0)-\left(\frac{\partial\nu^0}{\partial\omega_x^0}\right)^2\frac{1}{2C_2}-$$

$$-\frac{\partial\nu^0}{\partial\alpha^0}\left(\frac{\bar{m}_l}{\bar{I}_x}\omega_x^0\cos(\theta^0+\theta_1)\right)+\frac{\partial\nu_1}{\partial\theta^0}\left((1-\bar{I}_x)\omega_x^0\right)=0. \quad (13)$$

При этом в первом приближении метода усреднения:

$$C_1{\omega_x}^2+C_2\left(\frac{\partial\nu}{\partial\omega_x}\right)^2\frac{1}{4{C_2}^2}+\frac{\partial\nu}{\partial\omega_x}(K\omega_x)-\left(\frac{\partial\nu}{\partial\omega_x}\right)^2\frac{1}{2C_2}=0. \quad (14)$$

Порождающее решение уравнения (14) можно найти методом неопределённых коэффициентов [17]:

$$\nu^0=A\left(\omega_x^0\right)^2. \quad (15)$$

С этой целью выполним подстановку выражения (15) в уравнение (14):

$$\varepsilon(\omega_x)^2\left[C_1\cdot 4A^2\frac{1}{4{C_2}^2}+K\cdot 2A-\frac{4A^2}{2C_2}\right]=0. \quad (16)$$

Если мы рассматриваем случай $\omega_x^0\neq 0,\ A\neq 0$, то из уравнения (16) получаем:

$$\frac{C_1\cdot A}{{C_2}^2}+2K-\frac{2A}{C_2}=0. \quad (17)$$

В дальнейшем не будем указывать индекс «о» для усреднённых значений переменных, управления (9) и порождающего решения (15).

Из решения уравнение (17), получаем

$$A=-\frac{2K}{{C_2}^2(C_1-C_2)}. \quad (18)$$

Среди решений (18) следует выбирать только положительные, поскольку данные решения обеспечивают положительную определённость производящей функции

$$\nu=A\omega_x^2. \quad (19)$$

Следовательно, для положительности A при отрицательных K должно выполняться условие $C_1-C_2>0$.

Порождающее решение (15) подставляем в выражения для непрерывного управления (9), применяемое также в работе [15]:

$$u^0=-\frac{A\omega_x}{C_2}. \quad (20)$$

Далее подставим управление (20) в исходные уравнения (1)-(3). С учётом первого приближения метода усреднения получаем:

$$\frac{d\omega_x}{dt}=\varepsilon K\omega_x-\frac{A}{C_2}\omega_x. \quad (21)$$

Из уравнения (21) следует, что поскольку $A>0$, то данное уравнение обеспечивает асимптотическую устойчивость ω_x.

IV. Дискретное управление и его устойчивость

При непрерывном управлении получаем следующую задачу Коши. Для этого рассмотрим уравнение

$$\frac{d\omega_x}{dt}=K\left(1+\frac{2}{{C_2}^3(C_1-C_2)}\right)\omega_x. \quad (22)$$

при начальном условии $\omega_x(0)=\omega_{x0}$.

Линейная дискретная модель, соответствующая задаче Коши (21) для простейшего явного метода Эйлера имеет вид:

$$\omega_x(n+1)=\omega_x(n)+hc\omega_x(n), \quad (23)$$

где $c=K\left(1+\frac{2}{C_2^3\ (C_1-C_2)}\right)$, $n=0, 1, 2,..$

Следует отметить, что применение простейшего метода Эйлера в данном задаче обусловлено небольшим интервалом времени интегрирования, составляющим несколько минут. Численное моделирование подтверждает, что глобальной погрешности этого метода (имеющего порядок *o(h)*) достаточно для получения достоверных результатов.

Для анализа устойчивости решения уравнения (23) запишем его следующим образом:

$$\omega_x(n+1)+\omega_x(n)\left[-1-hc\right]=0. \quad (24)$$

Характеристическое уравнение принимает вид:

$$\lambda-\left[1+hc\right]=0. \quad (25)$$

Отсюда находим максимальное значение шага интегрирования: $\lambda=1+hc$. Для обеспечения асимптотической устойчивости решения дискретного уравнения (23) необходимо и достаточно выполнение условия [17]:

$$|\lambda| = |1 + hc| < 1. \quad (26)$$

Условие устойчивости (26) выполняется, если постоянная c удовлетворяет условию:

$$-h^{-1} < c < 0. \quad (27)$$

Здесь $h>0$. Условие (27) позволяет оценить величину постоянной c.

Решая неравенство (26) относительно h получим:

$$h \in \left(0, -\frac{2}{c}\right). \quad (28)$$

Следовательно, для асимптотической устойчивости решения дискретного уравнения (23) необходимо и достаточно, чтобы величина шага интегрирования методом Эйлера принадлежала интервалу (28) при одновременном выполнении условия (27). При этом критическое значение шага интегрирования: $h_{кр} = -\frac{2}{c}$. Если шаг интегрирования определяется из выполнения условия $h \geq h_{кр}$, то численное решение дискретного уравнения (24) является неустойчивым. Искомые дискретные значения угловой скорости ω_x определяются из линейного дискретного уравнения (23) с учётом начального условия $\omega_x(0) = \omega_{x0}$ и при выполнении условий (27), (28). Подставляя найденное значение ω_x в выражение (20) получаем дискретный закон управления угловой скоростью зонда:

$$u = -B\omega_x. \quad (29)$$

Здесь $B = \frac{A}{C_2}$.

Кроме того, представляет интерес решение линейных дискретных уравнений более общего вида, чем уравнение (23), которые могут быть решены посредством применения z-преобразования [17]. Решение данных уравнений предполагается рассмотреть в последующих публикациях.

V. Численные результаты

Производилось численное моделирование движения спускаемого космического зонда с малой инерционной асимметрией в атмосфере Марса. При этом применялась квазилинейная система уравнений относительного движения космического аппарата (1)-(3). Численное решение системы (1)-(3) осуществлялось совместно с системой трёх уравнений движения центра масс для скорости центра масс, высоты полёта и угла наклона траектории [1]. Предполагалось, что спускаемый космический зонд имеет массово-инерционные параметры, соответствующие «Mars Polar Lander» [10].

На рис. 1 показано изменение угловой скорости спускаемого космического зонда «Mars Polar Lander» в марсианской атмосфере при оптимальном управлении, осуществляемом в соответствии с непрерывным законом управления (20).

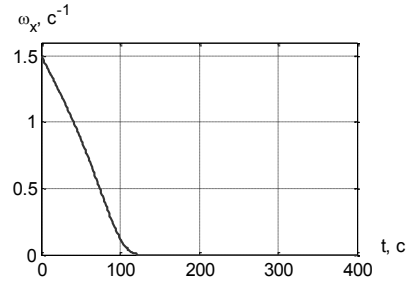


Рис. 1. Управление угловой скоростью при непрерывном законе

На рис. 2 представлено управлние угловой скоростью спускаемого зонда «Mars Polar Lander» при использовании дискретного закона управления (29).

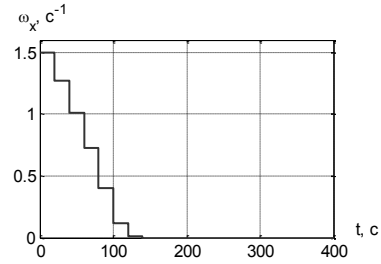


Рис. 2. Рис. 2. Управление угловой скоростью при дискретном законе

Из сравнения результатов, показанных на рис.1 и рис.2 следует, что непрерывное и дискретное управления позволяют уменьшить угловую скорость КА от величины 1.5 c^{-1} до близких к нулю значений за одинаковое время, приблизительно равное 120 с. При численном моделировании использовалась следующая величина шага h=25 с. При этом условие (27) принимает вид: $-0.04 < c < 0$. Отметим, что условие (28) выполняется при рассматриваемом шаге h=25 с. Действительно, условие (28) записывается следующим образом: $h \in (0, 50)$. Отличительной особенностью дискретного управления от непрерывного является возможность использования для этих целей управления бортовые двигатели малой тяги, работающие в импульсном режиме. В частности, на рис.2 показано, что для решения задачи управления угловой скоростью требуется шесть включений бортовых двигателей, обеспечивающих малую величину силы тяги.

Численные моделирование позволяет также сделать вывод о том, что оптимальное дискретное управление позволяет решить задачу уменьшения угловой скорости в рассматриваемом случае более чем в четыре раза быстрее, чем данная задача может быть решена посредством действия только пассивного аэродинамического демпфирования.

VI. Заключение

Основным результатом работы является получение приближенного оптимального дискретного закона управления угловой скоростью зонда с малой инерционной асимметрией, производящего спуск в разряжённой атмосфере Марса. При получении дискретной модели управления для угловой скорости зонда быть применён простейший метод численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений - метод Эйлера первого порядка. На основе критерия асимптотической устойчивости решений дискретной модели удалось определить интервал величин шага численного интегрирования, который обеспечивает устойчивость процесса численного интегрирования. Приводятся результаты численного моделирования угловой скорости при управляемом движении зонда относительно центра масс. Полученный приближенный оптимальный дискретный закон управления угловой скоростью можно использовать также при моделировании спускаемого движения возвращаемых космических аппаратов с малой асимметрией в верхних разряжённых слоях атмосферы Земли, осуществляемый бортовыми реактивными двигателями малой тяги.

Список литературы

[1] Ярошевский В.А. Движение неуправляемого тела в атмосфере. - М: Машиностроение, 1978. – 168 с.

[2] Lyubimov V.V. Asymptotic analysis of the secondary resonance effects in the rotation of a spacecraft with small asymmetry in the atmosphere // Russian Aeronautics. 2014. Vol. 57. Is.3. - 245–252 pp.

[3] Lyubimov V.V. Numerical simulation of the resonance effect at Re-entry of a rigid body with low inertial and aerodynamic asymmetries into the atmosphere // CEUR Workshop Proceedings, Vol. 1490. 2015. - 198-210 p.p.

[4] Lyubimov V.V. Dynamics and control of angular acceleration of a re-entry spacecraft with a small asymmetry in the atmosphere in the presence of the secondary resonance effect // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings №7147134.

[5] Lyubimov V.V. Some features of disturbed rotational motion of a satellite with a strong onboard magnet // Russian Aeronautics. Vol. 52. Is. 2. 2009. -172-175 pp.

[6] Geras'kin M.I. Analysis of the influence of citizens' altruism on the effectiveness of the socially-optimal actions stimulation system // CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2212. 2018 - 431-439 pp.

[7] Crisp J. A. Mars Exploration Rover mission // J. Geophys. Res. 2003. No. E12. –17 pp.

[8] Bertaux, J. L. Mars Express: the scientific payload // Netherlands: ESA Publications Division. 2004.- p. 95 - 120.

[9] Schiaparelli EDM lander. https://en.wikipedia.org/wiki/Schiaparelli_EDM_lander

[10] Mars Polar Lander. https://ru.wikipedia.org/wiki/Mars_Polar_Lander.

[11] Huanga Yixin, Lia Shuang, Sunb Jun. Mars entry fault-tolerant control via neural network and structure adaptive model inversion // Advances in Space Research. 2019. Vol. 63. Is. 1. - pp. 557-571.

[12] Bellman R. Dynamic Programming. Princeton Land Marks in Mathematics. - Princeton. New Jersey. – 2010. -392 p.

[13] Sanders J. A., Verhulst F. and Murdock J. Averaging Methods in Nonlinear Dynamical Systems. -Springer-Verlag. New York. 2007. - 434 p.

[14] Zabolotnov Y. M. Asymptotic analysis of quasi-linear equations of the motion in the atmosphere of a spacecraft with a small asymmetry III // Cosm. Res. 1994. Vol.32. Is.4–5. -112–25 pp.

[15] Любимов В.В., Куркина Е.В. Оптимальное управление угловой скоростью асимметричного зонда в атмосфере Марса посредством двигателей малой тяги. – Общероссийский научно технический журнал «Полет», 2019. – №5.- С.31-36.

[16] Заболотнов, Ю.М. Оптимальное управление непрерывными динамическими системами: учебное пособие - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. - 148 с.

[17] Пантелеев А.В., Якимова А.С. Теория функций комплексного переменного и операционное исчисление в примерах и задачах. - М: Высшая школа, 2001. – 445 с.

Система управления аддитивным технологическим оборудованием для интеграции в гибкую производственную систему

Мартинов Г.М.
МГТУ «СТАНКИН»
г. Москва, Россия
martinov@ncsystems.ru

Коваленко А.В.
ОАО НИАТ
г. Москва, Россия
avk@niat.ru

***Abstract* — The paper considers the general scheme of the additive flexible production system: the main and auxiliary technological equipment is selected, process routes of various part classes are determined, the management features of both individual technological processes and the additive flexible production system as a whole are indicated. The paper substantiates the necessity of bringing control systems to a single standard for the effective integration of such equipment into the production line in order to promote further organization of additive workshops and additive plants. We suggest a block diagram of a unified CNC system to control various types of additive technological processes, such as selective laser melting, electron beam melting, fused deposition modeling, fused filament fabrication, direct metal disposition, laminated object manufacturing, etc. The paper outlines the features of managing various sources of technological influences: energy (laser sources, electron beam generators), chemical (inkjet print heads) - their main parameters are analyzed and summarized. The possible hardware and software platforms for the implementation of the proposed scheme of a unified CNC system are listed. The paper considers the option of implementing a specialized control system for additive manufacturing equipment basing on a common control platform.**

Ключевые слова — аддитивные технологии, классификация, гибкая производственная система, система ЧПУ.

I. Введение

По классификации Клауса Шваба очередным этапом развития технического и технологического оснащения современного общества станет четвёртая промышленная революция, в части производства именуемая как «Индустрия 4.0» [1]. «Индустрия 4.0» включает 9 направлений [2], в числе которых 3D-печать – единый подход к созданию физических объектов по цифровым моделям с использованием аддитивных технологий.

Одной из основных задач «Индустрии 4.0» является интеграция всех этапов жизненного цикла изделия в единое информационное пространство. Другой её задачей является организация взаимодействия машин без участия человека – создание так называемых «умных производств». Таким образом, перспективным направлением в рамках «Индустрии 4.0» является создание гибких производственных систем на базе аддитивного технологического оборудования – аддитивных гибких производственных систем, а также их дальнейшее развитие до аддитивных производств, построенных по концепции «завода-автомата» [3].

Новизна предлагаемого подхода заключается в расширении функциональных возможностей коммерческих систем ЧПУ для управления аддитивными технологическими процессами.

II. Структура аддитивной гибкой производственной системы

Типовая аддитивная гибкая производственная система (рис. 1) состоит из семи основных компонентов:

- производственно-технологической службы подготовки и организации производства, осуществляющей постановку изделий на производство и последующую координацию работ остальных подразделений. Функционирование данной службы обеспечивается сетевым сервером и набором рабочих станций;
- заготовительного производства, осуществляющего подготовку исходного материала и изготовление оснастки, необходимой для остальных производств. В зависимости от профиля аддитивной гибкой производственной системы, данное производство может оснащаться бункерами для сушки и просева порошковых материалов, различными системами подготовки проволоки и листового материала, а также металообрабатывающим технологическим оборудованием;
- аддитивного производства, являющегося ядром аддитивной гибкой производственной системы, собственно изготавливающего детали на технологическом оборудовании, реализующем, в зависимости от профиля аддитивной гибкой производственной системы, различные аддитивные технологии: SLM, EBM, DMD, SLA, LOM и ряда других;
- производственного подразделения предварительной обработки, которое в зависимости от специфики производственной системы выполняет: отделение деталей от подложек, удаление вспомогательных площадок и поддерживающих элементов, очистку деталей от остатков порошкового материала, черновую механическую обработку, термообработку и т.п. Также подразделение комплектуется металообрабатывающим технологическим

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (№ 2.1237.2017/4.6). При выполнении работы использовалось оборудование Федерального центра коллективного использования «Государственный инжиниринговый центр» МГТУ «СТАНКИН».

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

оборудованием, установками гидроабразивной резки, электроэрозионной и лазерной обработки, сушильными шкафами и печами;

- производственного подразделения финишной обработки, которое также зависит от используемых в аддитивном производстве технологий и при необходимости выполняет: чистовую механическую обработку, лазерную и механическую полировку, нанесение покрытий, маркировку и т.п. Операции в данном подразделении могут выполняться на прецизионном металлообрабатывающем технологическом оборудовании, установках виброударной обработки, лазерной и механической гравировки, лазерной полировки;
- подразделения контроля качества исходного материала и деталей, осуществляющего с помощью соответствующего оборудования входной контроль и исследование исходного материала, выходной контроль изделий (рентгеноструктурные и физико-механические исследования, контроль размеров, отклонений форм и качества поверхности), а также промежуточный контроль на всех этапах производства;
- склада, хранящего исходный материал и готовую продукцию. Склад также может быть автоматизирован.

Рис. 1. Структура типовой аддитивной гибкой производственной системы

Цикл изготовления детали в аддитивной гибкой производственной системе проходит под контролем производственно-технологической службы подготовки и организации производства и состоит из семи основных этапов (рис. 2). Взятый со склада 1 исходный материал проходит необходимую подготовку на заготовительном производстве 2, после чего передаётся в аддитивное производство 3, где из него изготавливаются детали. При этом неиспользованный материал возвращается в заготовительное производство 2 для повторной подготовки. Далее, в зависимости от технологий, используемых в аддитивном производстве 3, детали проходят соответствующую обработку в производственных подразделениях предварительной 4 и финишной обработки 5. Готовые детали проходят выходной контроль 6 и, в случае признаниях их годными, передаются на склад 7 для дальнейшей реализации.

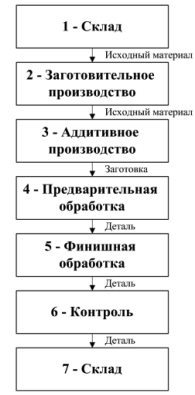


Рис. 2. Цикл изготовления детали в аддитивной гибкой производственной системе

Построенная по такой схеме аддитивная гибкая производственная система позволяет максимально автоматизировать все выполняемые операции на любом из перечисленных этапов и при этом может быть оперативно перенастроена под выпуск новой номенклатуры деталей. Очевидно, что аддитивное технологическое оборудование, применяемое в составе такой гибкой производственной системы, должно быть укомплектовано системой управления, поддерживающей интеграцию в цеховую производственную сеть. При этом в зависимости от профиля аддитивной гибкой производственной системы, применяемое в ней аддитивное технологическое оборудование может иметь различные конфигурации.

III. Классификация аддитивных технологических процессов и реализующего их технологического оборудования

Аддитивные технологические процессы и реализующее их технологическое оборудование можно сгруппировать по следующим показателям: тип исходного материала, природа воздействия, среда – тогда классификация аддитивного технологического оборудования образует трёхмерную матрицу (рис. 3).

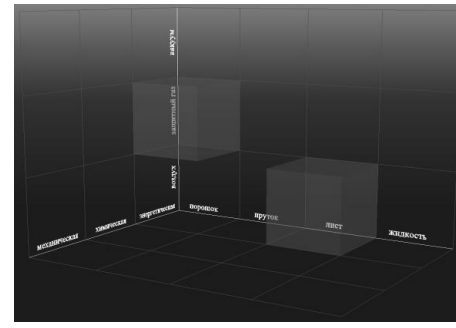


Рис. 3. Классификация аддитивных технологических процессов и реализующего их технологического оборудования. В качестве примера показаны: красным – SLM-технология, синим – SLA-технология

Любой из существующих в настоящее время аддитивных технологических процессов находится внутри этой матрицы. Например, SLM-технология образована пересечением (красный куб на рис. 3): тип исходного материала – порошок, природа воздействия – энергетическая, среда – защитный газ; SLA-технология (синий куб на рис. 3): тип исходного материала – лист (рулон), природа воздействия – энергетическая, среда – воздух. При этом, внутри каждого пересечения (тип исходного материала, природа воздействия, среда) возможно дальнейшее разделение: по химическому составу исходного материала (металл, керамика, полимерные материалы, композитные материалы, бумага), способу его подачи (для порошка – распределение по рабочей поверхности платформы, прямое осаждение), форме воздействия (для энергетического – лазерное, электронно-лучевое, дуговое).

При появлении новых решений (например, при использовании в качестве среды жидкости или активного газа), данная классификация может быть дополнена соответствующим образом.

Возможно создание некоторой обобщённой системы управления, полностью или частично учитывающей особенности всех аддитивных технологических процессов.

IV. Обобщенная схема системы управления аддитивным технологическим оборудованием

С позиции системы управления любое аддитивное технологическое оборудование формально можно представить в виде следующих компонентов (рис. 4): источник технологического воздействия, станочный комплекс и периферийное оборудование.

Источником технологического воздействия является устройство, оказывающее на исходный материал такое воздействие, которое приводит к локальному изменению состояния исходного материала с последующим формированием изготавливаемой детали. Так, в SLM-технологии в качестве источника технологического воздействия используется лазерный источник.

Рис. 4. Схема системы управления аддитивным технологическим оборудованием

Станочный комплекс также как и источник технологического воздействия участвует в формообразовании изготавливаемой детали. Функцией станочного комплекса является взаимное позиционирование источника технологического воздействия и изготавливаемой детали относительно друг друга.

К периферийным устройствам относятся все остальные узлы и агрегаты технологического оборудования, не участвующие непосредственно в процессе формообразования детали. Например, к числу периферийных устройств относятся: станция подготовки и подачи защитного газа, устройство подачи исходного материала, система охлаждения и т.п.

Стоит отметить, что в части управления работой станочного комплекса и периферийных устройств система управления аддитивным технологическим оборудованием полностью аналогична стандартной системе числового программного управления (ЧПУ), широко применяемой в механообрабатывающем технологическом оборудовании [4]. Одной из возможных схем реализации системы управления аддитивным технологическим оборудованием является её построение на базе коммерческой системы ЧПУ [5], использующей хорошо изученные механизмы управления станочным комплексом и периферийными устройствами [6].

Особенностью является источник технологического воздействия, обладающий собственным набором параметров и требующий специфичных алгоритмов управления.

V. Специфика управления различными источниками технологического воздействия

Как было сказано выше, источник технологического воздействия обладает собственным набором параметров, определяющих режим его работы – управляющих параметров. При этом данные параметры могут не полностью совпадать с технологическими – параметрами, записанными в технологической карте процесса. Случаи, когда управляющие параметры не совпадают с технологическими, будут рассмотрены далее.

По режиму работы управляющие параметры делятся на:

- интерполируемые – значение которых изменяется по заданному закону между кадрами управляющей программы [7];
- фиксированные – значение которых поддерживается постоянным на протяжении обработки.

По специфике управляющие параметры делятся на:

- геометрические – определяющие размеры и форму технологического воздействия;
- энергетические – определяющие количество энергии, подводимой в зону обработки за единицу времени.

При этом наличие всех вышеперечисленных типов параметров не является обязательных для каждого вида аддитивной обработки, однако её точность может косвенно характеризоваться количеством управляющих интерполируемых параметров (в первую очередь – геометрических).

A. Источник энергетического технологического воздействия

Основными источниками энергетического технологического воздействия, применяемыми в настоящее время в различных аддитивных технологиях, являются: лазерный луч, электронный луч и электрический дуговой разряд.

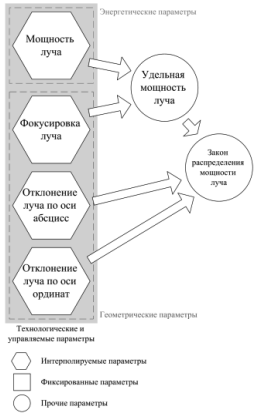


Рис. 5. Взаимосвязь параметров лазерного источника технологического воздействия

В частности, режим работы лазерного источника технологического воздействия определяется четырьмя параметрами (рис. 5) [8]: одним энергетическим (мощность луча) и тремя геометрическими (фокусировка луча, отклонение луча по осям абсцисс и ординат). При этом все четыре параметра являются технологическими и требуют интерполяции.

В отличие от лазерного, электронно-лучевой источник технологического воздействия имеет различные наборы технологических и управляющих параметров (рис. 6). Так, к управляющим параметрам относятся шесть параметров: три энергетических (сила тока нагрева катода, ускоряющее напряжение и управляющее напряжение) и три геометрических (сила тока фокусировки и две силы токов отклонения по осям абсцисс и ординат). Количество технологических параметров на единицу меньше: два энергетических (ускоряющее напряжение и сила тока) и три геометрических, повторяющих аналогичные управляющие. При этом сила тока луча имеет степенную зависимость от ускоряющего и управляющего напряжений [9].

Электродуговой источник технологического воздействия имеет всего один параметр, являющийся одновременно технологическим и управляющим интерполируемым параметром – силу тока дуги.

С позиции системы ЧПУ интерполируемые параметры источника технологического воздействия могут быть представлены в виде виртуальных осей, аналогичных осям станочного комплекса. Задание значений фиксированных параметров может быть реализовано при помощи М-команд или глобальных переменных системы ЧПУ.

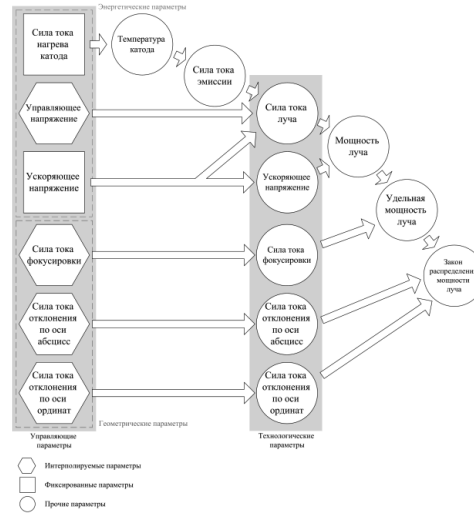


Рис. 6. Взаимосвязь параметров электронно-лучевого источника технологического воздействия

B. Источник химического технологического воздействия

В качестве источника химического технологического воздействия обычно используется печатающая готовка с одним или упорядоченным набором из нескольких сопел, обеспечивающих дозированную дискретную подачу жидкого вещества. В зависимости от конкретной технологии, подаваемое вещество может использоваться в качестве рабочего материала, из которого производится построение детали, или в качестве реагента, вступающего в химическую реакцию с рабочим материалом (как правило, порошком) с последующим формированием детали.

В связи с тем, что дозировка в таких головках обеспечивается аппаратно, управление подачей жидкого вещества осуществляется при помощи дискретных разрешающих сигналов, синхронизированных с перемещением самой печатающей головки. Такие сигналы не требуют внесения в управляющую программу дополнительных команд и реализуются средствами системы ЧПУ.

C. Источник механического технологического воздействия

Поскольку источником механического технологического воздействия является лезвийный режущий инструмент, с позиции системы управления данный тип источника технологического воздействия может быть включён в станочный комплекс. Такое аддитивное технологическое оборудование в настоящее время практически не используется, его можно рассматривать как частный случай механообрабатывающего технологического оборудования.

VI. Компоновка специализированной системы управления аддитивным технологическим оборудованием

Компоновку системы управления аддитивным технологическим оборудованием рассмотрим на примере управляющей платформы «АксиОМА Контрол» [10].

Большинство систем управления аддитивным технологическим оборудованием требуют три интерполируемые координаты и один канал управления, на котором выполняется управляющая программа. Например, системы управления для послойного лазерного синтеза изделий из металлических или керамических порошков используют три линейные оси и один канал управления [11]. Система управления аналогичной компоновки требуется для послойной наплавки материала из проволоки. Четыре и более интерполируемые координаты требуются для управления аддитивным технологическим оборудованием для восстановления пресс-форм и штампов с использованием наплавления материала в виде проволоки. Для управления таким оборудованием используют, как правило, три линейные и две круговые оси. Два канала управления могут быть использованы для технологического оборудования, реализующего совместно аддитивную технологию и механическую обработку. На одном канале управления выполняется управляющая программа для получения заготовки по аддитивной технологии, а на втором - управляющая программа для механической обработки этой заготовки и получения изделия.

Более сложной задачей является управление источником технологического воздействия. Управление параметрами источника воздействия решается на уровне программы программируемого логического контроллера (ПЛК). Вызов ПЛК программы в управляющую программу системы ЧПУ осуществляется с использованием вспомогательных М-функций [12], или через прямое управление входами/выходами электроавтоматики с вызовом подготовительных функций G110/G111 [13]. Конфигурация вспомогательных М-функций, как и привязка адресов входов/выходов электроавтоматики осуществляется производителем аддитивного технологического оборудования.

Управление интерполируемыми параметрами источника технологического воздействия предполагает их синхронизацию с параметрами интерполяции движения при формообразовании. Например, управление мощностью лазера в зависимости от текущей контурной скорости (подачи). Возможно несколько решений при использовании управляющей платформы «АксиОМА Контрол»:

- с использованием интерфейса ЧПУ-ПЛК;
- с использованием внешнего устройства;
- с использованием внешнего интерполятора.

Вариант создания нового типа интерполяции в ядре системы ЧПУ не рассматривается, та как требует полностью открытого кода ядра системы ЧПУ.

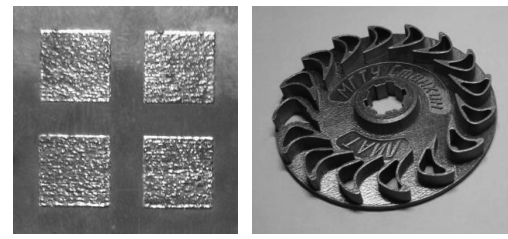
Решение на базе *интерфейса ЧПУ-ПЛК* предполагает передачу в ПЛК [14] параметра интерполяции движения на каждом такте интерполяции. ПЛК программа реализует управление интерполируемыми параметрами источника технологического воздействия. Следует учитывать, что управление будет запаздывать на один такт интерполяции, но ошибку можно снизить, уменьшив такт интерполяции до 1 или 0,5 мсек.

Решение на базе *внешнего устройства* предполагает использование Ethernet-контроллера [15] периферийных устройств, реализующего специфику управления исполнительными устройствами (в нашем случае источником технологического воздействия). Для ядра системы ЧПУ контроллер внешнего устройство выглядит как интеллектуальный привод (или набор приводов), которому на каждом такте интерполяции передаются текущие значения параметров интерполяции и текущее задание на исполнение.

Решение на базе *внешнего интерполятора* предполагает подключения к системе ЧПУ проприетарных устройств сторонних производителей, имеющих закрытое решение. Например, подключение лазера со сканатором, управляемого от автономного контролера на плате PCI со своим собственным интерполятором. Синхронизация интерполятора системы ЧПУ с интерполятором автономного контролера на плате PCI происходит по интервалу выполнения заданий. По схеме внешнего интерполятора реализована рассмотренная ниже установка послойного лазерного синтеза.

В рамках совместного проекта ОАО НИАТ и МГТУ «СТАНКИН» разработан опытный образец установки послойного лазерного синтеза с системы управления «АксиОМА Контрол» с рабочей областью 350x350x300 мм. Экспериментальные образцы (рис. 7 a)), получены послойным спеканием в атмосфере аргона с примесью воздуха, при толщине слоя 100 мкм, при разной скорости и шаге штриховки. Экспериментальные образцы по горизонтали соответствуют скоростям перемещения луча в 80 и 120 мм/сек, а по вертикали – шагу штриховки в 75 и 100 мкм. Мощность излучения лазера составляет 170 Вт, а диаметр луча - 150 мкм.

Выращивание готового изделия (рис. 7 b)), осуществлялось в атмосфере практически чистого аргона при спекании слоев толщиной 100 мкм, при скорости луча 80 мм/сек и мощности излучения 170 Вт [16].



a) *b)*

Рис. 7. Экспериментальные образцы слоёв и готовые изделия, полученные методом послойного синтеза

VII. Заключение

Как уже было сказано, функционально бóльшая часть системы управления аддитивным технологическим оборудованием аналогична стандартной системе ЧПУ, в связи с чем одним из вариантов реализации такой системы управления является её построение на базе коммерческой системы ЧПУ [17]. Для этого базовая система ЧПУ должна отвечать следующим требованиям:

- наличие открытой архитектуры ядра;
- достаточное количество одновременно интерполируемых осей – в зависимости от сложности аддитивного технологического оборудования, количество одновременно интерполируемых осей может достигать 10 штук и более.

Помимо прочего, создание системы управления аддитивным технологическим оборудованием на базе системы ЧПУ, используемой в технологическом оборудовании на остальных подразделениях (в первую очередь, производственных подразделениях предварительной и финишной обработки) позволит повысить степень унификации и сократить сроки на подготовку обслуживающего и технологического персонала.

Перспективным выглядит использование в качестве базовой системы ЧПУ отечественной разработки «АксиОМА Контрол», отвечающей вышеперечисленным требованиям и обладающей широким потенциалом для дальнейшего развития и модернизации [18].

Список литературы

[1] Шваб К. Четвёртая промышленная революция. - М: Эксмо, 2016. - 138 с.

[2] Bondar K. What is in reality Industry 4.0? (www.innovacima.com/en/2017/11/09/what-is-industry-4-0).

[3] Сироткин О.С. Современное состояние и перспективы развития аддитивных технологий // Авиационная промышленность, 2015. №2. - с. 22–25.

[4] Martinova L., Martinov G. (2018). Automation of Machine-Building Production According to Industry 4.0. In: 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications. Vladivostok, pp.1-4. (https://doi.org/10.1109/RPC.2018.8482165).

[5] Коваленко А.В. Концепция универсальной системы ЧПУ для современного технологического оборудования // Авиационная промышленность, 2011. №4. - с. 36-41.

[6] Nezhmetdinov R., Sokolov S., Obukhov A., Grigor'ev A. (2014). Extending the functional capabilities of NC systems for control over mechano-laser processing. Automation and Remote Control, 75(5), pp.945-952. (https://doi.org/10.1134/S0005117914050129).

[7] Martinov G., Martinova L. (2010). Trends in the numerical control of machine-tool systems. Russian Engineering Research, 30(10), pp.1041-1045. (https://doi.org/10.3103/S1068798X10100175).

[8] Коваленко А.В., Орешкин О.М. Особенности управления технологическими процессами электронно-лучевой и лазерной обработки от системы ЧПУ // Автоматизация в промышленности, 2015. №5. - с. 42-46.

[9] Коваленко А.В. Автоматизация управления параметрами электронного луча (на примере триодной прямонакальной электронно-лучевой пушки) // Автоматизация в промышленности, 2012. №5. - с. 34-35.

[10] Martinov G., Kozak N., Nezhmetdinov R., Grigoriev A., Obukhov A., Martinova L. (2017). Method of decomposition and synthesis of the custom CNC systems. Automation and Remote Control, 78(3), pp.525-536. (https://doi.org/10.1134/S0005117917030122).

[11] Martinov G., Obuhov A., Martinova L.? Grigoriev A. (2014). An Approach to Building Specialized CNC Systems for Non-traditional Processes. Procedia CIRP, 14, pp.511-516. (https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.049).

[12] Martinova L., Fokin N. (2018). An approach to creation of a unified system of programming CNC machines in the dialog mode. In: MATEC Web Conf. Volume 224, 2018. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). Sevastopol, Russia, September 10-14, 2018. pp.1-5. (https://doi.org/10.1051/matecconf/201822401101).

[13] Pushkov R., Salamatin E., Evstafieva S. (2018). Method of developing parametric machine cycles for modern CNC systems using high-level language. In: MATEC Web Conf. Volume 224, 2018. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). Sevastopol, Russia, September 10-14, 2018. pp.1-7. (https://doi.org/10.1051/matecconf/201822401116).

[14] Kovalev I., Nikishechkin P., Grigoriev A. (2017) Approach to Programmable Controller Building by its Main Modules Synthesizing Based on Requirements Specification for Industrial Automation. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), pp.1-4. (https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076121).

[15] Elmar W., Marcel M., Marc R. (2015) Integration of real-time Ethernet in Linux CNC. Int J Adv Manuf Technol 78:1837–1846. (https://doi.org/10.1007/s00170-015-6786-y).

[16] Hauser C, Childs THC, Dalgarno KW, Eane RB. Atmospheric control during direct selective laser sintering of stainless steel 314S powder. SOLID FREEFORM FABRICATION PROCEEDINGS 1999;8:265-272.

[17] Yingxue Y., Miao L., Jianjun D., Liang Z. Design of a machine tool control system for function reconfiguration and reuse in network environment, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2019;56:117-126. (https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.09.005).

[18] Martinova L., Kozak N., Nezhmetdinov R., Pushkov R., Obukhov A. (2015). The Russian multi-functional CNC system AxiOMA control: Practical aspects of application. Automation and Remote Control, 76(1), pp.179-186. (https://doi.org/10.1134/S000511791501018X).

Организация мониторинга технологического оборудования

Мартинова Л.И.
Кафедра компьютерныхсистем управления
ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН"
г. Москва, РФ
lili@ncsystems.ru

Соколов С.В.
Кафедра компьютерных систем управления
ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН"
г. Москва, РФ
sokolov@ncsystems.ru

Бабин М.С.
Кафедра компьютерных систем управления
ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН"
г. Москва, РФ
binafon88@yandex.ru

***Abstract* — The article describes an approach to the practical implementation of a combined system of monitoring of the state of the technological equipment for the collection, visualization, storage and subsequent analysis of information. The system collects information from both systems of control of technological equipment and external (additional) sensors attached to process units. The article presents the example of obtaining information from the motion controller by ORS UA, from the CNC system by using a specific set of API-functions and receiving information from an external temperature sensor. It is demonstrated that the solution permits to collect a large array of various data on the operation of the equipment.**

Ключевые слова — Индустрия 4.0, MDC, цифровое производство, сбор данных, ЧПУ, ПЛК

I. Введение

При организации цифрового производства успех работы всей производственной структуры базируется на достоверных оперативных данных о состоянии и режиме работы технологического оборудования и состоянии технологических процессов. По-прежнему «узким местом» остается подключение к единой информационной среде исполнительных механизмов технологического оборудования [1, 2]. Системы мониторинга производства (Machine Data Collection) призваны быть связующим звеном между технологическим оборудованием и системами управления производством (MES), собирать и передавать объективную информацию о функционировании производства и его составляющих [3].

Источниками такой информации являются встраиваемые в технологические комплексы специальные программные и аппаратные средства, номенклатура которых весьма широка, и они очень разнородны [4], часто бывают несовместимы, что становятся большим препятствием при создании систем автоматического мониторинга технологических комплексов [5-7].

II. Проблемы совместимости

Производители систем управления создают программный инструментарий для диагностики и настройки следящих приводов и удаленных модулей ввода/вывода электроавтоматики (цифровые осциллографы, логические анализаторы и др.) [8-10]. Они позволяют напрямую читать память УЧПУ, получать сведения о состоянии станка, о текущем состоянии системы ЧПУ и технологических параметрах: режимы резания, текущий кадр, G- и M-векторы, нагрузка на приводах, код ошибки и др. [11].

Из-за разнообразия станков и разнородности систем управления большим препятствием при создании систем автоматического мониторинга технологического оборудования становится такие факторы, как: разные протоколы передачи данных и несовместимость между ними, разные способы доступа к данным, предоставляемым системами управления и пр., что в итоге усложняет задачу автоматического сбора, обработки и передачи информации на более высокие уровни производства для оперативного принятия решений [12, 13].

Требуются новые модели и инструментальные средства оперативного сбора и обработки информации с подконтрольных объектов промышленных предприятий, каковыми являются станки, автоматизированные линии, роботы и другие автоматизированные средства технологического оснащения оборудования, а также возможности ее агрегирования и передачи на более высокие уровни управления предприятием [14, 15]. Предлагаемое решение состоит в построении единой мультипротокольной коммуникационной среды на базе интеллектуального концентратора.

III. Концепция интеллектуального концентратора для систем промышленной автоматизации

Интеллектуальный концентратор представляет собой многофункциональное устройство с функциями коммутатора и управления, располагающее набором разного типа портов для агрегации данных с систем ЧПУ и контроллеров автоматизации, «классических» дискретных и интеллектуальных датчиков, и исполнительных устройств, а также приборов учета и контроля [16]. На рис. 1 представлена архитектурная модель интеллектуального концентратора в структуре системы промышленной автоматизации и управления производственным процессом.

Интеллектуальный концентратор выполнен в виде отдельного вычислительного устройства, выполняющего роль шлюза между коммуникационной средой и полевыми шинами цехового уровня и общей информационной средой предприятия. В зависимости от количества подключаемых устройств аппаратная реализация возможна как на базе одноплатных компьютеров с процессорами ARM, так и на базе более производительных промышленных ПК с архитектурой x86/64. Использование кроссплатформенных инструментов разработки и операционной системы Linux позволяет легко адаптировать программную часть интеллектуального концентратора под различные аппаратные платформы [17].

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

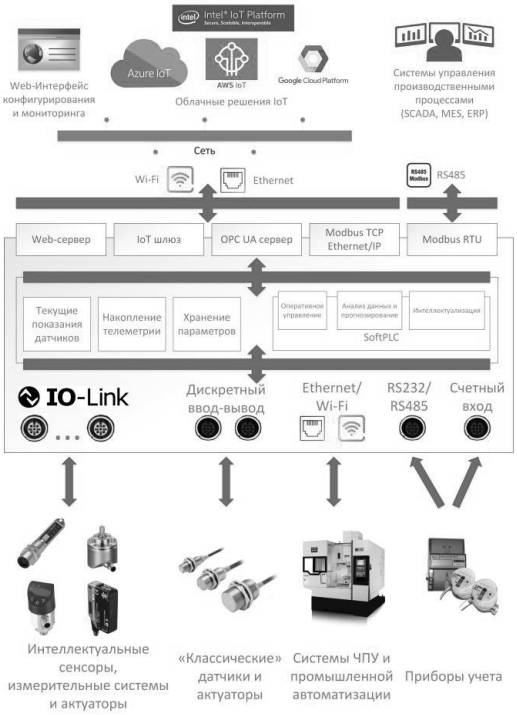


Рис. 1. Архитектурная модель интеллектуального концентратора

Программная архитектура интеллектуального концентратора имеет 3 гибко конфигурируемых уровня: уровень коммуникации с технологическими устройствами, уровень обработки и хранения данных и уровень взаимодействия с системами управления производственными процессами. Взаимодействие между программными компонентами разных уровней реализовано на основе обобщенных интерфейсов, позволяющих варьировать набор подключаемого оборудования в зависимости от решаемых задач [18].

A. Коммуникация на уровне технологического комплекса

Для автоматизации и управления производственным процессом на уровне технологического комплекса интеллектуальный концентратор может иметь 4-8 портов ввода-вывода по интерфейсу IO-Link для коммуникации с интеллектуальными датчиками и актуаторами, порты дискретного ввода-вывода 24В для подключения «классических» датчиков и исполнительных устройств, порты RS232/RS485 и счетные входы для подключения приборов учета и контроля. Данный набор интерфейсов позволяет производить мониторинг и оперативное управление общими вспомогательными системами цехового уровня, такими как:

- контроль состояния пневматической магистрали и управление пневмокомпрессором,
- сбор данных о состоянии микроклимата в производственном помещении (температура, влажность, освещенность, содержание газов) и управление системой вентиляции и кондиционирования,
- мониторинг системы водо- и энергоснабжения и потребления тепловых ресурсов в цеху,
- регистрация событий открытия/закрытия цеховых ворот и данных от системы контроля и управления доступом (СКУД).

Промышленный коммуникационный интерфейс IO-Link позволяет не только передавать информацию от датчиков к системам управления, но и настраивать современные интеллектуальные датчики, осуществлять удаленную параметризацию и диагностику устройств нижнего уровня автоматизации, вести мониторинг состояния различных узлов [19].

Для коммуникации с системами управления станками и системами промышленной автоматизации используются протоколы на базе Ethernet. Расширяемый набор программных модулей обмена данными позволяет осуществлять взаимодействие на базе различных протоколов коммуникации: OPC UA или собственного API интерфейса системы управления. Предусмотрен HTTP-сервер для приема данных с автономных датчиков, отвечающих требованиям IIoT.

B. Уровень обработки данных и накопления телеметрии

На уровне программной части интеллектуальный концентратор реализует такие возможности, как:

- считывание текущих показаний с подключенных датчиков и передача их системам автоматизации верхнего уровня;
- накопление телеметрических данных с сохранением истории изменения показаний датчиков, в том числе в режиме offline;
- сохранение параметров настройки интеллектуальных датчиков IO-Link для их быстрой замены, в случае необходимости, без повторного конфигурирования.

Программно-реализованный контроллер электроавтоматики (SoftPLC) в составе интеллектуального концентратора выполняет функции оперативного управления технологическим комплексом без участия систем автоматизации верхнего уровня [20]. Помимо этого, на него возлагаются и ряд других функций, таких как:

- анализ данных с датчиков и телеметрии и измерительных приборов, прогнозирование нештатных ситуаций и возможного выхода параметров за пределы рабочего диапазона, сигнализация о событиях,
- интеллектуализация «классических» датчиков: пересчет «сырых» показаний датчика (напряжение, ток) в непосредственное значение измеряемого параметра в общепринятых единицах измерения (температура, расход л/мин и т.д.),
- интеллектуализация периферийных устройств технологического оборудования (гидростанции,

системы охлаждения, климатические установки, механизмы смены инструмента).

Часть задач со штатного контроллера электроавтоматики станка могут быть перераспределены на интеллектуальный концентратор. Тогда, например, механизм смены инструмента будет представлять собой законченное интеллектуальное устройство с цифровым интерфейсом управления (например, Ethernet/IP), которому штатный ПЛК просто передает номер вызываемого инструмента, а последовательность действий по смене инструмента (вращение барабана, повороты манипулятора) имплементируется внутри интеллектуального концентратора. Схема подключения значительно упрощается, поскольку отпадает необходимость использования большого количества проводов дискретного ввода-вывода.

C. Коммуникация с системами верхнего уровня

Для связи с системами промышленной автоматизации верхнего уровня предусмотрены интерфейсы Ethernet/WiFi и Modbus RTU/RS485.

Ethernet/WiFi осуществляет связь по протоколу TCP/IP систем верхнего уровня с:

- встроенным Web-сервером для конфигурирования устройства и построения веб-ориентированных пользовательских интерфейсов мониторинга,
- IoT шлюзом для подключения устройства к облачным решениям интернета вещей, таким как Microsoft Azure IoT, Amazon AWS IoT, Google Cloud Platform и т.д.,
- OPC UA сервером для интеграции с системами управления производственными процессами SCADA, MES, ERP и системами Индустрии 4.0,
- SCADA-системами через Modbus TCP и Ethernet/IP протоколы для коммуникации с контроллерами электроавтоматики.

Modbus RTU/RS485 обеспечивает совместимость систем управления верхнего уровня со SCADA системами предыдущего поколения.

Таким образом, многофункциональный интеллектуальный концентратор представляет собой киберфизическую систему, соответствующую концепции интернета вещей и Индустрии 4.0. Его функционирование возможно в таких режимах, как:

- автономный контроллер автоматизации для несложных задач с возможностями конфигурирования и мониторинга через Интернет;
- концентратор для подключения групп датчиков с целью сбора с них и накопления телеметрических данных под управлением SCADA-системы, в том числе, в составе облачного IoT решения. Часть алгоритмов управления подключенными устройствами может реализовываться встроенным SoftPLC и функционировать независимо от подключения к системе верхнего уровня;
- интеллектуальный модуль удаленного ввода-вывода в составе системы электроавтоматики, решающий задачу интеллектуализации «классических» датчиков и даже целых узлов в составе станка, таких как гидро- и пневмостации, механизмы смены инструмента.

При исполнении интеллектуального концентратора в корпусе с классом защиты IP65/67 возможна его установка вне электрошкафа в непосредственной близости от управляемого оборудования.

IV. Экспериментальные исследования

A. Сбор данных с системы ЧПУ и MotionControl

Большинство современных систем промышленной автоматизации предоставляют возможности для мониторинга и управления по протоколу OPC UA. В случае отсутствия данной функциональности интеллектуальный концентратор может быть расширен программным модулем коммуникации, реализующим взаимодействие через собственный API системы управления. В следующем примере будет проиллюстрирован одновременный сбор данных с системы логического управления IndraControl XM22 компании Bosch Rexroth по протоколу OPC UA и системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» по протоколу коммуникации на базе Ethernet (рис. 2).

Рис. 2. Структура тестового стенда сбора данных

Конфигурирование подключенных устройств к интеллектуальному концентратору производится через Web-интерфейс управления, после чего концентратор запускает необходимые модули коммуникации и начинает выполнять накопление данных. Web-интерфейс также предоставляет удобные страницы сводной статистики и статуса работы подключенных устройств, позволяющий производить оперативный мониторинг состояния технологического оборудования цеха (рис. 3). Отдельные специализированные экраны позволяют просматривать дополнительную информацию

о версии программного обеспечения, времени работы оборудования и т.д. Например, страница времени работы ядра ЧПУ (рис. 4) отображает значения счетчиков использования различных компонентов системы управления: суммарное и текущее время работы системы ЧПУ, время первого и последнего включения, а также суммарное количество запусков. Аналогичная информация доступна отдельно для каждого канала управления и каждого привода осей.

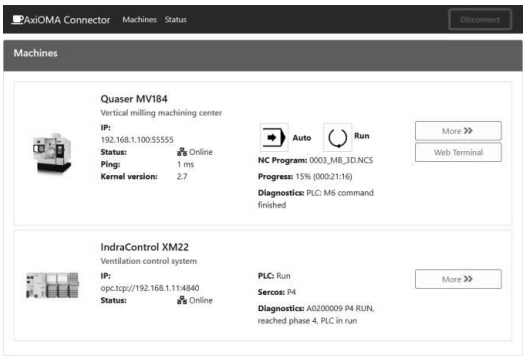


Рис. 3. Сводная статусная страница Web-интерфейса интеллектуального концентратора

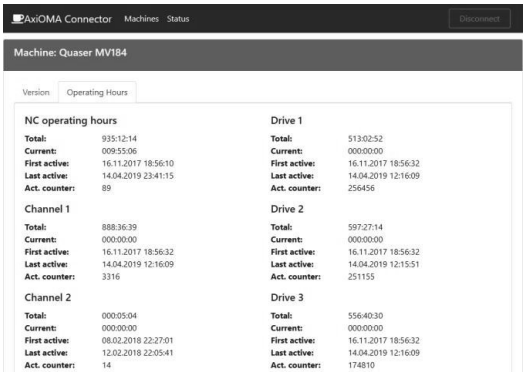


Рис. 4. Страница времени работы ядра системы ЧПУ

Значения всех отслеживаемых параметров сохраняются в базе данных локального хранилища телеметрии интеллектуального концентратора. В любой момент времени сохраненная история за заданный интервал может быть по запросу передана в систему управления производством верхнего уровня или отображена в Web-интерфейсе. На рис. 5 показан сводный график телеметрии нескольких параметров (загрузка процессора, температура и положение одной из осей), полученной из контроллера движения IndraControl XM22 по интерфейсу OPC UA. Регистрация параметров производилась с интервалом 100 мс.

Получение данных из системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» с использованием программного интерфейса API системы числового программного управления проиллюстрировано на рис 6. Несмотря на необходимость реализации для данного случая отдельного модуля коммуникации по нестандартному протоколу, данный подход дает преимущества по сравнению с мониторингом через OPC UA. Например, возможность запускать по заранее заданному условию специфические функции в системе ЧПУ для получения более подробных диагностических данных.

Рис. 5. Просмотр накопленной телеметрии IndraControl XM22

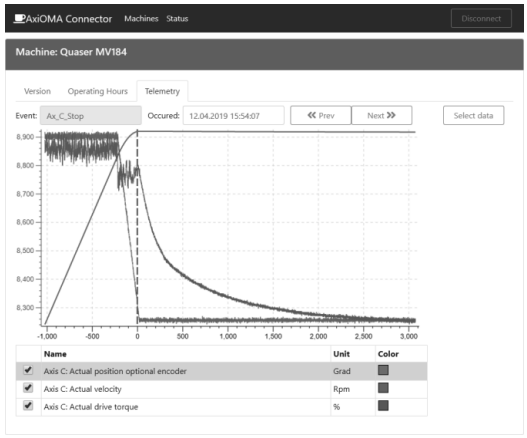


Рис. 6. Отображение измерения движения оси Z системы ЧПУ «АксиОМА Контрол»

В приведенном примере по событию остановки оси Z станка запускается внутренняя система измерений (в системы ЧПУ), позволяющая сохранить подробную информацию о небольшом временном интервале работы системы с высокой частотой дискретизации. На графике представлены результаты измерения позиции, скорости и крутящего момента вокруг оси Z с интервалом 0.5 мс.

B. Сбор данных с автономного датчика температуры

При сборе диагностической информации и мониторинге станочного оборудования немаловажной является аппаратная часть, позволяющая отслеживать показания таких параметров, как температура различных узлов, силы резания и других показателей, а также осуществлять телеметрию. Для этого можно использовать модули, позволяющие получать

информацию с внешних датчиков не только по полевым шинам, но и посредством беспроводных протоколов передачи данных, представленных в таблице 1.

ТАБЛИЦА I. СРАВНЕНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ ПРОТОКОЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Технология	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee	Thread
Скорость передачи данных(Мбит/с)	300	3	0,25	0,25
Энергопотребление	высокое	низкое	низкое	низкое
Частотный диапазон	2,4ГГц			
Поддержка IP технологии	да	нет	нет	да

Для построения решения, позволяющего осуществлять сбор данных с температурного датчика, была использована отладочная плата Omega2 с установленным OS Linux, LEDE (Linux Embedded Development Environment), базирующаяся на OpenWRT, а также встроенный WIFI. Использовались датчики ds18b20 с однопроводным интерфейсом 1-wire, который позволяет объединять все датчики в единую сеть, тем самым сокращая количество используемых входов-выходов. Данные датчики не требуют калибровк, поскольку они уже откалиброваны на определенный диапазон температур. Использвание выбранных микросхем допускается и в агрессивных условиях, поскольку они исполнены в защитном герметичном металлическом корпусе. Показания температуры с датчиков, собранные на Omega2, сохраняются в виде таблиц, могут быть переданы через WiFi в интеллектуальный концентратор, где осуществляется их обработка в целях оценки состояния технологического процесса.

Представленная на рис. 7 схема отображает непосредственное подключение датчиков и дальнейшее подключение модуля к компьютеру для обновления программного обеспечения через UART, также имеющийся веб интерфейс позволяет удаленно, подключаясь к модулю обновлять прошивку.

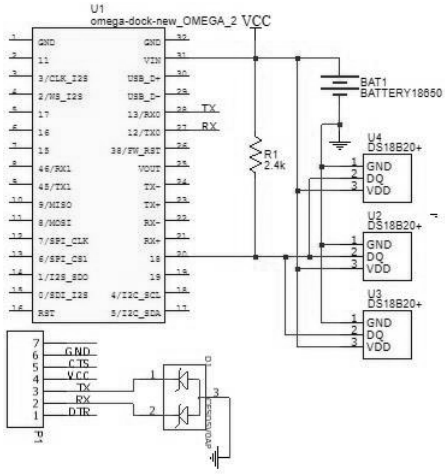


Рис. 7. Принципиальная схема взаимодействия беспроводного модуля с цифровыми датчиками температуры

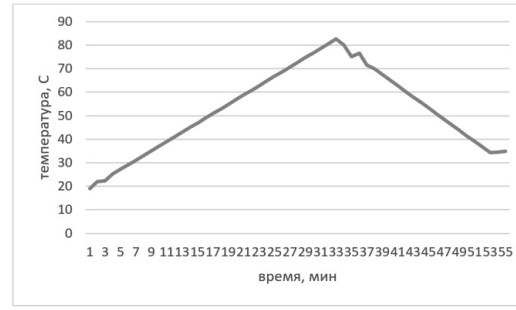


Рис. 8. График показаний температуры станочного шпинделя при максимальных нагрузках

При проведении испытаний данное устройство было помещено на корпус шпинделя, что позволило оценить степень его нагрева за длительное время, как видно по оси ординат отражена температура, а по оси абсцисс можно проследить за какое время он достиг максимальной температуры (рис. 8).

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено решение по организации мониторинга технологического оборудования на базе многофункционального интеллектуального концентратора, который имеет три гибко конфигурируемых уровня: уровень коммуникации с технологическими устройствами, уровень обработки и хранения данных и уровень взаимодействия с системами управления производственными процессами. Взаимодействие между программными компонентами разных уровней осуществляется с использованием обобщенных интерфейсов, которые позволяют в соответствии с поставленными задачами варьировать набор подключаемого оборудования. Система мониторинга осуществляет сбор информации как с систем управления технологическим оборудованием, так и с внешних (дополнительных) датчиков, прикреплённых к технологическим узлам. Отслеживаемые параметры сохраняются в базе данных локального хранилища интеллектуального концентратора, и в любой момент сохраненная история может быть по запросу передана в систему управления производством верхнего уровня или отображена в Web-интерфейсе пользователя. Многофункциональный интеллектуальный концентратор представляет собой киберфизическую систему, соответствующую концепции интернета вещей и Индустрии 4.0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Martinova L., Martinov G. Automation of Machine-Building Production According to Industry 4.0. 3-rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications. - Vladivostok, 2018. P.1 - 4. https://doi.org/10.1109/RPC.2018.8482165

[2] Martinova L., Sokolov S., Nikishechkin P. Tools for Monitoring and Parameter Visualization in Computer Control Systems of Industrial Robots // Advances in Swarm and Computational Intelligence: 6th International Conference, ICSI 2015 held in conjunction with the Second BRICS Congress, CCI, 2015, Proceedings, Part II,. P. 200-207. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20472-7_22

[3] Petr Nikishechkin, Nadezhda Chervonnova, Anatoly Nikich Approach to the construction of specialized portable terminals for

monitoring and controlling technological equipment. In: MATEC Web Conf. Volume 224, 2018. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). Sevastopol, Russia, September 10-14, 2018. P.1-9. https://doi.org/10.1051/matecconf/201822401089

[4] Martinov G., Kozak N., Nezhmetdinov R., Grigoriev A., Obukhov A. and Martinova, L. Method of decomposition and synthesis of the custom CNC systems. Automation and Remote Control, 78(3), 2017. P.525-536. https://doi.org/10.1134/S0005117917030122

[5] Martinov G., Sokolov S., Martinova L., Grigoryev A., Nikishechkin P. Approach to the Diagnosis and Configuration of Servo Drives in Heterogeneous Machine Control Systems. In: 8th International Conference, ICSI. Fukuoka, Japan, 2017. P. 586-594. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61833-3_62

[6] Martinova L., Grigoryev A., Sokolov S. Diagnostics and forecasting of cutting tool wear at CNC machines. Automation and Remote Control, 73(4), 2012. P.742-749. https://doi.org/10.1134/S0005117912040133

[7] Martinov G., Grigor'ev A. Diagnostics of cutting tools and prediction of their life in numerically controlled systems. Russian Engineering Research, 33(7), 2013. P.433-437. https://doi.org/10.3103/S1068798X13070137

[8] Martinov G., Lyubimov A., Bondarenko A., Sorokoumov A., Kovalev I. An approach to building a multiprotocol CNC system. Automation and Remote Control, 76(1), 2015. P.172-178. https://doi.org/10.1134/S0005117915010178

[9] Martinova, L., Kozak, N., Nezhmetdinov, R., Pushkov, R. and Obukhov, A. The Russian multi-functional CNC system AxiOMA control: Practical aspects of application. Automation and Remote Control, 76(1), 2015. P.179-186. https://doi.org/10.1134/S000511791501018X

[10] Martinova L., Pushkov R., Kozak N., Trofimov E. Solution to the problems of axle synchronization and exact positioning in a numerical control system. Automation and Remote Control, 75(1), 2014. P.129-138. https://doi.org/10.1134/S000511791401010X

[11] Grigoriev S., Martinov G. An Approach to Creation of Terminal Clients in CNC System. In: 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications. Vladivostok, 2018. P.1 - 4. https://doi.org/10.1109/RPC.2018.8482165

[12] Martinov G., Kozak, N., Nezhmetdinov R. Implementation of Control for Peripheral Machine Equipment Based on the External Soft PLC Integrated with CNC. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017. P.1-4. https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076119

[13] Martinov G., Grigoryev A., Nikishechkin P. Real-Time Diagnosis and Forecasting Algorithms of the Tool Wear in the CNC Systems. Advances in Swarm and Computational Intelligence, 2015. P. 115-126. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20469-7_14

[14] Martinov G., Obukhov A., Kozak N. The Usage of Error Compensation Tools of CNC for Vertical Milling Machines. Russian Engineering Research, №38(2), 2018. P. 119-122. https://doi.org/10.3103/S1068798X18020120

[15] Grigoriev, S. and Martinov, G. An ARM-based Multi-channel CNC Solution for Multi-tasking Turning and Milling Machines. Procedia CIRP, №46, 2016. P.525-528. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.036

[16] Grigoriev S., Martinov G. The Control Platform for Decomposition and Synthesis of Specialized CNC Systems. Procedia CIRP, №41, 2016. P. 858-863. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.031

[17] Martinov, G. and Kozak, N. Numerical control of large precision machining centers by the AxiOMA contol system. Russian Engineering Research, №35(7), 2015. P. 534-538. https://doi.org/10.3103/S1068798X15070114

[18] Martinov G., Nezhmetdinov R. Modular design of specialized numerical control systems for inclined machining centers. Russian Engineering Research, №35(5), 2015. P. 389-393. https://doi.org/10.3103/S1068798X15050160

[19] Grigoriev S., Martinov G. Scalable Open Cross-Platform Kernel of PCNC System for Multi-Axis Machine Tool. Procedia CIRP, №1, 2012. P. 238-243. https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.043.

[20] Martinov G., Kovalev I., Al Khoury A. Construction of a Specialized CNC System for Thread Grinding Machines. In: 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi: 2018. IEEE. https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501675

Численное моделирование рабочего процесса осевой турбины с целью повышения эффективности её работы

Марчуков Е.Ю.
Кафедра технологии производства двигателей летательных аппаратов МАИ
Москва, Россия
okb.umpo@mail.ru

Егоров И.Н.
Кафедра технологии производства двигателей летательных аппаратов МАИ
Москва, Россия
egorov300657@yandex.ru

Горячкин Е.С.
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов Самарский университет
Самара, Россия
evgeni0063@yandex.ru

ЗубановВ.М.
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов Самарский университет
Самара, Россия
waskes91@gmail.com

Волков А.А.
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов Самарский университет
Самара, Россия
a44rey@gmail.com

***Abstract*—The results of multicriteria optimization of three-stage low-pressure turbine are described in the paper. The aim of the optimization is to improve turbine operation process by three criteria: turbine outlet flow angle, value of residual swirl at the turbine outlet, and turbine efficiency. Full reprofiling of all blade rows is carried out while solving optimization problem. Reprofiling includes a change in both shape of flat blade sections (profiles) and threedimensional shape of the blades. Five numerical models of LPT with different density of computational mesh were created. All these models allow predicting the trend of the LPT characteristics, but they give a quantitative difference in the calculated parameters. The model with the fewest elements with turbulence model Spalart-Allmaras provides the shortest calculation time of one point of LPT characteristics. At the same time, it allows predicting the LPT characteristics and can be used for optimization studies. The model with the most elements was used for the final check of the obtained results as the most accurate mesh. During the optimization, new LPT variants were found. They provide a decrease in the average value of the outlet angle by 12.9 degrees, as well as a decrease in the residual flow swirl at the turbine outlet by 9.8 degrees. These changes are possible due to some drop of efficiency (0.12%).**

Ключевые слова —испытания ГТД, турбина низкого давления, рабочий процесс, эффективность, параметризация, оптимизация, остаточная закрутка, фронт Парето

I. Введение

Турбина низкого давления (ТНД) оказывает значительный эффект на характеристики двигателя. Вклад ТНД может доходить до 20 – 30% от величины массы двигателя и до 15 – 20% от стоимости двигателя. Влияние на удельный расход топлива также довольно значительно. Коэффициент влияния КПД ТНД на общий КПД двигателя составляет 1:0,7 для турбовентиляторных двигателей и до 1:1 для турбовальных двигателей [1].

Как модуль двигателя, ТНД должна, во-первых, обеспечивать заданные параметры работы: максимально возможное значение КПД, заданный расход рабочего тела, требуемую мощность и т. д. Во-вторых, параметры рабочего процесса ТНД должны соответствовать параметрам всего двигателя и параметрам его других компонентов. В частности, это означает, что улучшение параметров ТНД не должно приводить к ухудшению параметров, например, выходного устройства и, следовательно, всего двигателя из-за высокого остаточного вихря потока на выходе ТНД. Также, турбина должна иметь возможность изготовления с минимальными затратами и иметь наименьшую стоимость.

Цель представленного исследования – провести многокритериальную оптимизацию трехступенчатой ТНД (рис.1) турбовального двигателя.

Рис. 1. Исследуемая трёхступенчатая ТНД

II. Алгоритм многокритериальной оптимизации ТНД

Алгоритм нелинейной оптимизации на основе самоорганизации (IOSO) [2] использовался для решения задачи оптимизации.

Технология IOSO основана на методике построения поверхности отклика. На каждой итерации IOSO строит-

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

ся поверхность отклика целевой функции в пределах текущей области поиска. За этим шагом следует вызов математической модели системы для расчёта параметров точки кандидата (точки, в которой алгоритм полагает наличие экстремума), полученной в результате построения поверхности отклика. Во время работы IOSO информация о поведении системы сохраняется для точек в окрестности экстремума, так что модель поверхности отклика становится более точной для области поиска. Каждая итерация IOSO состоит из следующих шагов:

- изменение плана эксперимента;
- адаптивная корректировка текущей области поиска;
- выбор типа функции (глобальный или локальный диапазон) для модели поверхности отклика;
- корректировка модели поверхности отклика;
- изменение параметров и структуры алгоритмов оптимизации;
- при необходимости - выбор новых перспективных точек в зоне поиска.

Алгоритм многодисциплинарной оптимизации ТНД показан на рис. 2.

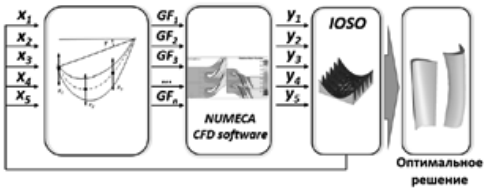


Рис. 2. Алгоритм решения многокритериальной задачи оптимизации ТНД

На каждом шаге оптимизации оптимизатор IOSO создает план эксперимента и генерирует вектор переменных параметров x_1, x_2, x_3, …, x_n. Он представляет собой набор переменных, которые описывают геометрию лопатки турбины в параметрической форме. Вектор переменных передается в блок перепрофилирования лопаток. В этом блоке специализированная программа выполняют создание геометрических моделей лопаток ТНД на основе вектора переменных параметров и сохраняют их в виде файлов геометрии лопаток (GF_i) в формате *.geomturbo, который подходит для импорта геометрии лопаток в программный комплекс численного моделирования NumecaFineTurbo [3]. Используемые параметрические модели лопаток и метод перепрофилирования описаны ниже.

На следующем этапе в блоке расчета газодинамических параметров выполняется построение вычислительной сетки в программном комплексе NumecaAutoGrid 5 с использованием файлов с геометрией перепрофилированных лопаток ТНД GF_1, GF_2 ... GF_n (рис. 2). Затем осуществляется создание вычислительной модели рабочего процесса турбины в программном комплексе NumecaFineTurbo, и выполняется расчёт параметров работы ТНД. Обработка результатов расчета выполняется в программеNumecaCFView. В результате создается несколько выходных файлов, содержащих параметры работы ТНД (вектор ограничений и критериев оптимизации). Эти параметры передаются оптимизатору IOSO. Далее вектор выходных параметров (критерии и ограничения оптимизации) y_1, y_2 ... y_n, сформированный по результатам работы блоков газодинамического анализа, передается оптимизатору IOSO. Там выполняется анализ полученных данных. Затем генерируется новый вектор переменных,и цикл (итерация) оптимизации повторяется.

III. Метод параметризации и перепрофилирования лопаток

Для параметрического описания геометрии сечений лопаток использовался следующий метод. В каждом сечении лопаток статора и ротора строилась средняя линия, которая аппроксимировалась сплайном, проходящим через 4 точки (центр входной кромки, центр выходной кромки и две промежуточные точки). 2D-перепрофилирование сечений лопаток выполняется путем изменения угла установки $\Delta\gamma$ и ординат Δy_1 и Δy_2 двух средних точек средней линии (рис. 3). Стоит отметить, что для уменьшения числа переменных изменение значений угла наклона $\Delta\gamma$ и ординат точек средней линии Δy_1 и Δy_2 выполняется только в трех секциях: втулочном, среднем и периферийном. Значения этих параметров для других сечений (промежуточных) рассчитывались в соответствии с квадратичным законом их изменения по высоте проточной части на основе их значений в трех обозначенных сечениях. Пример 2D-перепрофилирования профиля лопатки ТНД показан на рис.4.

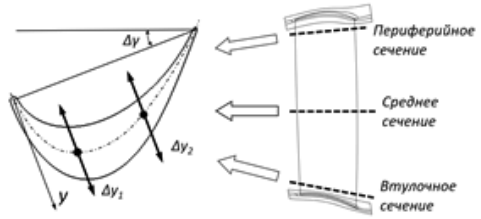


Рис. 3. Схема 2D перепрофилирования лопаток

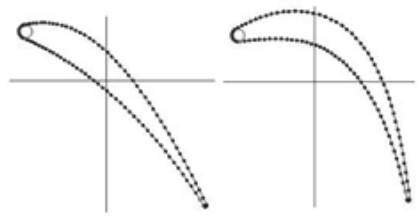


Рис. 4. Пример перепрофилирования сечений лопатки ТНД

Для 3D параметризации лопаток использовался метод, позволяющий менять такие параметры, как хорда лопатки, толщина профиля, сдвиг сечений в осевом и окружном направлениях. Закон изменения этих параметров вдоль радиального направления описывался сплайном из квадратичных кривых Безье. Количество контрольных точек сплайна могло изменяться от 3 (для лопаток соплового аппарата) до 5 (для лопаток ротора)

(рис. 5). Пространственное перепрофилирование лопаток, а также изменение хорд и толщины профилей, осуществляется путем изменения положения контрольных точек сплайна.

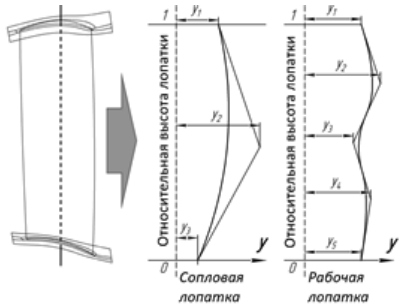


Рис. 5. Схема параметризации пространственной увязки сечений друг относительно друга

IV. Выбор параметров численной модели ТНД

Для численных моделей, используемых при оптимизации, накладываются два противоречивых требования: точность расчёта параметров работы ТНД, а также требуемое время вычисления и требуемые вычислительные ресурсы. При многокритериальной оптимизации ТНД по описанной выше методике, время одной итерации оптимизации и требуемые вычислительные ресурсы определяются блоком расчета газодинамических параметров, а именно, скоростью расчёта газодинамических параметров работы ТНД.

На базе исходной геометрии турбины была создана численная модель оптимизируемой турбины. Конечно-объемная (КО) сеть создана в программе NUMECA AutoGrid 5 с помощью блочно-упорядоченной сети (рис.6).

Рис. 6. Сетка конечных элементов расчетной модели исследуемой ТНД

В качестве граничных условий на входе в турбину были заданы осредненные значения полного давления p^*, полной температуры T^*, входного угла потока α и турбулентной вязкости в соответствующем сечении проточной части газотурбинного двигателя (ГТД). На выходе из турбины задавалось статическое давление на втулочном радиусе. Давление на остальных радиусах рассчитывалось программой автоматически, согласно уравнению радиального равновесия. Величина статического давления на выходе из турбины назначалась в соответствии с требуемой степенью расширения.

Для передачи данных между областями сопловых аппаратов (СА) и рабочих колес (РК) применялся встроенный в программный комплекс интерфейс *FullNonMatchingMixingPlane.*

Для исследуемой турбины не имеется данных экспериментальных исследований. По этой причине для доказательства адекватности результатов, полученных с помощью CFD-моделирования выполнено исследование сеточной независимости. Для этого созданы четыре КО модели исследуемой турбины с различным количеством элементов по высоте части и по ширине межлопаточного канала. Количество элементов в созданных моделях турбины приведено в табл. I.

ТАБЛИЦА I. Параметры созданных численных моделей ТНД

Обозначение	**Количество элементов в одном слое сети**	**Количество слоев сети по высоте проточной части**	**Суммарное количество элементов в сети**
Сеть1	13359	49	3 633 669
Сеть2	23810	57	8 143 337
Сеть3	27797	73	12 175 084
Сеть4	37716	85	19 235 173

Размер первого элемента всех созданных сетях был подобран таким образом, чтобы обеспечить значение безразмерного параметра y+ = 1.

Характеристики ТНД, рассчитанные с использованием созданных сетей показаны на рис. 7. Характеристики ТНД, рассчитанные с использованием различных моделей турбулентности с использованием модели Сеть3, показаны на рис. 8.

Из анализа рис. 7 следует, что расчетные значения КПД и расхода рабочего тела с изменением количества элементов в сетке лопаток с 6417 до 33969 незначительно меняются (изменение эффективности составляет не более 0,5% (макс.), расхода рабочего тела не более 0,25 кг/с (менее 1% от массового расхода через ТНД). При этом количество элементов в вычислительной сети турбины увеличивается примерно в 5 раз с 3,6 до 19,2 миллиона элементов, что приводит к существенному увеличению требуемого времени вычисления и затрат вычислительных ресурсов. Качественно при изменении количества элементов в сети расчетные характеристики смещаются равномерно, т. е. их тренд качественно не меняется.

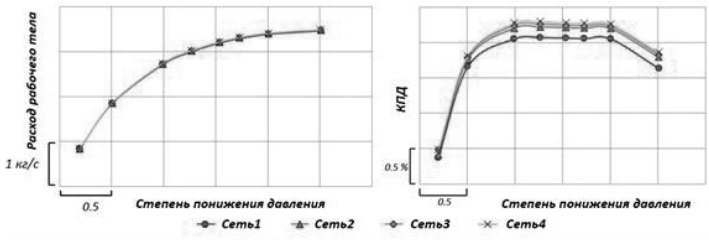


Рис. 7. Сравнение характеристик ТНД, рассчитанных с использованием сетей конечных элементов с различной густотой

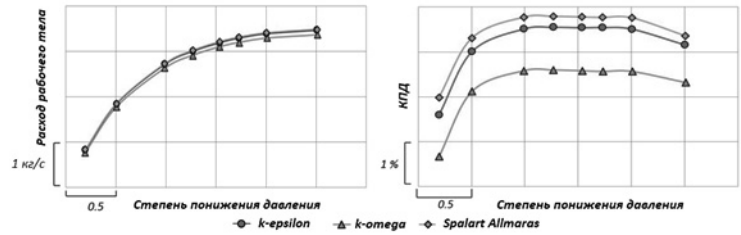


Рис. 8. Сравнение характеристик ТНД, рассчитанных с использованием различных моделей турбулентности

Учитывая тот факт, что численная модель для исследования оптимизации должна позволять рассчитывать тенденции изменения характеристик турбины и иметь минимальное время вычисления, было решено в первую очередь, провести оптимизацию с использованием модели Сеть1 (3 633 669 элементов), а для проверки результатов оптимизации использовать модель Сеть3 (12 175 084 элементов), при применении которой достигается сеточная независимость (увеличение количества элементов в сетке, большее, чем в Сеть3, не приводит к существенным различиям в значении расчетных параметров турбины).

V. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

Базовый вариант исследуемой трехступенчатой ТНД имеет высокую эффективность, но в то же время имеет ряд недостатков.

Во-первых, конструкция ТНД не содержит выходного спрямляющего аппарата, что обуславливает значение интегрального угла выхода потока из турбины 22,7° (от оси двигателя). На выходе из турбины имеется остаточная закрутка потока, которая характеризуется параметром $\Delta\alpha_{out}$ – разницей между максимальным и минимальным значением абсолютного угла выхода потока из турбины в радиальном направлении (рис. 9). Значение параметра остаточной закрутки для базового варианта ТНД 12,8°. Такая остаточная закрутка на выходе из турбины приводит к росту потерь в выходном устройстве, что ведёт к уменьшению общего КПД двигателя. По этой причине в результате решения задачи оптимизациитребовалось сократить интегральный угол выхода потока из турбины до 15°, а также уменьшить параметр остаточно закрутки до 10° (рис. 9).

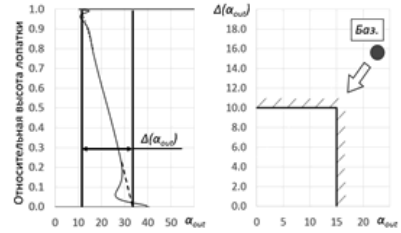


Рис. 9. Остаточная закрутка потока на выходе из ТНД

VI. ОПТИМИЗАЦИЯ

На первом этапе выполнялось решение задачи газодинамической оптимизации ТНД. Решение задачи газодинамической оптимизации ТНД выполнялось по алгоритму, показанному на рис. 2.

Как было отмечено выше, газодинамическая задача оптимизации решалась в трёхкритериальной постановке с ограничениями.

Критериями оптимизации являлись:

- КПД ТНД;

- Значение интегрального угла выхода потока из турбины α_{out}(должно было быть не более 15°);

- Значение параметра остаточной закрутки на выходе из турбины $\Delta\alpha_{out}$ (должно было быть не более 10°).

Ограничениями являлись газодинамические параметры ТНД: расход рабочего тела G, степень понижения давления π_T^*, мощность N. Эти параметры при оптимизации не должны изменяться более чем на *0,5%* от базового значения.

Параметры, описывающие геометрию лопаток ротора и статора, использовались как переменные в процессе газодинамической оптимизации ТНД. Для лопаток статора (СА) выполнялось 2D и 3D перепрофилирование, для лопаток ротора (РК) выполнялось только 2D перепрофилирование.

2D перепрофилирование выполнялось за счёт изменения угла установки профилей лопаток $\Delta\gamma$ и двух ординат точек сплайна, описывающего среднюю линию Δy_1 и Δy_2, в трёх сечения (втулочном, среднем и периферийном (рис. 4). Таким образом, количество переменных, используемых для 2D перепрофилирования лопаток ротора и статора, составляло 9 на каждый лопаточный венец.

3D перепрофилирование лопаток статора выполнялось за счёт сдвига сечений лопаток в окружном и осевом направлениях, а также за счёт масштабирования сечений (рис. 5). Таким образом, количество варьируемых переменных для описания 3D формы лопатки каждого соплового аппарата - 9.

Суммарное количество варьируемых переменных в задаче газодинамической оптимизации ТНД - 81.

Оптимизация выполнялась с использованием CFD модели ТНД Сеть1 модель турбулентности Spalart-Allmaras.

В процессе решения задачи оптимизации было выполнено около 1000 обращений оптимизатора к математической модели ТНД. При этом пространство оптимальных решений было обнаружено после примерно 600 обращений.

В результате решения задачи оптимизации был получен фронт Парето компромиссных решений между величиной КПД, интегральным углом выхода потока из ТНД α_{out} и параметром, характеризующим величину остаточной закрутки потока на выходе из ТНД $\Delta\alpha_{out}$. Полученный фронт Парето показан на рис. 10. Каждой точке фронта Парето соответствует уникальный вариант ТНД. На нем величина КПД показана кругами, диаметр которых тем больше, чем больше падение КПД в данной точке по сравнению с базовым значением:$\Delta КПД_i = КПД_{баз} - КПД_i$, где $КПД_{баз}$– значение КПД для базового варианта ТНД; $КПД_i$– значение КПД для i-го варианта ТНД с фронта Парето.

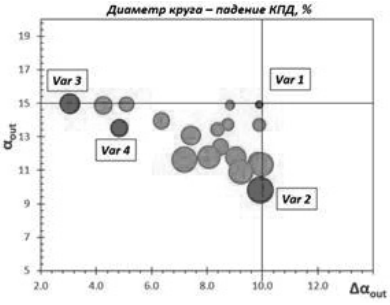


Рис. 10.Фронт Парето

Анализ полученного фронта Парето показал, что уменьшение угла выхода потока из турбины α_{out} и параметра остаточной закрутки $\Delta\alpha_{out}$ возможно только при снижении КПД. В то же время минимальное падение КПД 0,12% наблюдается для варианта ТНД, находящегося на границе заданных ограничений. для дальнейшего анализа были выбраны четыре точки фронта Парето (табл. II):

- точка с минимальным падением КПД относительно базового варианта ТНД;
- точка с минимальным значением угла выхода потока из турбины α_{out};
- точка с минимальным значение параметра остаточной закрутки $\Delta\alpha_{out}$;
- компромиссный вариант.

ТАБЛИЦА II. ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТНД В ВЫБРАННЫХ ТОЧКАХ ФРОНТА ПАРЕТО

Вариант ТНД	**Падение КПД, %**	**Интегральный угол расхода на выходе α_{out}, град**	**Закручивание потока на выходе из ТНД $\Delta\alpha_{out}$, град**
Базовый	0	22.73	12.79
Вариант 1	0.12	14.92	9.89
Вариант 2	0.386	9.82	9.92
Вариант 3	0.292	14.95	3.06
Вариант 4	0.262	13.53	4.83

На рис. 11 приведены графики распределения угла выхода потока из ТНД в радиальном направлении для 4 выбранных и базового вариантов ТНД. Видно, что в результате оптимизации угол выхода потока и остаточная закрутка потока были значительно сокращены.

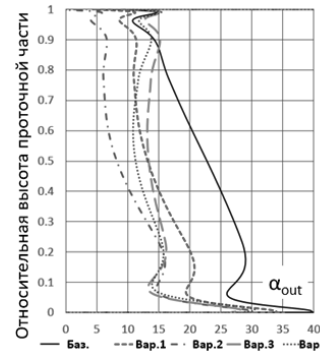
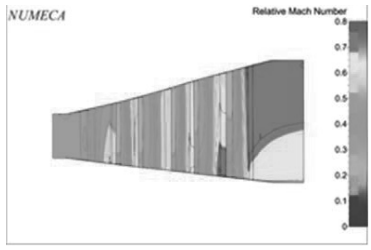


Рис. 11.Графики распределения угла выхода потока из ТНД в радиальном направлении для выбранных вариантов турбины

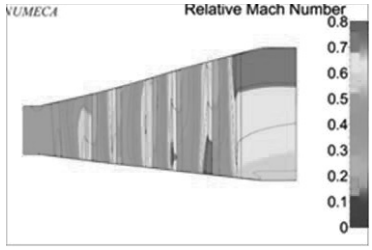
На рис. 12 показано сравнение чисел Маха, усредненных по окружности, для вариантов 1 и 4 и их сравнение с полями базового варианта ТНД. Видно, что основные изменения в структуре потока в ТНД произошли в последнем рабочем колесе.

В качестве финального варианта для дальнейшей проработки был выбран вариант 4.

Базовый вариант ТНД



ТНД: Вариант 1



ТНД: Вариант 4

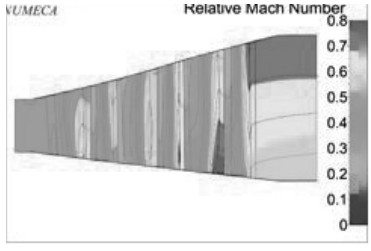


Рис. 12.Сравнение рассчитанных полей числа Маха в проточной части ТНД для различных вариантов

Проверка результатов решения задачи газодинамической оптимизации ТНД для всех выбранных вариантов турбин выполнена с использованием сетей Сеть1 и более детальных сетей Сеть3 с моделями турбулентности Spalart-Allmaras, k-epsilon и k-omega. Применение более точных моделей приводит только к небольшому количественному изменению рассчитанных параметров ТНД. Качественно результаты (позиция точек относительно друг друга и относительно заданных ограничений) при использовании более точных сетей не меняются. Этот факт позволяет использовать для оптимизационных исследований более быструю, но менее точную модель ТНД.

VII. Выводы

В результате проведенного исследования был разработан алгоритм и методика решения многокритериальной задачи оптимизации многоступенчатой турбины по газодинамическим критериям в условиях ограничений. С использованием разработанного алгоритма была выполнена оптимизация ТНД. В результате был найден вариант, который позволяет уменьшить угол выхода потока до требуемых значений при ухудшении КПД только на 0,262%.

В дальнейшем планируется решить поставленную задачу с учетом прочности лопаток турбины.

Список литературы

[1] Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Aero-engine Design: From State of the Art Turbofans Towards Innovative Architectures, Lecture Series 2008-03.

[2] Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. - М.: Наукова думка, 1982. - 296 с.

[3] NUMECA, User Manual AutoGrid5 Release 8.4, NUMECA.inc., Belgium, January 2008 (https://www.numeca.com/home).

Разработка концепции и апробация многоуровневой модели рабочего процесса центробежного компрессора для быстрого получения его достоверных характеристик в задачах оптимизации

Марчуков Е.Ю.
Кафедра технологии производства двигателей летательных аппаратов МАИ
Москва, Россия
okb.umpo@mail.ru

Егоров И.Н.
Кафедра технологии производства двигателей летательных аппаратов МАИ
Москва, Россия
egorov300657@yandex.ru

Попов Г.М.
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов Самарский университет
Самара, Россия
grishatty@gmail.com

Батурин О.В.
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов Самарский университет
Самара, Россия
oleg.v.baturin@gmail.com

***Abstract*—The paper presents the main ideas of the virtual test bench concept for rapid obtaining of the reliable characteristics of compressors based on a multi-level mathematical model with a two-step identification using data obtained from mathematical models with a high order of accuracy. One of the possible identification algorithms and the results of its successful testing are given on the example of a centrifugal compressor stage developed and tested at NASA.**

Ключевые слова —математическая модель, виртуальный компрессорный стенд, центробежный компрессор, напорная характеристика, КПД характеристика

I. Введение

Компрессор является важной составной частью газотурбинного двигателя (ГТД), существенным образом влияющей на эффективность его цикла, топливную экономичность, надежность и устойчивость работы [1, 2]. Для создания образца, способного сегодня успешно соперничать с конкурентами, не достаточно получить лопатки, обеспечивающие наилучшую структуру потока (что само по себе является трудной научно – инженерной задачей).

Для успешного решения задачи проектирования и расчетной доводки компрессора на современном уровне следует привлекать сложную мультифизичную модель (учитывающую газовую динамику, статическую и динамическую прочность, технологию изготовления, стоимость, акустические процессы и т.д.) высокой точности (3/4D (детально учитывающие пространственную форму и нестационарность происходящих процессов соответственно) на основе уравнений с минимальными допущениями).

Задача проектирования или модернизации компрессора сегодня – это поиск оптимума многоэкстремальной, многокритериальной, многодисциплинарной функции огромного числа переменных, вид и форма которой не известны, в условиях большого числа ограничений. Она не является линейной. Она не имеет однозначного решения, и часто одинаковые конструкторские решения, принятые в различных условиях, приводят к прямо противоположным результатам. По этой причине, создание современного компрессора – одна из сложнейших научно-технических задач. Такая задача может быть решена только с использованием методов математической оптимизации [4-6,8].

Ключевой проблемой проектирования современных компрессоров с выдающимися характеристиками является создание связанного комплекса многоуровневых математических моделей, который позволит за приемлемое время смоделировать работу компрессора и его элементов на максимально ранних этапах, до производства опытного образца, выявляя потенциальные дефекты и варианты, которые по тем или иным критериям не могут удовлетворить требованиям технического задания. Этот комплекс выполняет те же функции, что и испытательные стенды, поэтому его с полным правом можно назвать «виртуальным испытательным компрессорным стендом».

II. Алгоритм виртуального компрессорного стенда

Для получения в расчете данных, максимально приближенных к реальным, необходимо применять точные 3/4D математические модели, описывающие происходящие процессы с минимально возможными допущениями (с учетом изменения параметров во всех направлениях и нестационарности происходящих процессов). Их основной недостаток – большое время получение результата. В тоже время, известно большое число упрощенных физических моделей (1/2D (под ними понимаются модели определяющие только осредненные значения параметров по всему каналу, либо параметры осредненные в окружном направлении, но переменные вдоль радиуса)и модели с существенными допущениями (например, для газовой динамики – уравнения Эйлера) и т.п.), которые не так точны, но требуют малое расчетное время (исчисляемое секундами и минутами).

По мнению авторов статьи, ключевой технологией, которая позволит быстро и точно получить требуемый вариант компрессора с выдающимися характеристиками (и станет основой виртуального компрессорного стенда), удовлетворяющего поставленным техническим требованиям, является связанная комбинация простейших «быстрых и дешевых» и сложных «медленных и дорогих» моделей. Главная особенность предлагаемого вари-

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

анта виртуального стенда состоит в том, что он строится на базе многоуровневой математической модели с двухступенчатой коррекцией результатов по данным, полученным по математическим моделям с высоким порядком точности.

В основе предлагаемой методики лежит модель низкого порядка точности (например, 1/2D). В ней на базе известных геометрических данных компрессора (в виде 3D модели (часто параметрической), комплекта чертежей элементов или массива данных, содержащих информацию о основных геометрических параметрах элементов проточной части) и моделируемых условиях (из программы эксперимента) находятся характеристики компрессора. Из полученных данных формируется протокол результатов испытаний, копия которого помещается в архив.

Основной недостаток модели низкого уровня заключается в том, что в силу сильного упрощения, получаемые характеристики имеют большую погрешность. Такие модели упрощают геометрию модели (в частности, не учитываются радиусы кривизны, влияние пространственной увязки элементов, галтели и т.п.).

Для устранения указанного недостатка в предлагаемом варианте виртуального стенда предложено использовать блок коррекции результатов упрощенных расчетных моделей. Принцип его функционирования заключается в том, чтобы сопоставить результаты расчета одного и того же узла по упрощенным методикам и по 3D (CFD) методикам. Последние, как отмечалось, имеют минимальные допущения, описывают геометрию проточной части без упрощений и показывают наилучшую достоверность среди известных сегодня расчетных методов. Результаты, полученные двумя путями, сопоставляются между собой. В результате находятся поправки для простой модели, и дальнейшее исследование рабочего компрессора проводится с помощью характеристик, рассчитанных по скорректированной упрощенной модели.

По мере выполнения различных проектов, геометрия компрессоров и результаты их 3D и упрощенных расчетов будут накапливаться в архиве. В результате будет накоплена обширная база корректирующих поправок в существенно более широком диапазоне изменения геометрических и режимных параметров, чем конкретная решаемая задача. Статистическая обработка данных архива (построение регрессионных моделей) может найти универсальные поправки для упрощенных моделей компрессоров, которыми можно пользоваться, не проводя большого числа первоначальных 3D расчетов конкретной задачи (возможно будет проведен один контрольный расчет, который будет занесен в архив). Статистическая обработка архива должна проводиться периодически, через равные промежутки времени, постоянно уточняя поправочные коэффициенты (обучая упрощенную модель). Более того, блок коррекции результатов может существовать, работать и «учиться» независимо от виртуального стенда. Для этого следует реализовать блок, который будет случайным образом генерировать геометрию компрессора (с изменением основных параметров в широком диапазоне, с отсеиванием нереализуемых по разным причинам вариантов), проводить упрощенный и 3D расчет процессов в них, записывать результаты в архив и периодически его обрабатывать. Такой подход позволит получить постоянно обучающиеся упрощенные модели рабочих процессов компрессора, способные рассчитать их достоверные характеристики с учетом большого числа особенностей геометрии узла. Такая «система обучения» и результаты ее функционирования является самостоятельным продуктом, который может представлять интерес для компрессоростроительных предприятий.

Важной проблемой коррекцией результатов расчета упрощенных моделей является точность 3D моделирования, по данным которого проводится коррекция. Для ее решения предлагаемый вариант виртуального стенда включает в себя блок коррекции результатов 3D модели по результатам экспериментов, который должен находить поправки (настройки) для 3D моделей, повышающие точность расчетов. Этот блок строится по принципу коррекции результатов упрощенной модели. Также возможно построение автоматически действующего алгоритма коррекции результатов 3D моделей с периодически действующей статистической обработкой архива (обучение моделей). Однако его реализация затруднена малым числом доступных результатов эксперимента и редким обновлением их базы данных.

III. Объект для построения пилотного варианта виртуального стенда

Построение и отладка пилотного варианта «виртуального стенда» для испытания компрессоров была проведена на примере одноступенчатого центробежного компрессора (ЦБК). Для этого был выбран компрессор, спроектированный в NASA, чьи характеристики были подробно изучены экспериментально [3].Основные параметры компрессора в проектной точке приведены в таблице 1. Его трёхмерная модель представлена на рис.1. Экспериментальные характеристики компрессора, полученные в NASA [3], приведены на рис.3.

ТАБЛИЦА I. Основные параметры исследуемого ЦБК

Параметр	**Обозначение**	**Размерность**	**Значение**
Частота вращения ротора	n	об/мин	22000
Расход воздуха на входе	G	кг/с	5.1
Степень повышения давления	π_k^*	-	4.5
КПД	η_k^*	-	0.8

Рис. 1. Трёхмерная модель исследуемого центробежного компрессора

IV. Создание и верификация 3D численной модели рабочего процесса компрессора

На основании подробного описания геометрии исследуемого компрессора и результатов его экспериментальных исследований [3] в программном комплексе NumecaFineTurbo [8] была создана 3D численная модель (модель высокого уровня) его газодинамических процессов.

Расчетная область состояла из трех подобластей (рабочего колеса (РК), лопаточного и осевого диффузоров). Каждая из подобластей состояла из одного межлопаточного канала с периодическими граничными условиями на боковой поверхности. Домен РК рассчитывался в подвижной системе координат (СК), вращающейся с частой вращения ротора, остальные домены считались в неподвижной СК. Параметры потока между подобластями передавались с помощью интерфейса FullNonMatchingMixingPlane, который осредняет в окружном направлении параметры потока на выходе из одного домена и передает их на вход в находящийся ниже по течению в качестве входных граничных условий.

В качестве граничных условий на входе в ЦБК задавались значения полного давления (101325 Па) и полной температуры (288 К) в стандартных атмосферных условиях. На выходе из ЦБК задавалось статическое давление на втулочном обводе. Значение статического давления подбиралось из условия обеспечения необходимой точки на характеристике компрессора.Сетка конечных объемов (КО) создавалась таким образом, чтобы значение параметра y_1+ на стенках расчётной области равнялось 1. Общее число элементов составило – 3,2 млн. элементов.

Структура течения (числа Маха) в исследуемом компрессоре в проектной точке показана на рис.2. Сопоставление полученных в результате 3D расчётов напорных и КПД-характеристик (рис. 3) при частоте вращения $\bar{n}$=100% с экспериментальными данными свидетельствует об их хорошем качественном и количественном совпадении. Внешний вид характеристик исследуемого компрессора, полученных с помощью созданной расчетной 3D модели, которые в дальнейшем для будут использованы при коррекции результатов расчета упрощенной модели, показаны на рис. 4.

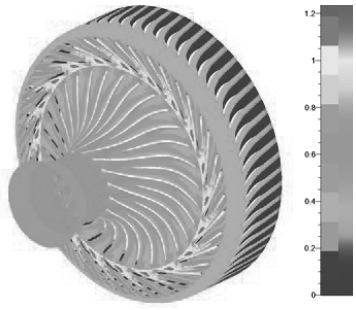


Рис. 2. Расчётные поля чисел Маха в относительном движении в проектной точке, полученные для исследуе-мого компрессора с помощью расчетной 3D модели

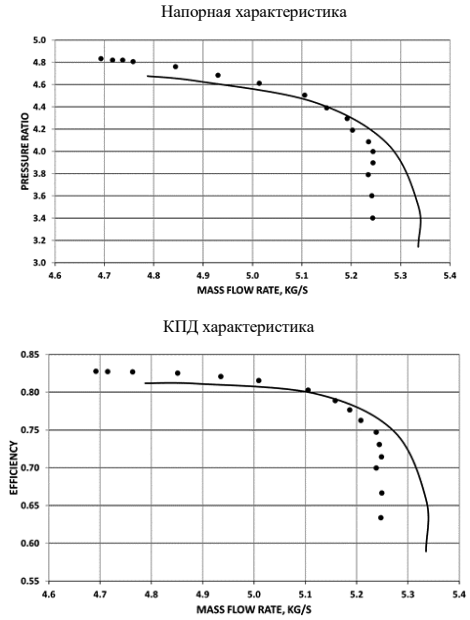


Рис. 3. Сравнение экспериментальной и расчетной (с помощью 3D модели) характеристик исследуемого центробежного компрессора при частоте вращения ротора 100%

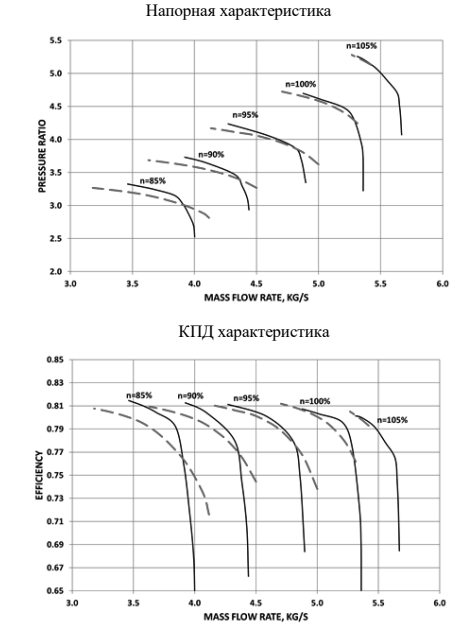


Рис. 4. Характеристики исследуемого ЦБК, полученные с помощью 3D и упрощенной 2D расчетной модели рабочего процесса

V. Характеристики ЦБК, созданные с помощью расчетной модели низкого уровня

Для используемого в качестве примера центробежного компрессора, для тех же исходных данных была построена упрощенная 2D модель рабочего процесса в нем. С ее помощью были получены характеристики компрессора. Они приведены на рис. 4 в сопоставлении с характеристиками, полученными по 3D модели, верифицированной по данным эксперимента. Как видно, результаты 2D моделирования имеют заметное качественное и количественное расхождение с эталонными данными.

VI. Описание примененного алгоритма коррекции результатов расчета простых математических моделей по моделям высокого уровня

Главная цель коррекции результатов математической модели по расчетным моделям высокого уровня заключается в том, чтобы найти такие корректирующие поправки, использование которых позволит максимально приблизить результаты расчета математической модели низкого уровня к эталонным (полученным в эксперименте или с помощью идентифицированной модели высокого уровня). При этом корректирующие поправки должны представлять собой функцию, зависящую от возможно большего числа режимных и геометрических параметров. Для получения действительно достоверных универсальных поправочных коэффициентов, максимально сокращающих погрешность моделирования произвольной задачи, необходимо провести анализ большой базы данных результатов сопоставления.

Как видно из рис. 4 для совмещения корректируемой и эталонной характеристик первую из них необходимо сместить и смасштабировать вдоль двух координатных осей. Подобную манипуляцию следует проделать с обоими ($\pi_к$* и КПД) характеристиками компрессора.

Связь точек исходной 2D и скорректированной характеристики при неизменной частоте вращения ротора можно записать следующим образом:

$$G_i^{\text{кор}} = G_i^{2d} + \Delta_G + \left(G_i^{2d} - G_{min}^{2d}\right)K_G;$$

$$\pi_{\text{к}i}^{\text{кор}} = \pi_{\text{к}i}^{2d} + \Delta_\pi + \left(\pi_{\text{к}i}^{2d} - \pi_{\text{к}max}^{2d}\right)K_\pi;$$

$$\eta_{\text{к}i}^{\text{кор}} = \eta_{\text{к}i}^{2d} + \Delta_\eta + \left(\eta_{\text{к}i}^{2d} - \eta_{\text{к}max}^{2d}\right)K_\eta,$$

где Δ_G, Δ_π, Δ_η – смещения линий характеристики;

K_G, K_π, K_η – коэффициенты масштабирования линий характеристики.

Указанные коэффициенты для фиксированной частоты вращения ротора рассчитываются следующим образом:

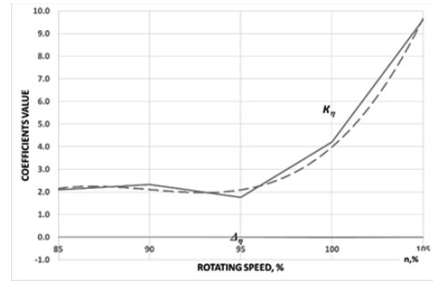
$$K_G = \frac{G_{max}^{3d} - G_{min}^{3d}}{G_{max}^{2d} - G_{min}^{2d}};\ K_\pi = \frac{\pi_{\text{к}max}^{3d} - \pi_{\text{к}min}^{3d}}{\pi_{\text{к}max}^{2d} - \pi_{\text{к}min}^{2d}};\ K_\eta = \frac{\eta_{\text{к}max}^{3d} - \eta_{\text{к}min}^{3d}}{\eta_{\text{к}max}^{2d} - \eta_{\text{к}min}^{2d}};$$

$$\Delta_G = G_{min}^{3d} - G_{min}^{2d};\ \Delta_\pi = \pi_{\text{к}max}^{3d} - \pi_{\text{к}max}^{2d};\ \Delta_\eta = \eta_{\text{к}max}^{3d} - \eta_{\text{к}max}^{2d}.$$

Эти коэффициенты вычисляются для всех вычисленных напорных линий (линий постоянной частоты вращения - изодром). В результате формируется массив данных вида K_G, K_π, K_η, Δ_G, Δ_π, Δ_η=f(n). Имеющиеся в нем данные интерполируются функциями: $K_G = f(n)$, $K_\pi = f(n)$, $K_\eta = f(n)$, $\Delta_G = f(n)$, $\Delta_\pi = f(n)$, Δ_η=f(n).

Коррекция 2D характеристик ЦБК, проведенная для взятого в качестве примера компрессора показала, что смещение линий характеристики наиболее точно интерполируются функцией $\Delta_i = an + b$, а коэффициенты масштабирования линий характеристики - полиномом третьей степени $K_i = cn^3 + dn^2 + en + f$. Примеры полученных коэффициентов и их интерполяция показаны на рис. 5.

для КПД



для степени повышения давления

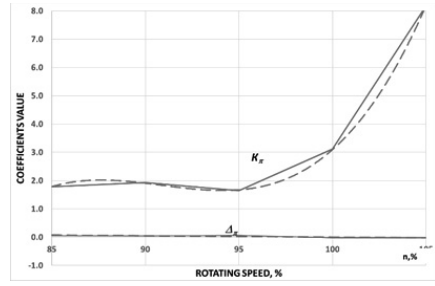


Рис. 5. Пример результатов расчета коэффициентов трансформации в задаче коррекции 2D характеристики виртуального прототипа (сплошная линия) и их интерполяция (штриховая линия)

Как видно из рис. 5, интерполяционные уравнения получены только по 5 точкам, и показывают относительно высокую погрешность. Очевидно, что накопление статистики коррекции результатов должно существенно ее сократить.

Используя найденные интерполяционные уравнения, вычисляются коэффициенты трансформации, и производится пересчет исходной 2D характеристики. Результаты описанной трансформации показаны на рис. 6. Как видно из представленных результатов, скорректированные характеристики показывают хорошее количественное совпадение, но в тоже время неудовлетворительное качественное.

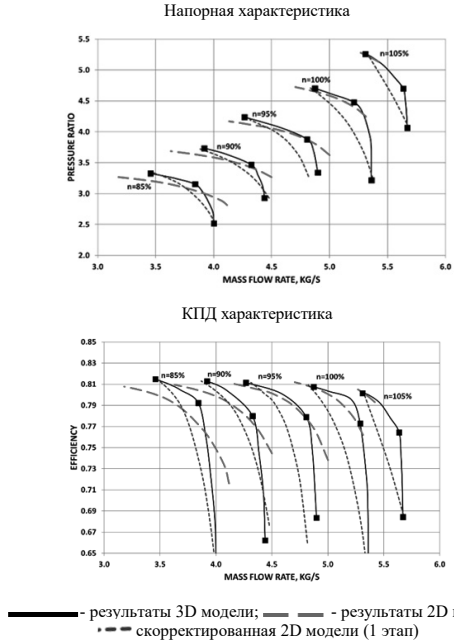


Рис. 6. Трансформация характеристик компрессора на первом этапе коррекции результатов

Для решения указанной проблемы, описанный выше алгоритм был модернизирован. Суть модернизации заключается в добавлении алгоритма «качественной коррекции» (второго этапа трансформации), когда некая средняя точка расчетной кривой совмещается с одноименной точкой эталонной кривой. Потребность в дополнительной коррекции связана с малым число расчетных точек, которое было получено, а также ограничениями в использовании примененной 2D модели.

Данный алгоритм функционирует следующим образом. На эталонной кривой выбирается «характерная точка» (данная точка получила индекс mid) - точка максимального перегиба кривой (обозначены на рис. 6). Для ее определения вычислялись касательные в точках, описывающих линию характеристик, и их изменение при переходе от одной точке к соседней в направлении роста расхода рабочего тела. В том месте, где угол наклона касательной меняется на наибольшую величину находится точка «максимального перегиба» (mid). Затем вычисляется угловая координата найденной точки в полярной системе координат с центром в начале координат. На трансформированной кривой находится точка с близким значением угловой координаты в той же СК.

Дальнейшая трансформация характеристик может проводится следующим способом. На втором этапе коррекции («качественная коррекция») происходит изменение только вдоль вертикальных осей:

$$\pi_{\text{к}i}^{\text{кор2этап}} = \pi_{\text{к}i}^{\text{кор1}} l_{\pi i} = \left(\pi_{\text{к}i}^{2d} + \Delta_\pi + \left(\pi_{\text{к}i}^{2d} - \pi_{\text{к}max}^{2d}\right)K_\pi\right)l_\pi;$$

$$\eta_{\text{к}i}^{\text{кор2этап}} = \eta_{\text{к}i}^{\text{кор1}} l_{\eta i} = \left(\eta_{\text{к}i}^{2d} + \Delta_\eta + \left(\eta_{\text{к}i}^{2d} - \eta_{\text{к}max}^{2d}\right)K_\eta\right)l_\eta,$$

где $l_{\pi i}$, $l_{\eta i}$ поправочные коэффициенты.

Было принято, что значение поправочных коэффициентов l_i с изменением расхода менялось в соответствии с рис. 7. Изменение величины поправочного коэффициента между максимальными и крайними значениями было принято линейным.

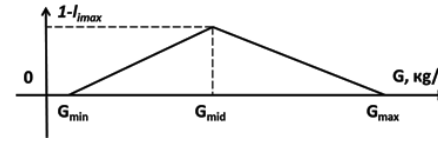


Рис. 7. Принятая закономерность изменения поправочных коэффициентов l_i

Значение максимальных поправочных коэффициентов находилось следующим образом:

$$l_{\pi max} = \frac{\pi_{\text{к}mid}^{3d}}{\pi_{\text{к}mid}^{2d}};\ l_{\eta max} = \frac{\eta_{\text{к}mid}^{3d}}{\eta_{\text{к}mid}^{2d}}.$$

Максимальные поправочные коэффициенты были найдены для всех рассчитанных линий, соответствующих постоянной частоте вращения, и затем интерполированы функцией вида $l_{imax} = p \cdot n + q$.

Результаты трансформации характеристики компрессора после 2 этапа показаны на рис.8. Как видно, трансформация позволила добиться хорошего совпадения скорректированной и эталонной характеристики, особенно при n=90 и 100%. Качественное искажение линий характеристики при других частотах вызвано малым числом расчетных точек, что внесло значительную погрешность в определение точки «максимального перегиба» (mid) на кривой 2D расчета.

VII. Выводы

В ходе выполнения исследования авторами для получения достоверных характеристик компрессора в короткий срок была разработана концепция виртуального стенда на базе упрощенных математических моделей с двухступенчатой коррекцией по результатам расчета по моделям высокого уровня и данным эксперимента. Согласно этой концепции, для ускоренного получения результата используются характеристики, полученные с помощью 1/2D математических моделей узлов. Они ба-

зируются на относительно простых корреляциях и требуют малое время расчета, но обладают существенной погрешностью. Для устранения указанного недостатка производится коррекция результатов расчета 1/2D моделей по результатам 3D расчетов. Последние имеют минимальные допущения, и показывают наилучшую достоверность среди известных сегодня расчетных методов. На основании сравнения находятся корректирующие поправки для 1/2D модели. 3D модели в свою очередь корректируются по результатам испытаний. При создании блоков коррекции результатов были предложены алгоритмы «обучения» 1/2 и 3D моделей.

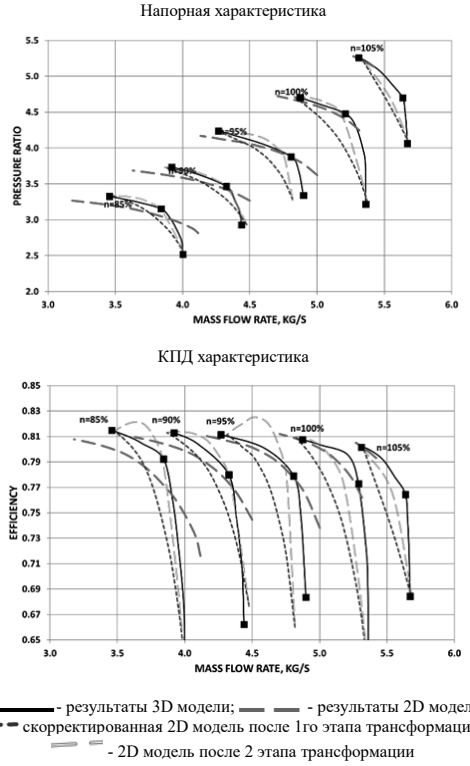


Рис. 8. Результат двухступенчатой трансформации 2D характеристик при коррекции результатов

Был разработан и успешно отработан алгоритм коррекции результатов расчета упрощенных моделей по моделям высокого уровня.

Данная статья является первым опытом научного коллектива практически реализовать идею, описанную в разделе I. По этой причине, а также из-за малого числа взятого в рассмотрении расчетных точек (из-за малого времени, выделенного на исследовании и проблемах при использовании упрощенной модели рабочего процесса (она не позволяла получать результаты расчета во всем рассмотренном диапазоне)), полученные результаты потребовали множественной коррекции.

Дальнейшее развитие работы планируется вести в направлении накопления опыта и статистики использования предложенного алгоритма и поиска путей его улучшения. Также планируется найти более устойчивую 2Dмодель, позволяющую получать результаты во всем интересующем диапазоне. Также видится перспективным апробировать разработанный подход на турбомашинах других типов.

СПИСОКЛИТЕРАТУРЫ

[1] Кулагин В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. - М.: Машиностроение, 2002. -616 с.

[2] Boyce M. Gas Turbine Engineering Handbook. - 4th ed., Butterworth-Heinemann, Elsevier, MA, 2012. -956 p.

[3] Medic,G., Sharma, O.P., Jongwook, L., Hardin, L.W., McCormick, D.C., Cousins, W.T., Lurie, E.A., Shabbir, A., Holley, B.M. and Van Slooten P.R., “High Efficiency Centrifugal Compressor for Rotorcraft Applications”, NASA/CR-2014-218114, 2014.

[4] Popov G., Goriachkin E., Kolmakova D., Novikova Y., Multicriteria optimization of axial low pressure compressor of gas turbine power plant // Proceedings of the ASME Turbo Expo, 2016. GT2016-57856.

[5] Komarov O.V., Sedunin V.A., Blinov V.L., Serkov S.A., Brodov Yu.M., The effect of optimization problem definition in 2D compressor airfoil // Proceedings of the ASME Turbo Expo, 2015. GT2015-44043.

[6] Siller U., Kröger G., Moser T., Hediger, S., Towards a highly efficient small scale turboshaft engine. Part II: Aero-mechanical turbine design and optimization // Proceedings of the ASME Turbo Expo, 2014. GT2014-26320.

[7] NUMECA, User Manual AutoGrid5 Release 8.4, NUMECA.inc., Belgium, January 2008 (www.numeca.com).

[8] Vinogradov K.A., Kretinin G.V., Leshenko I.A., Otriakhina K.V., Fedechkin K.S., Vinogradova O.V., Bushmanov V.V., Khramin R.V., Robust multiphysics optimization for fan blade aerodynamic efficiency, structural properties and flutter sensitivity // Proceedings of the ASME Turbo Expo, 2018. GT2018-76816.

Наилучшие настройки численных моделей осевых газовых турбин для получения достоверных результатов и оптимизации

Матвеев В.Н.
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов
Самарский университет
Самара, Россия
valeriym2008@rambler.ru

Волков А.А.
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов
Самарский университет
Самара, Россия
a44rey@gmail.com

Зубанов В.М.
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов
Самарский университет
Самара, Россия
waskes91@gmail.com

Новикова Ю.Д.
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов
Самарский университет
Самара, Россия
y.d.novikova@gmail.com

Дмитриев Д.Н.
Кафедра технологий производства двигателей
Самарский университет
Самара, Россия
dn-dmitriev@yandex.ru

***Abstract*—The authors consider the numerical simulation of the turbine working process using the RANS approach. They studied more than 80 papers published over the past 5 years in the examined field. Their analysis did not allow to identify unified recommendations for the creation of numerical models. The selection of model parameters is usually motivated by general considerations of numerical simulation, which follow from the method. In none of the papers the selection of parameters is correlated with the structure of the flow in the turbine. Many specific simulation issues were not covered at all. For the research, more than 1000 models of full-size axial turbines (including multistage turbines) and their elements were created. They differed in the number, size, parameters of the elements of finite volume meshes, in turbulence models, in the degree of simplification. The results were compared with the experimental data. As a result, the following was obtained:1. A method for developing and optimizing the working process of turbines using numerical simulation based on the RANS approach is proposed. The search for the optimal turbine configuration is carried out using light computational models, which are based on the simplified channel geometry and the finite volume mesh. Their application makes it possible to reliably find the optimal turbine configuration 2.8 times faster. The characteristics of the selected variants are verified with the help of verification models that consider the real geometry of the channels and have a minimum error. 2. Recommendations are given on the selection of parameters for finite volume meshes and the selection of turbulence models for numerical models of the working process of axial turbines designed to perform optimization and verification calculations.**

Ключевые слова —численное моделирование, оптимизация, осевая турбина, межлопаточный канал, модель турбулентности

I. Мотивация и постановка задачи исследования

В настоящее время существует необходимость в получении эффективных 3D численных моделей рабочего процесса неохлаждаемых осевых турбин для применения при их оптимизации и доводке турбин существующих и перспективных изделий. Здесь и далее под ними понимаются численные расчетные модели описывающие газодинамические процессы в межлопаточных каналах и сочетающие в себе максимальную точности моделирования (минимальную разницу между результатами расчета и реальностью) при наименьшем времени получения результатов.

Целью данной работы стала разработка конкретных рекомендаций по созданию численных моделей рабочего процесса осевых неохлаждаемых турбин с аэродинамически длинными лопатками (у которых не происходит смыкание вторичных вихрей) для проведения оптимизационных и поверочных газодинамических расчётов, сочетающих в себе большую точность предсказания параметров и требующих умеренных вычислительных ресурсов. В данной работе будут искаться рекомендации только по выбору параметров сетки конечных элементов и модели турбулентности – тех параметров, на которые может воздействовать инженер в реальной проектной практике.

II. Анализ имеющихся в технической литературе рекомендаций по построению численных моделей неохлаждаемых осевых турбин

Вначале был детально изучен алгоритм численного моделирования течения вязкого сжимаемого газа на основе решения осреднённых по времени уравнений Навье-Стокса (RANS) [1, 2]. Также был выполнен анализ 80 публикаций,связанных с исследованием и оптимизацией рабочего процесса осевых турбин, опубликованных в материалах конференции ASMETURBOEXPO за последние 5 лет.

Анализ показал, что среди всех параметров, настраиваемых инженером при формировании численных моделей, наибольшее внимание авторы публикаций уделяют параметрам сетки конечных объемов и выбираемым моделям турбулентности, что не удивительно, поскольку это параметры, выбор которых доступен для коррекции пользователям соответствующих программ.

Некоторые результаты анализа публикаций обобщены в виде гистограмм на рис. 1…3.

В результате анализа не было выявлено универсальных рекомендаций по формированию численных моделей рабочих процессов осевых турбин. У исследователей

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

нет единого взгляда на то, какие параметры должны описывать конфигурацию расчетной сетки, разные авторы используют различные сочетания параметров. Если рекомендации по выбору числа и размеров конечных объемов в двухмерном межлопаточном канале еще встречаются, то рекомендаций по выбору параметров, определяющих распределение элементов по высоте проточной части турбин с различными высотами лопаток отсутствуют.

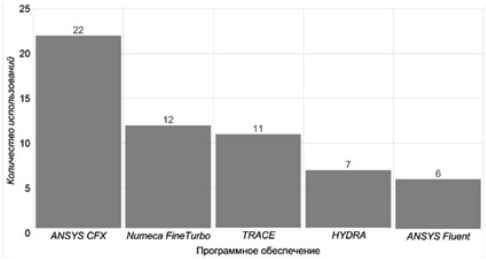


Рис. 1. Использование коммерческого программного обеспечения при решении задач численного моделирования рабочего процесса турбин в рассмотренных публикациях

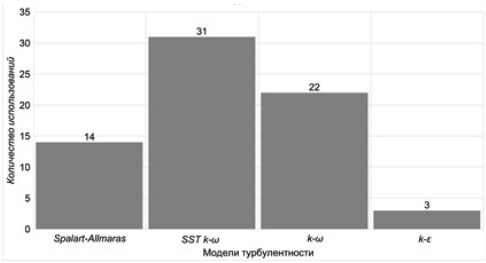


Рис. 2. Использование моделей турбулентности при решении задач численного моделирования рабочего процесса турбин в рассмотренных публикациях

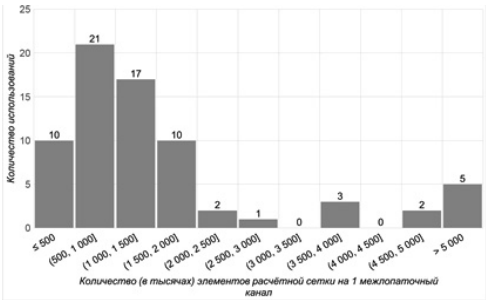


Рис. 3. Выбор числа конечных объемов в одном межлопаточном канале в рассмотренных публикациях

Интересно отметить, что из 80 рассмотренных исследований, только в 70 содержится хотя бы минимальное описание используемых численных моделей и закономерностей выбора их параметров. Также интересно отметить, что только в 18 исследованиях проводится исследование влияния параметров численных моделей на получаемые результаты. Выбор параметров численных моделей обычно мотивируется общими соображениями численного моделирования, вытекающими из самого метода. Ни в одной из найденных работ выбор параметров не увязан со структурой течения в исследуемом канале турбины.

Тем не менее, по результатам проведённого обзора были определены наиболее часто встречающиеся рекомендации по выбору параметров численных моделей рабочего процесса турбин:

- количество элементов в трёхмерной сетке одного лопаточного венца: от 0,5 млн. до 1,5 млн;
- количество элементов в 2D-сетке лопаточного венца: от 10000 до 20000;
- значение безразмерного параметра y+ на поверхностях торцевых стенок и лопаток: y+=1;
- модель турбулентности k-ω, SST или Spalart – Allmaras;
- значение коэффициента роста ячеек (Expansion Ratio) - до 1,4.

III. Анализ структуры течения в венце осевой турбины

Затем был проведен анализ типовой структуры течения рабочего тела в межлопаточных каналах осевых турбин [3]. Там можно выделить две характерные зоны: основного (ядро потока) и вторичного течения (в области торцевых стенок).

В области основного течения поток является квазидвухмерным, поэтому на моделирование потока в данной области оказывают влияние основные параметры 2D-сетки: параметр $y_{B2B1}{}^{+}$, характеризующий размер элемента, ближайшего к поверхности лопатки, а также число элементов вдоль сторон топологических блоков n_i, которые определяют суммарное количество элементов двухмерной сетки B2B (рис. 4). На этом рисунке цифрами обозначены границы, на которых задается число конечных объемов при построении сетки.

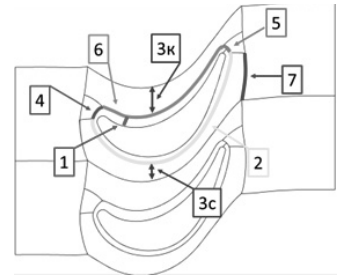


Рис. 4. Топологические блоки B2B сетки конечных объемов межлопаточного канала

В области вторичных течений структура потока является трёхмерной и развивается как вдоль линий тока, так и по высоте проточной части. Поэтому на моделирование структуры потока в данной области оказывают влияние не только параметры 2D-сетки, но также и параметры распределения элементов по высоте проточной части. Для описания распределения элементов по высоте проточной части предложено использовать размер элемента, ближайшего к торцевым стенкам y_{FP1}, коэффициент роста ячеек ER_{FP} и максимальное удлинение ячеек

MR_{FP} . Параметры ER_{FP} и MR_{FP} определяются как: $ER_{FP} = \frac{y_{FP\,i}}{y_{FP\,i-1}}$, $MR_{FP} = \frac{y_{FP\,max}}{y_{FP\,1}}$ (рис.5). На рис.5 показано сгущение сетки только у корня лопатки. В периферийной части сгущение осуществляется аналогичным образом. Коэффициенты сгущения для втулки и периферии совпадают.

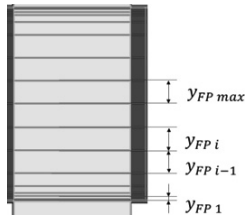


Рис. 5. Распределение конечных объемов по высоте лопатки в расчетной модели осевой турбины (к объяснению смысла параметров ER_{FP} и MR_{FP})

Сложный характер структуры потока в межлопаточных каналах осевой турбины приводит к тому, что потери энергии вдоль высоты проточной части изменяются неравномерно. Профильные потери имеют место по всей высоте лопатки, определяя общий уровень потерь и ряд интегральных параметров турбин. Поэтому выбор значений параметров 2D-сеток необходимо выполнять по определяемым в ходе моделирования профильным потерям для отдельных венцов или по интегральным параметрам турбин. Вторичные потери имеют неравномерное распределение по высоте лопатки и действуют только вблизи торцевых поверхностей канала. Поэтому при выборе значений параметров ER_{FP} и MR_{FP} необходимо выполнять оценку распределения значений параметров потока (например, коэффициентов потерь, угла потока, полного давления) по высоте проточной части.

IV. Исследования влияния параметров сеток конечных объёмов и моделей турбулентности на эффективность моделирования рабочего процесса решёток газовых турбин

*Этап. 1.*Исследование по оценке влияния параметров сеток конечных объёмов и моделей турбулентности на эффективность моделирования рабочего процесса решёток газовых турбин было проведено, опираясь на данные из атласа [4]. В атласе содержится результаты экспериментального определения профильных потерь более чем в 170 незакрученных решетках осевых турбин постоянного по высоте сечения.Для всех решёток известны экспериментально найденные характеристики – зависимости профильных потерь от приведённой изоэнтропической скорости на выходе $\zeta_{\text{ПР}} = f(\lambda_{2S})$ и угла потока на выходе из решётки: $\beta_2 = f(\lambda_{2S})$. Кроме того, для некоторых решёток известны экспериментально определённые распределения потерь по высоте лопатки $\zeta = f(h)$.

На первом этапе для всех выбранных решеток профилей рабочий процесс был рассчитан с помощью численных моделей, созданных на основании рекомендаций, найденных при анализе литературных источников: количество элементов в 2D-сетках было около 14000, параметр y^+_{B2B1} составлял 1, параметры ER_{FP} и MR_{FP} составляли 1,4 и 1000, соответственно. Эти численные модели здесь и далее именуются базовыми. Число элементов в базовых трёхмерных сетках для всех решёток составляло около 1,1 млн. элементов.

Результаты расчёта характеристик решёток с использованием базовых расчётных сеток и шести моделей турбулентности показали, что все 24 расчётные характеристики (для 4 турбинных решеток с помощью различных моделей турбулентности) вида $\zeta_{\text{ПР}} = f(\lambda_{2S})$ являются адекватными экспериментальным данным. На рис.6 показан пример полученных результатов для решётки №1 [4]. Наименьшие погрешности определения коэффициентов профильных потерь $\zeta_{\text{ПР}}$ и КПД решёток $\eta_{\text{ПР}}$ достигаются при использовании моделей турбулентности k-ω (Wilcox) и SA. Все расчётные характеристики вида $\beta_{2\text{ср}} = f(\lambda_{2S})$ адекватны экспериментальным, а абсолютные погрешности определения $\beta_{2\text{ср}}$ с использованием различных моделей турбулентности примерно одинаковы и составляют около 1°.

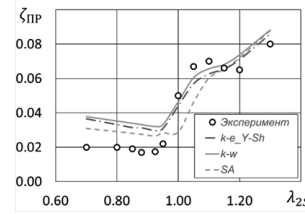


Рис. 6. Сопоставление экспериментальных и расчётных характеристик $\zeta_{\text{ПР}} = f(\lambda_{2S})$, полученных с использованием базовых сеток и различных моделей турбулентности на примере решеткиNo1 [4]

*Этап. 2.*На следующем шаге была проведена оценка влияния числа элементов 2D-сетки B2B на точность газодинамического моделирования. В рамках исследования на основе базовых сеток для каждой решётки было создано по 4 дополнительные расчётные сетки, в которых число элементов 2D-сетки B2B варьировалось от 6000 до 34000. Число элементов вдоль сторон топологических блоков двухмерных сеток менялось согласно выражения $n_{B2Bi} \approx n_{B2B0} \cdot 1.25^i$, где n_{B2B0} – число элементов вдоль какого-либо топологического блока в базовой сетке B2B0, n_{B2Bi} – число элементов вдоль того же топологического блока в сетке B2Bi (i=-2, -1, 0, 1, 2). Каждая из сеток рассчитывалась с использованием различных моделей турбулентности. Всего было получено 120 расчётных характеристик вида $\zeta_{\text{ПР}} = f(\lambda_{2S})$. Изменение количества элементов и модели турбулентности не меняет поведения рассчитываемых характеристик $\zeta_{\text{ПР}} = f(\lambda_{2S})$, а приводит лишь к их некоторому сдвигу вдоль оси ординат. При увеличении количества элементов двухмерной сетки свыше 21000 (соответствует сетке B2B1) их влияние на уровень расчётных потерь становится крайне незначительным (рис.7). На характеристики вида $\beta_{2\text{ср}} = f(\lambda_{2S})$ изменение количества элементов двухмерной сетки влияния практически не оказывает.

Абсолютные и относительные погрешности определения профильных потерь и КПД турбинной решётки несущественно зависят от количества элементов двухмерной сетки. При этом ускорение расчёта S возрастает в 2 раза при снижении числа элементов двухмерной сетки до 6000 (рис. 8). Увеличение числа элементов двухмерной сетки приводит лишь к локальному уточнению моделируемой структуры потока. Таким образом, для оптимизационных расчётов целесообразно использование сеток B2B-2 (6000 эл.), а для поверочных – сеток B2B1 (21000 эл.).

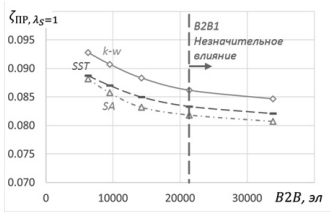


Рис. 7. Влияние числа элементов 2D-сетки на рассчитываемые значения коэффициентов профильных потерь (на примере решётки №34 [4])

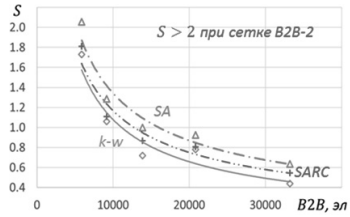


Рис. 8. Влияние числа элементов 2D – сетки на ускорения расчета S (на примере решётки №168, $\beta_1 = 30^0$ [4])

Этап. 3. Затем было проведено исследование влияния параметра $y_{B2B1}{}^{+}$ на эффективность моделирования. В рамках исследования на основе базовых сеток для каждой решётки было создано по 4 дополнительные расчётных сетки, отличавшихся лишь значением параметра $y_{B2B1}{}^{+}$, которое варьировалось от 0,2 до 5,0. Каждая из сеток рассчитывалась с использованием различных моделей турбулентности (всего 120 численных моделей).

Изменение параметра $y_{B2B1}{}^{+}$ не влияет на поведение получаемых характеристик $\zeta_{ПР}$=f(λ_{2S}) и лишь сдвигает их вдоль оси ординат. При уменьшении параметра $y_{B2B1}{}^{+}$ ниже 1 его влияние на уровень рассчитываемых профильных потерь становится несущественным. Абсолютные и относительные погрешности определения профильных потерь и КПД также практически постоянны при значении $y_{B2B1}{}^{+}$ меньше 1 и существенно возрастают при значениях $y_{B2B1}{}^{+}$ больше 1 (рис. 9).

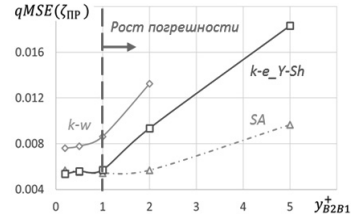


Рис. 9. Влияние параметра y^+_{B2B1} на абсолютную погрешность $qMSE(\zeta_{ПР})$ (на примере решётки №34[100])

V. Исследование распределения элементов сетки конечных объемов по высоте проточной части на эффективность моделирования рабочего процесса решёток турбин

Этап. 4. В рамках исследований для каждой из решёток было создано по 9 сеток, значения параметров ER_{FP} и MR_{FP} в которых варьировались в диапазонах от 1,2 до 1,7 и от 250 до 4000 соответственно. Каждая сетка моделировалась с использованием различных моделей турбулентности. Всего было создано 216 численных моделей.

Параметры ER_{FP} и MR_{FP} оказывают качественное и количественное влияние на рассчитываемое распределение вторичных потерь по высоте проточной части $\zeta_{ВТ} = f(h)$. Увеличение параметров ER_{FP} и MR_{FP} приводит к уменьшению характерного пика вторичных потерь на эпюре распределения вторичных потерь по высоте проточной части (рис.10), что подтверждается также картинами структуры потока в межлопаточных каналах (рис. 11).

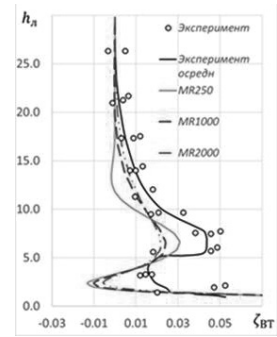
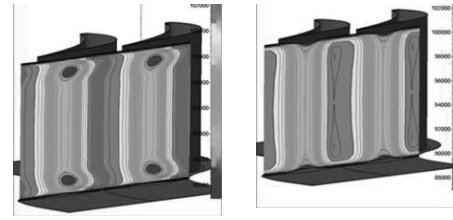


Рис. 10.Влияние параметра MR_{FP} при $ER_{FP} = 1{,}2$ на моделирование вторичных потерь (на примере решётки №34 [4]) (показано изменение потерь только у втулочной поверхности канала)

Допустимые сочетания параметров ER_{FP} и MR_{FP}, позволяющие адекватно экспериментальным данным описывать распределение вторичных потерь по высоте лопатки: $ER_{FP} = 1{,}2$, $MR_{FP} = 250 \ldots 2000$, а также $ER_{FP} = 1{,}2 \ldots 1{,}7$, $MR_{FP} = 250$.



а) $ER_{FP} = 1.2$; $MR_{FP} = 250$ в) $ER_{FP} = 1.7$; $MR_{FP} = 4000$

Рис. 11.Влияние параметров ER_{FP} и MR_{FP} на рассчитываемые поля турбулентной вязкости на выходе из решётки №34

Этап 5. Затем было проведено исследование влияния модели турбулентности на эффективность моделирования вторичных потерь в решетках осевых турбин. При проведении сеточных исследований было установлено, что выбор модели турбулентности оказывает лишь количественное влияние на характеристики решёток вида $\zeta_{ПР} = f(\lambda_{2S})$, а, следовательно, и погрешности определения коэффициентов профильных потерь и КПД решёток. Наименьшие погрешности расчётного определения характеристик решёток обеспечиваются при использовании моделей турбулентности SST и k-ω.

Также было установлено, что выбор модели турбулентности оказывает определённое влияние на ускорение расчётов S.Наибольшее значение ускорения достигается при использовании модели турбулентности Spalart-Allmaras. Таким образом, для выполнения оптимизационных расчётов целесообразно использование модели Spalart-Allmaras (SA), а для проверочных – моделей турбулентности SST и k-ω, так как при этом достигается наименьшая погрешность определения потерь.

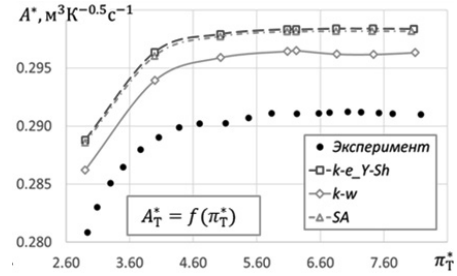
VI. Исследование влияния различных параметров сеток конечных объемов на эффективность моделирования рабочего процесса полноразмерных газовых турбин

Этап 6. Всего было исследовано десять неохлаждаемых осевых турбин с аэродинамически длинными лопатками. Количество ступеней в выбранных турбинах варьировалось от 1 до 4, пропускная способность A_T^* лежала в диапазоне от,3 м$^3K^{-0.5}c^{-1}$ до 3,0 м$^3K^{-0.5}c^{-1}$, значениепараметра нагруженности u/c_S^* составляло от 0,3 до 0,66.

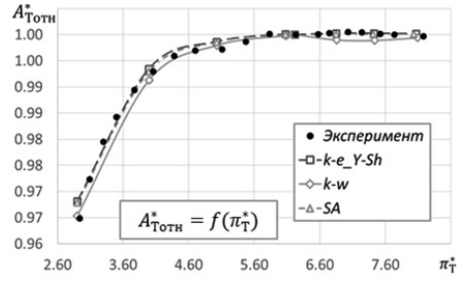
Вначале были созданы расчётные модели турбин с использованием настроек базовых численных моделей рабочего процесса. Они не содержали притраковых полостей. Моделирование выполнялось с использованием трёх моделей турбулентности *Spalart-Allmaras (SA), k-ε Low Re Yang-Shih и k-ω* (всего 30 численных моделей).

В результате проведённых исследований было установлено, что все полученные характеристики адекватны имеющимся характеристикам турбин, полученным экспериментально или с использованием верифицированных математических моделей. Вместе с тем расхождение имеющихся и полученных в результате численного моделирования значений интегральных параметров турбин в расчётной точке достигало 4% (абс.) (рис. 12, а). По этой причине был выполнен пересчёт имеющихся и полученных в результате численного моделирования характеристик в относительный вид. Все относительные характеристики, полученные в результате численного моделировании, являются адекватными имеющимся экспериментальным характеристикам (рис. 12, б). Таким образом, был сделан выводом о том, что все базовые численные модели рабочего процесса турбин позволяют качественно описать протекание характеристик турбин.

Этап. 7. На следующем шаге было проведено исследование влияния параметров ER_{FP} и MR_{FP} на эффективность моделирования рабочего процесса турбин. Диапазон изменения параметров в ходе исследования составил: $ER_{FP} = 1{,}2 \dots 1{,}7$, $MR_{FP} = 1000 \dots 4000$. Также, как и в решётках, увеличение параметров ER_{FP} и MR_{FP} приводит к размыванию пиков, обусловленных вторичными потерями, на эпюрах распределения потерь по высоте проточной части (рис.13).При этом допустимые сочетания параметров ER_{FP} и MR_{FP} позволяющие адекватно описывать распределение потерь по высоте лопатки: $ER_{FP} \leq 1{,}4$, $MR_{FP} \leq 2000$. На абсолютные и относительные характеристики турбин параметры ER_{FP} и MR_{FP} в допустимом диапазоне влияния практически не оказывают.



а) абсолютные характеристики



б) относительные характеристики

Рис. 12.Сопоставление расчётных и экспериментальных характеристик турбины NASA 4.5 ступени [5], полученные с использованием различных моделей турбулентности и базовых сеток

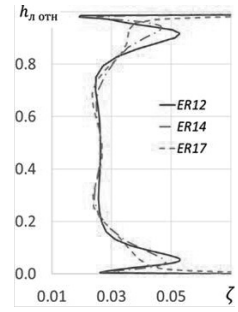


Рис. 13.Влияние параметра ER_{FP} при $MR_{FP} = 1000$ на моделируемое распределение потерь по высоте лопатки в сечении за 1 сопловым аппаратом турбины NASA [5]

Этап 8. Исследования по влиянию учёта полостей над бандажными полками на эффективность моделирования показали, что наличие бандажных полок качественно не влияет на поведение газодинамических характеристик турбин, но оказывает на них существенное количественное влияние, сдвигая КПД-характеристики вниз вдоль оси ординат на величину до 1%, что приводит к существенному снижению погрешности расчётного определения КПД.

Наименьшие погрешности определения интегральных параметров турбин обеспечиваются при использовании модели турбулентности и k-ω, а наибольшее ускорение S – при использовании модели турбулентности Spalart-Allmaras.

VII. Обобщение полученных результатов: Рекомендации по созданию численных моделей осевых неохлаждаемых турбин

На основе выполненных исследований были разработаны два метода формирования рациональных численных моделей рабочего процесса турбин с аэродинамическими длинными лопатками, предназначенные для выполнения оптимизационных и поверочных расчётов.

На первом этапе создания рациональной численной модели, предназначенной для выполнения оптимизационных расчётов, выполняется построение геометрии расчётной области.

Затем строится сетка конечных объемов. Для оптимизационных расчётов необходимо использовать двухмерные сетки B2B-2 (6000 эл.), в которых значение безразмерного параметра y^+_{B2B1} равно 1. Распределение элементов по высоте необходимо задавать с использованием параметров ER_{FP} и MR_{FP}. На начальных этапах оптимизации целесообразно использование сеток, в которых $ER_{FP} < 1{,}4$, $MR_{FP} < 2000$. При оптимизации с уточнённым учётом вторичных потерь необходимо использовать сетки, в которых $ER_{FP} < 1{,}2$, $MR_{FP} < 2000$.

На третьем этапе настройки параметров численной модели необходимо выбрать модель турбулентности Spalart-Allmaras.

При настройке параметров распараллеливания необходимо придерживаться подхода, который подразумевает запуск максимального числа задач одновременно на всех процессорах.

Данный метод позволяет формировать рациональные оптимизационные численные модели, позволяющие точно оценивать тенденции изменения интегральных параметров турбин и имеющие высокие значения параметра ускорения до 2,8.

Метод формирования рациональных численных моделей, предназначенных для проверочных расчётов, отличается от метода для оптимизационных моделей лишь рекомендациями по выбору значений параметров численных моделей рабочего процесса.

Для поверочных расчётов целесообразно использование двухмерных сеток B2B1 (21000 эл.). Значения параметров распределения элементов по высоте проточной части целесообразно выбирать из интервала: $ER_{FP} < 1{,}2$, $MR_{FP} = 1000 \ldots 2000$. При проведении проверочных расчётов следует учитывать притрактовые полости над бандажными полками. Для поверочных расчетов наилучшие результаты показывает модель турбулентности k -ω.

Распараллеливание следует выполнять на максимальное возможное число процессоров, но на один процессор должно приходиться не менее 200 тыс. элементов расчётной сетки.

Данный метод позволяет формировать рациональные численные модели, предназначенные для поверочных расчётов, позволяющие определять детальную структуру потока, имеющие минимальные погрешности определения интегральных параметров, но также и невысокое значение ускорения S (порядка *0,27…0,30*).

VIII. Заключение

В представленной статье описываются основные этапы и результаты работы, направленной на повышение эффективности (роста точности и сокращения времени вычисления) моделирования рабочего процесса неохлаждаемых осевых турбин авиационных двигателей с применением RANS подхода.

Были изучены работы более чем 80 исследований разных авторов, опубликованных за последние 5 лет, связанных с численным моделированием рабочего процесса осевых турбин. Было создано, рассчитано и проанализировано более 1000 численных моделей осевых турбин и их элементов. Полученные результаты были сопоставлены с результатами экспериментов или расчетов по верифицированным методикам. Все результаты, полученные в ходе исследования были обработаны и обобщены с помощью методов математической статистики.В результате проведенной работы были получены следующие результаты.

1) Предложен метод исследования, доводки и оптимизации рабочего процесса осевых турбин с помощью численного моделирования на базе RANS подхода.
2) Предложен универсальный комплекс параметров, описывающих сетку конечных объемов численных моделей осевых авиационных турбины и базирующийся на особенностях структуры потока в исследуемых каналах.
3) Предложен и реализован оригинальный подход к поиску наилучших параметров сетки коечных объемов.
4) Получены рекомендации по назначению параметров сеток конечных объемов и выбору моделей турбулентности численных моделей рабочего процесса осевых неохлаждаемых турбин, предназначенных для выполнения поверочных расчётов.

Список литературы

[1] Anderson Jr. J.D. Computational Fluid Dynamics.-Hill Publishers, 1995. -76p.

[2] Lomax H., Pulliam T.H.,Zingg, David W. Fundamentals of Computational Flui Dynamics. - Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001. - 250p.

[3] Moustapha H., Zelesky M.F., Baines N.C., Japikse D. Axial and Radial Turbines – USA: Concept NREC, 2003. – 358 p.

[4] Venediktov, V.D., Granovsky, A.V. Atlas eksperi-mental'nykh kharakteristik ploskikh reshetok okhla-zhdaemykh gazovykh turbin. - In-t. Aviats. Motorб 1990. -393 p.

[5] Webster P.F. Design of a 4 ½ stage turbine with a stage load-ing factor of 4.66 and high specific work output. - NASA CR-2659, 1976.

Моделирование оценки живучести эргатических систем на основе использования взвешенных гиперграфов

Меньших В.В.
Воронежский институт
МВД России
Воронеж, Россия
menshikh@list.ru

Зверев Г.И.
Воронежский институт
МВД России
Воронеж, Россия
georgiyzverev@gmail.com

***Abstract* — Ergatic systems are applied in those areas where the operator interference in work is a necessary condition for ensuring their successful functioning. For effective functioning and the possibility of operative solution of emergency situations arising during the work under the prevailing conditions, it is necessary to evaluate the survivability of such systems, namely the ability to maintain a state of operability under destructive influences.**

The urgency of the problem of assessing the survivability of ergatic systems is determined by the fact that they are widely used in systems of critical application, whose destabilization of functioning leads to significant economic damage and/or negative social consequences. Examples of such systems include control systems of objects of fuel and energy complex, dispatching services of the transport infrastructure, governing bodies of state structures, forces and means of law enforcement agencies.

The efficiency of the functioning of the ergatic system is largely determined not only by the effectiveness of its individual elements, but also by the possibility of their interaction.

As a model of an ergatic system, it is proposed to use a weighted hypergraph whose vertices correspond with the elements of the system, edges describe the relationship between subsets of elements, vertex weights reflect the functionality of the corresponding elements, edge weights represent the degree of possibility of the interaction of the corresponding elements. The numerical values of the weights are determined in the form of probabilistic, fuzzy or interval estimates.

The system functionality is characterized by a set of indicators, the numerical values of which are determined on the basis of mathematical models using the parameters of the graph model of the system described above. The system is considered to be operational if the restrictions on the specified parameters are met.

Evaluation of vitality is based on finding the set of allowable deformations of the graph model of the system.

Ключевые слова — эргатические системы, живучесть системы, графовая модель, деформация графовой модели, гиперграф

I. Введение

Классическая теория интерпретирует понятие живучести как свойство объекта или системы выполнять заданные функции, сохраняя в течение определенного времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих определенным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки [1]. Применительно к данной области исследований можно сказать, что под живучестью можно понимать способность эргатической системы выполнять свои функциональные возможности в условиях воздействия на нее деструктивных воздействий.

Проблема изучения и анализа эргатических систем управления, а также вопросы их живучести весьма актуальны у большого количества авторов. Так, в [2] описаны концептуальные и методологические основы исследования систем управления, особенности их анализа и синтеза. Затрагивая вопросы живучести систем, можно обратиться к [3] и [4], где последовательно изложены теоретические основы живучести систем применительно к техническим и организационно-техническим системам различного назначения, а также рассмотрены вопросы теории и показатели надежности объектов, методы оценки надежности систем.

Необходимо отметить, что в указанных работах не учитывается возможность взаимодействия более двух элементов системы. В связи с этим возникает необходимость разработки математического аппарата, который, во-первых, учитывал бы «человеческий фактор» в ходе функционирования эргатических систем, а во-вторых, учитывал бы возможности взаимодействия более высокого порядка.

Однако в этом случае возникают новые вариации деструктивных воздействий для дестабилизации работы систем. В этой связи возникает задача нахождения новых видов деструктивных воздействий, их классификации и возможности успешного противостояния им.

Решению этих вопросов и посвящена данная работа.

II. Общее описание математической модели эргатической системы

Каждая эргатическая система содержит элементы (операторы и технические средства), которые в результате взаимодействия обеспечивают с некоторой вероятностью выполнение возложенных на систему функций. При этом следует учитывать, что выполнение некоторых функций подразумевает взаимосвязь более двух элементов.

При функционировании системы возможности отдельных элементов и/или взаимодействия между ними могут изменяться вследствие внешних или внутренних деструктивных воздействий. В этой связи, описывая эргатическую систему, в качестве структурно-параметрической модели [5] целесообразно использовать взвешенный гиперграф:

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

$$\Gamma = (S, E, P, K), \quad (1)$$

вершины S которого соответствуют элементам системы, ребра E характеризуют взаимосвязь между подмножествами элементов, веса P вершин отражают степень возможности выполнения возложенных на них функций, а веса ребер K отражают степень возможности осуществления взаимосвязи.

Веса вершин и веса ребер могут принимать значения, лежащие в отрезке от 0 до 1. Значение данных величин, равное нулю, соответствует выходу из строя элемента и/или отсутствию взаимосвязи между элементами, когда значение этих параметров, равное единице, соответствует функционированию элементов в штатном режиме и/или осуществлению взаимосвязи между элементами системы в полном объеме.

Если значения весов заданы численно, то функциональные возможности системы можно представить в виде функции $F(\Gamma)$, которая имеет вид:

$$F(\Gamma) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i p_i + \sum_{j=1}^{m} \beta_j k_j, \quad (2)$$

где α_i – важность (вклад в общую эффективность системы) элемента системы s_i, β_j – важность (вклад в общую эффективность системы) взаимосвязи e_j. Коэффициенты α_i и β_j могут быть оценены с использованием метода анализа иерархий [6] либо путем обобщения частных показателей эффективности системы. Пример расчета таких показателей для систем критического применения приведен в [7].

Если система функционирует в штатном режиме, то $F(\Gamma) = 1$.

В общем случае, учитывая присутствие «человеческого фактора», значения весов вершин и ребер гиперграфа могут быть найдены на основе обработки экспертных оценок. В этом случае параметры в формуле (2) могут быть представлены в виде нечетких переменных с функциями принадлежности $\mu_{\alpha_i}, \mu_{p_i}, \mu_{\beta_j}, \mu_{k_j}$, определенными на непрерывном или дискретном носителе X.

Анализ свойств данных параметров показал, что для операции агрегирования μ_{α_i} и μ_{p_i}, а также μ_{β_j} и μ_{k_j} выполняются свойства Т-нормы T [8, 9], а для агрегирования последующих – свойства S-нормы S [8] (в терминологии [9] – Т-конормы).

Следовательно, функция (2) принимает вид:

$$F(\Gamma) = S[\underset{i=1}{\overset{n}{S}}(T(\mu_{\alpha_i}, \mu_{p_i})), \underset{j=1}{\overset{m}{S}}(T(\mu_{\beta_j}, \mu_{k_j}))]. \quad (3)$$

Явный вид для операций T и S определяется с учетом свойств предметной области. Различные подходы описаны в [9].

III. Виды деформации графовой модели

Под деформацией графовой модели понимается последствие деструктивного воздействия на систему, при котором нарушаются ее функциональные возможности при работе в нормальных условиях [10].

Можно выделить три основных типа деструктивных воздействий:

1) выведение из строя или снижение функциональных возможностей одного или нескольких элементов системы;
2) полное или частичное нарушение взаимосвязей между некоторыми элементами;
3) деструктивное воздействие комбинированного типа.

Следствием деструктивных воздействий является изменение графовой модели системы:

$$\Gamma \to \Gamma' = (S, E, P', K'), \quad (4)$$

что, в конечном счете, влечет за собой снижение функциональных возможностей системы в целом.

Необходимо отметить, что для каждой системы существует критическое значение $F_{крит.}(\Gamma)$, при достижении которого система необратимо перестает выполнять функциональные возможности.

Рассмотрим более детально основные виды изменений графовой модели при определенных видах воздействий на систему.

Пусть имеется условный гиперграф G_1, который имеет вид, представленный на рис. 1 под номером 1.

При деструктивном воздействии первого типа, то есть при выведении из строя или частичного снижения функциональности одного или нескольких элементов системы, ее графовая модель может деформироваться следующим образом:

1) произойдет удаление вершины гиперграфа и перестроение его ребер (рис. 1, номер 2);
2) вместе с удалением вершины произойдет и удаление всех ребер гиперграфа, так как их перестроение будет невозможно или нецелесообразно (рис. 1, номер 3);
3) произойдет удаление вершины вместе с удалением некоторых ребер, однако вместе с этим произойдет и их перестроение, то есть произойдет комбинированное перестроение графовой модели (рис. 1, номер 4).

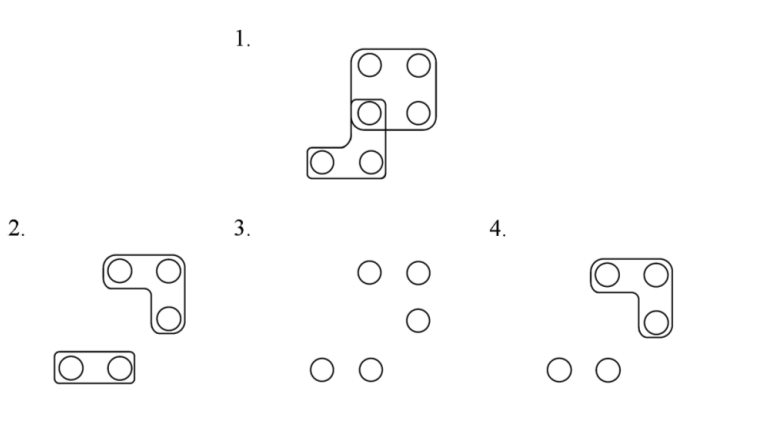


Рис. 1. Примеры деформации графовой модели (на примере графа G_1)

Для рассмотрения вариантов деформации графовой модели при деструктивном воздействии второго типа, а именно при полном или частичном нарушении взаимосвязей между элементами, возьмем условный гиперграф G_2, вид которого представлен на рис. 2 под номером 1.

В данном случае происходит перестроение ребер гиперграфа, которое в свою очередь может подразделяться на:

1) перестроение без пересечений новых ребер (рис. 2, номер 2 и 3).
2) перестроение с пересечениями новых ребер (рис. 2, номер 4).

Однако необходимо отметить, что в случае, изображенном на рис. 2 под номером 4, при таком виде перестроения эффективность работы системы будет ниже, чем первоначальная, несмотря на кажущееся преимущество при перестроении графовой модели системы.

При деструктивном воздействии комбинированного типа на систему возможна деформация графовой модели по любой вышеописанной схеме либо даже их комбинация.

IV. Оценка эффективности функционирования системы при деструктивном воздействии

При любом деструктивном воздействии на эргатическую систему возникает деформация графовой модели. Для каждой такой системы существует множество допустимых деструктивных воздействий:

$$D = \{D_1, D_2, ..., D_n\} . \quad (5)$$

При этом любая D_i ведет к деформации графовой модели. Однако возникает вопрос, каким образом определить наиболее существенное деструктивное воздействие на систему из общего множества, то есть вопрос упорядочивания D_i .

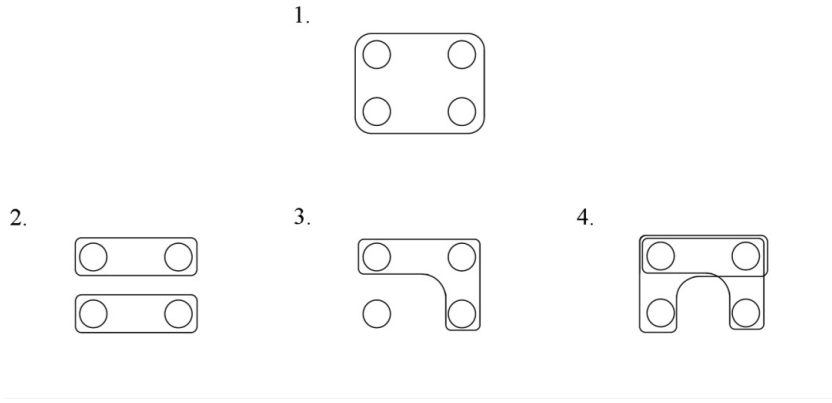


Рис. 2. Примеры деформации графовой модели (на примере графа G_2)

Деструктивное воздействие D_i вызывает деформацию графовой модели $F(\Gamma_{D_i})$, которая, так же как и $F(\Gamma)$, является нечеткой переменной, а следовательно, имеет функцию принадлежности $\mu_{F(\Gamma_{D_i})}$, которая и характеризует степень опасности деструктивного воздействия для системы.

Функцию принадлежности $\mu_{F(\Gamma_{D_i})}$ можно отобразить на координатной плоскости, что позволяет применить к ней наиболее распространенный в практике вычислений метод Center-of-Gravity (CoG) [11]. Его суть заключается в определении центра тяжести плоской фигуры путем определения статического момента непрерывно распределенной массы относительно X.

Значение $\bar{x}$ – центра тяжести плоской фигуры – в случае если носитель функции принадлежности является непрерывным множеством, вычисляется по формуле (6) [8]:

$$\bar{x} = \frac{\int\limits_{x \in X} x \bar{\mu}_{F(\Gamma_{D_i})}(x) dx}{\int\limits_{x \in X} \bar{\mu}_{F(\Gamma_{D_i})}(x) dx}, \qquad (6)$$

а если дискретным – по формуле (7):

$$\bar{x} = \frac{\sum\limits_{x_j \in X} x_j \bar{\mu}_{F(\Gamma_{D_j})}(x_j)}{\sum\limits_{x_j \in X} \bar{\mu}_{F(\Gamma_{D_j})}(x_j)}. \qquad (7)$$

Здесь $\int\limits_{x \in X} x \bar{\mu}_{F(\Gamma_{D_i})}(x) dx$ и $\sum\limits_{x_j \in X} x_j \bar{\mu}_{F(\Gamma_{D_j})}(x_j)$ являются статическим моментом плоской фигуры, соответствующей $F(\Gamma_{D_i})$, а $\int\limits_{x \in X} \bar{\mu}_{F(\Gamma_{D_i})}(x) dx$ и $\sum\limits_{x_j \in X} \bar{\mu}_{F(\Gamma_{D_j})}(x_j)$ – статическим моментом части этой плоской фигуры, ограниченной верхним значением $\bar{\mu}_{F(\Gamma_{D_i})}(x)$.

После нахождения координат центров тяжести фигур появляется возможность произвести их сортировку, что позволяет в свою очередь осуществлять упорядочение по опасности деструктивных воздействий из общего их множества D в интересах выбора наиболее целесообразных методов противодействия этим воздействиям.

V. Заключение

Необходимо отметить, что сортировка и упорядочение деструктивных воздействий из общего множества D влечет за собой определение класса наиболее опасных типов воздействий на систему и выявить ее наиболее уязвимые элементы. Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности безопасности системы.

Список литературы

[1] Малафеев, С. И. Надежность технических систем. Примеры и задачи [Электронный ресурс] / С. И. Малафеев, А. И. Копейкин. – Москва : Горная книга, 2012. – 299 с.

[2] Мухин, В. И. Исследование систем управления: Учебник для вузов / В. И. Мухин. – Москва : Издательство «Экзамен», 2003. – 384 с.

[3] Стекольников, Ю. И. Живучесть систем / Ю. И. Стекольников. – Санкт-Петербург : Политехника, 2002. – 155 с.

[4] Шишмарев, В. Ю. Надежность технических систем: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. Ю. Шишмарев. – Москва. : Издательский центр «Академия», 2010. – 304 с.

[5] Menshikh, V. V. Structural Parametric Modelling of an Information Analytical System / V. V. Menshikh, O. V. Pyankov. – Bulletin of the South Ural State University. Series «Mathematical modeling, Programming & Computer Software», 2016. – Vol. 9. – No. 1. – P. 105-113.

[6] Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Перевод с английского Р. Г. Вачнадзе / Т. Саати. – Москва: Радио и связь, 1993. – 278 с.

[7] Меньших, А. В. Модель и численный метод оптимизации выбора действий органов внутренних дел при возникновении чрезвычайных обстоятельств криминального характера / А. В. Меньших, В. В. Горлов. – Вестник Воронежского института МВД России, 2016. – № 2. – С. 213-221.

[8] Зак, Ю. А. Принятие решений в условиях нечетких и размытых данных: Fuzzy-технологии / Ю. А. Зак. – Москва. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 352 с.

[9] Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А. Н. Аверкин [и др.] – Москва. : Книга по Требованию, 2013. – 312 с.

[10] Men'shikh, V. V. Conflict Interactions in the Course of Synthesis of the Parameters of Control Actions in Multiple-Objective Control Systems / V. V. Men'shikh, V. V. Sysoev. – Automatic Control and Computer Sciences, 2002. – Vol. 36. – No. 6. – P. 29-32.

[11] Zimmermann, H.-J. Fuzzy Set Theory and Its Applications / H.-J. Zimmermann. – New York : Springer Science+Business Media, LLC, 2001 – 514 p.

Управление объектами с положительной обратной связью

Мышляев Л.П.
Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия
mail@nicsu.ru

Венгер К.Г.
ЗАО «Стройсервис»
г. Кемерово, Россия
k.venger@stroyservis.com

Грачев В.В.
Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия
vitaly.grachev@nicsu.ru

Циряпкина А.В.
Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия
asya1990_90@mail.ru

***Abstract* — The work is devoted to the study of control systems of objects with positive feedback (recycle). The classification of objects with different types of recycle was proposed: objects with recycling «by concentration», objects with recycling «by mass», objects with recycle «by parameters». The control algorithms of these types of objects with positive feedback were developed. The numerical studies of control systems of objects with positive feedback were conducted. Conclusions about the effectiveness of development were formulated.**

Ключевые слова — положительная обратная связь (рецикл), объекты с положительной обратной связью, объекты с рециклом, численные исследования, система управления, алгоритм управления, координатное управление, параметрическое управление.

I. Введение

Управлению объектами с положительной обратной связью (рециклом) уделяется все больше внимания, так как именно такие объекты в большей мере удовлетворяют современным технологическим, экологическим и экономическим требованиям [1-5]. Основная часть работ по этой тематике посвящена только построению систем регулирования одним классом объектов с рециклом – рециклом «по концентрации» по терминологии У. Рея – без детального анализа их эффективности [6-9]. Указанный вид положительной обратной связи (ПОС) не охватывает другие виды рециклов современных промышленных и социально-экономических объектов. В настоящем сообщении предложена классификация объектов с различными типами рециклов, представлена обобщенная структура алгоритма управления и результаты численного анализа разработанных систем управления.

II. Классификация объектов с положительной обратной связью (рециклом)

Математические модели объектов с рециклом в пространстве состояний в достаточно общем виде описываются выражениями [10]

$$\dot{X}(t) = A(t)\cdot X(t-\tau_x) + B(t)\cdot U(t-\tau_u) + C(t)\cdot W(t-\tau_w),$$
$$Y(t) = D(t)\cdot X(t-\tau_y) + F(t)\cdot E(t-\tau_e),$$

где X, U, W, Y, E – векторы состояний, управления, внешних воздействий, выходов и погрешностей измерений; $\tau_x, \tau_u, \tau_w, \tau_y, \tau_e$ – соответствующие времена запаздывания; $A(t), B(t), C(t), D(t), F(t)$ – матрицы соответствующих размерностей; t – непрерывное время.

Объекты с рециклом можно разделить на четыре типа.

1. Объекты с рециклом «по концентрации» [10], в которых в рецикле учитывается только концентрация (температура и т.д.) материала (рис. 1). В этом случае матрица $A(t)$ не зависит от состояния $X(t)$ и $D(t)=1$.

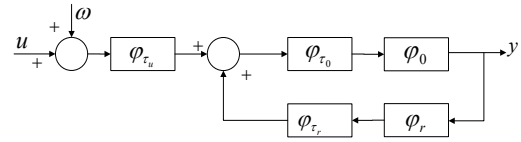


Рис. 1. Структура объекта с рециклом «по концентрации»

На рис. 1 обозначено w, y, u – возмущающее, выходное и входное воздействие; $\varphi_0, \varphi_\tau, \varphi_r$ – операторы возмущенного движения объекта без учета запаздывания, запаздывания и цепи рецикла; τ_0, τ_r, τ_u – время запаздывания в прямой цепи объекта, в цепи рецикла и в управлении.

2. Объекты с рециклом «по массе», когда за выходное воздействие принимается часть материала (готовой продукции), поступающей на выход объекта, а другая часть материала поступает в цепь рецикла (рис. 2). Соотношение этих частей может изменяться в зависимости от внешних условий, состояний, агрегатов и т.д. и, как правило, специально не контролируется. В этом случае матрица $A(t)$ зависит от состояния $X(t)$ и $D(t)\neq 1$.

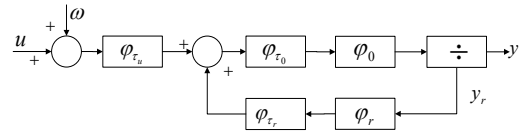


Рис. 2. Структура объекта с рециклом «по массе»

На рис. 2 блоком ÷ обозначен делитель, а y_r – масса материала рецикла.

3. Объекты, в которых рецикл влияет на параметры отдельных их составляющих – рецикл «по

Работа выполнена по Госзаданию Минобрнауки России N8.8611.2017/8.9

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

параметрам» (рис. 3). В этом случае матрицы $B(t)$ и $C(t)$ зависят от состояния $X(t)$.

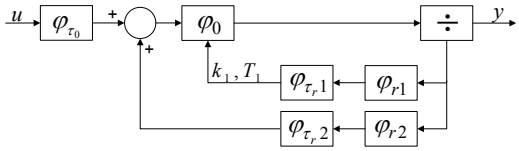


Рис. 3. Структура объекта с рециклом «по параметрам»

4. Комбинированные объекты с рециклом, объединяющие первые три класса (рис. 4).

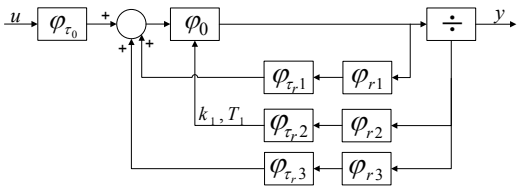


Рис. 4. Структура комбинированного объекта с рециклом

III. Структуры алгоритмов управления объектами с рециклом

Для выделенных видов объектов с рециклом разработаны структуры алгоритмов управления с оценкой состояния рециклов, модельной компенсацией нежелательных свойств рециклов и введением контуров координатного и параметрического управления. Обобщенная структура системы управления представлена на рис. 5 [11].

На рисунке 5 приняты следующие обозначения: f_{R1}, f_{R2} – первый и второй регулирующий блок; $f_Э$ – блок экстраполяции; $f_Ф$ – блок фильтрации; $f_И$ – интегратор; $f_{Комп}$ – компаратор; $\boxed{\varepsilon}$ – блок расчета модуля ошибки регулирования; $\boxed{\div}$ – делитель потока; $\boxed{X}$ – блок умножения; $\alpha^*, k_1^*, T_1^*, k_{p1}^*, Q^*$ – базовые значения параметров системы; a_1, a_2, b_1, b_2 – задаваемые константы, рассчитываемые исходя из параметров конкретного технологического объекта.

Из данной обобщенной структуры получены структуры систем для объектов с различными видами рециклов.

IV. Численные исследования систем управления объектами с рециклом

Сравнительное оценивание эффективности систем управления проведены для всех видов рециклов с самовыравниванием и без самовыравнивания в прямой цепи объекта систем с модельной компенсацией цепи рецикла и системами с типовыми законами регулирования.

По результатам оценивания точности регулирования сделаны выводы.

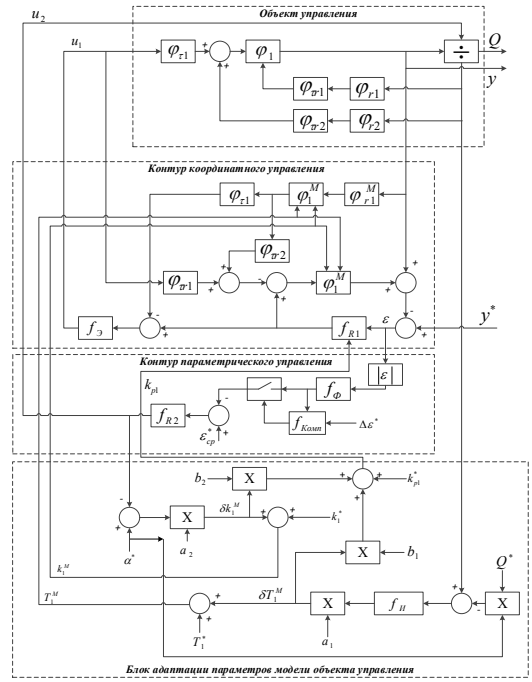


Рис. 5. Схема системы управления объектом с рециклом «по параметрам» с контурами координатного и параметрического управления

1) Для объектов с рециклом «по концентрации».

- Система управления с модельной компенсацией цепи рецикла для объекта без самовыравнивания в прямой цепи устойчива при отношении $\frac{\tau_r}{\tau_0} > 1{,}7$, в то время как система управления с типовым законом регулирования неустойчива при всех отношениях $\frac{\tau_r}{\tau_0}$.
- Для устойчивых систем во всем исследуемом диапазоне соотношений $\frac{\tau_r}{\tau_0}$ система управления с компенсацией контура рецикла превосходит по среднемодульному критерию систему управления с типовым законом регулирования не менее чем в 1,5 раза.

2) Для объектов с рециклом «по массе».

- При «массе» рецикла больше 0,65 система управления объектом с рециклом «по массе» неустойчива.
- Во всем устойчивом диапазоне при уменьшении «массы» рецикла, качество регулирования системы управления увеличивается.
- Система управления с модельной компенсацией цепи рецикла и система управления с типовым законом регулирования для объектов с рециклом

«по массе» устойчивы при любых соотношениях $\frac{\tau_r}{\tau_0} \in [1; 45]$.

- Во всем исследуемом диапазоне соотношений $\frac{\tau_r}{\tau_0}$ система управления с компенсацией контура рецикла превосходит систему управления с типовым законом регулирования по среднемодульному критерию не менее чем на 40 %, а по времени переходного процесса – не менее чем в 3 раза.

3) Для объектов с рециклом «по параметрам».

- Анализ системы с рециклом «по параметрам» проведен для трех вариантов функционирования системы.

Вариант 1. При работе системы задействован только контур координатного управления. Контур параметрического управления выключен и положение делителя потока не меняется, т.е. $\alpha(t) = \alpha^* = const$. Блок адаптации выключен и коэффициенты моделей канала преобразований координатных управляющих воздействий и первого регулирующего блока, используемые в контуре координатного управления, не корректируются.

Вариант 2. При работе системы задействованы как контур координатного управления, так и контур параметрического управления. Блок адаптации выключен и коэффициенты моделей канала преобразований координатных управляющих воздействий и первого регулирующего блока, используемые в контуре координатного управления, не корректируются.

Вариант 3. При работе системы задействованы контуры координатного управления и параметрического управления. В блоке адаптации выполняется корректировка текущих значений коэффициентов моделей канала преобразований координатных управляющих воздействий и первого регулирующего блока, используемые в контуре координатного управления, в соответствии с изменениями $Q_r(t)$ под влиянием изменений $\alpha(t)$.

Получены среднемодульные ошибки для этих трех вариантов и для системы с типовым законом регулирования (таблица I). Примеры переходных процессов представлены на рис. 6-7.

ТАБЛИЦА I. СОПОСТАВЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ СРЕДНЕМОДУЛЬНОЙ ОШИБКИ

Вариант структуры системы	**Среднемодульная ошибка регулирования, отн.ед.**	
	Внешнее воздействие по задающему входу	***Внешнее воздействие по возмущающему входу***
Вариант 1 (y_1)	5,04	5,94
Вариант 2 (y_2)	4,50	4,50
Вариант 3 (y_3)	4,06	4,07
Система управления с ПИ-регулятором	10,4	13,98

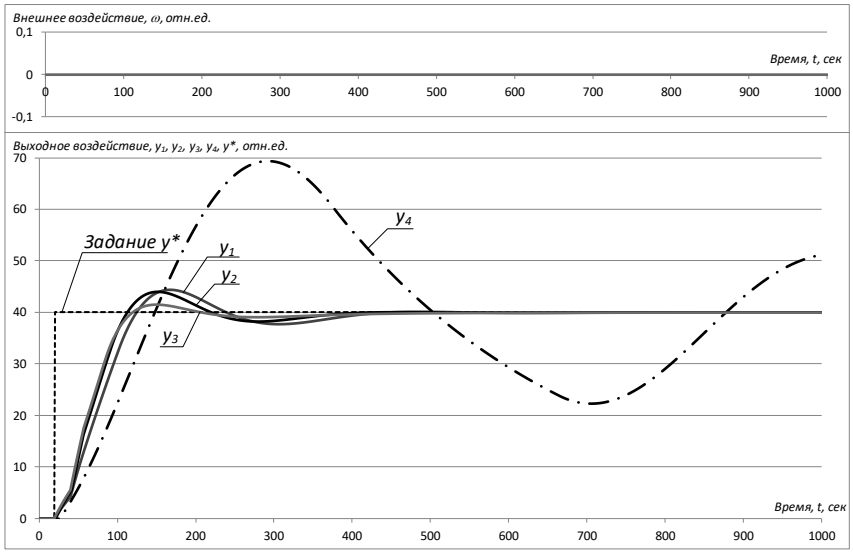


Рис. 6. Переходные процессы системы управления объектом с рециклом «по параметрам» при y^*=40

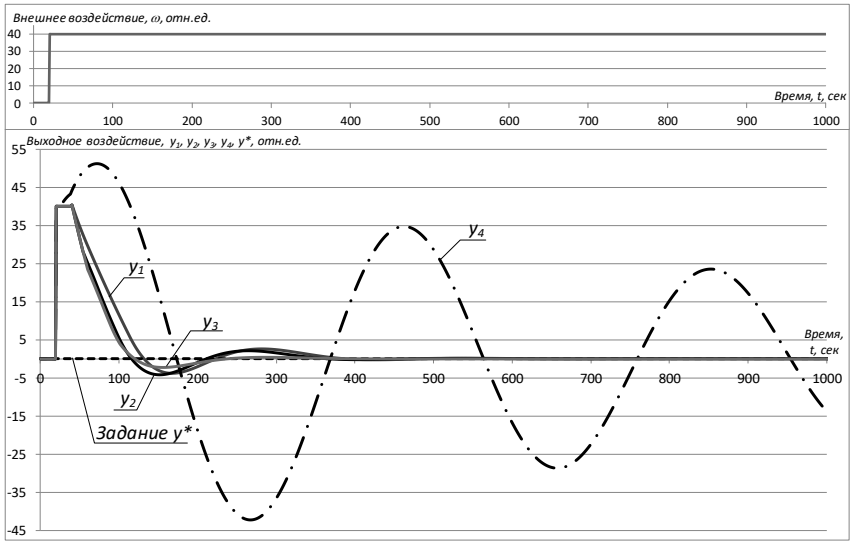


Рис. 7. Переходные процессы системы управления объектом с рециклом «по параметрам» при w =40

- Точность регулирования разработанных систем по сравнению с системой с ПИ-законом регулирования выше не менее чем в 2 раза.
- Введение контура параметрического управления повышает точность регулирования не менее чем на 25 %, а введение адаптации коэффициентов модели – еще на 10 %.

4) Для всех систем управления с модельной компенсацией рециклов.

- При вариации коэффициентов модели k, T, τ_0, τ_r в пределах 20 % от номинальных значений точность регулирования ухудшается не более чем на 40 %.

V. Заключение

Полученные результаты позволяют синтезировать структуры систем управления для объектов с различными видами рециклов, выбирать настроечные параметры алгоритмов управления и устанавливать требования к свойствам объектов управления.

Список литературы

[1] Утеуш Э.В. Управление измельчительными агрегатами / Э.В. Утеуш, З.В. Утеуш. - М.: Машиностроение, 1973. - 280 с.

[2] Хайниш С.В. Об оптимальном управлении объектами с замкнутым циклом // Сб. «Управление сложными системами». – М.: ИАТ, 1974. - с.42-55.

[3] Нагиев М.Ф. Теоретические основы рециркуляционных процессов в химии /М.Ф. Нагиев. - М.: Наука, 1962. - 332 с.

[4] Янушевский Р.Т. Управление объектами с запаздыванием / Р.Т. Янушевский. - М.: Наука, 1978. - 416 с.

[5] Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода: Монография в 3-х т. Т.2: Системы автоматизации производственного назначения / Л.П. Мышляев, А.А. Ивушкин, Г.П. Сазыкин и др.; Под ред. Л.П. Мышляева. - Новосибирск: Наука, 2006. - 483 с.

[6] Дылевский А.В., Лозгачев Г.И., Построение регулятора для объекта с распределенными параметрами по передаточной функции замкнутой системы // Вестник ВГУ. Серия: физика, математика, 2004. №2. - с.154-157.

[7] Дылевский А.В., Лозгачев Г.И., Малютина В.С. Синтез модального регулятора для объекта с распределенными параметрами // Вестник ВГУ. Серия: системный анализ и информационные технологии, 2007. №1. - с.128-132.

[8] Li Yi, Ko King-Tim, Chen Guanrong. A Smith predictor based PI-controller for active queue management / IEICE Transactions on communications. - Oxford University Press, 2005. Vol. E88-B, №11. - p.4293-4300.

[9] Еремин Е.Л., Лелянов Б.Н., Шеленок Е.А., Дискретные алгоритмы робастного управления нелийнейно-нестационарным объектом в периодических режимах // Вестник ТОГУ, 2010. №1(16). - с.45-54.

[10] Рей У. Методы управления технологическими процессами / У. Рей. - М .: Мир, 1983. - 368 с.

[11] Евразийский патент № 021192. Система регулирования объекта с рециклом / Мышляев Л.П., Ивушкин А.А., Венгер К.Г., Киселев С.Ф., Циряпкина А.В., Березин Д.Г., Чичиндаев М.Г., Барагичев К.Е. (RU); заявитель и патентообладатель Фед. гос. бюд. обр. учреждение высш. проф. образования Сибир. гос.индус. ун-т, ООО «Объединенная компания СИБШАХТОСТРОЙ».- № 201200846; заявл. 03.07.2012; опубл. 30.04.2015.

Системный анализ эффективности автоматического регулирования тепловой нагрузки жилых зданий в системах центрального теплоснабжения

Немченко В.И.
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
г. Самара, Российская Федерация
nemchenko_vi@mail.ru

Посашков М.В.
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
г. Самара, Российская Федерация
b111ik@mail.ru

***Abstract* — Methods for monitoring the heat supply and heat consumption systems using automated IHU (individual heat unit) data have been developed, the interaction of the quality control system and the quantitative control system at the IHP has been considered, a satisfactory agreement between the design and actual heat loads of the building during the regulation process has been revealed, and a method for the economic analysis of heat metering results has been.**

Ключевые слова — зависимая схема теплоснабжения, индивидуальный тепловой пункт (ИТП) здания, узел автоматического регулирования тепловой энергии, сбор и анализ, данных учета, мониторинг теплопотребления.)

I. Введение

Системы центрального теплоснабжения обеспечивают регулирование тепловой нагрузки абонентов на источнике теплоснабжения «качественным» или «количественным» способом. В тепловых сетях теплоэнергоцентралей (ТЭЦ) в основном применяется «качественный» способ диспетчерского регулирования. Показателем качества является значение температуры воды в подающем трубопроводе тепловых сетей. По ряду причин фактическое значение параметра отличается от утвержденного температурного графика. Что отрицательно сказывается на эффективности работы индивидуальных тепловых пунктов зданий (ИТП). Для устранения этого недостатка применяются локальные системы автоматического регулирования тепловой нагрузки зданий, которые используют «количественный» способ регулирования в зависимости от температуры наружного воздуха.

Одним из основных мероприятий по энергосбережению в системах теплоснабжения является установка автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов зданий (ИТП) [1, 2]. По мнению ряда авторов, применение комплекса мероприятий по автоматическому регулированию на ИТП позволяет снизить теплопотребление жилых зданий на 22-42%, а производственных и административных на 25-60% [3], а использование регулирования «пропусками» (релейное двухпозиционное регулирование) позволяет снизить теплопотребление жилого здания на 20–40% [4]. Представленные значения скорее всего являются значительно завышенными. Так теплотехнический анализ, проведенный в работе [5] показал, что даже для административного и производственного здания экономия тепловой энергии на может быть не более 6-7 %. Для жилого здания экономия будет еще меньше так как нельзя применять такие мероприятия как ночное снижение тепловой нагрузки в ночное время, а также в выходные и праздничные дни.

Цель работы системный анализ эффективности структуры управления тепловой нагрузкой жилого здания представленной последовательным соединением системы «качественного» регулирования источника теплоснабжения и автоматической системы «количественного» регулирования в ИТП здания.

II. Структура управления тепловой нагрузкой

Структура управления тепловой нагрузкой жилого здания представляет последовательное соединение системы качественного регулирования источника теплоснабжения и автоматической системы количественного регулирования в ИТП здания. Структурная схема регулирования тепловой нагрузки представлена на рис. 1.

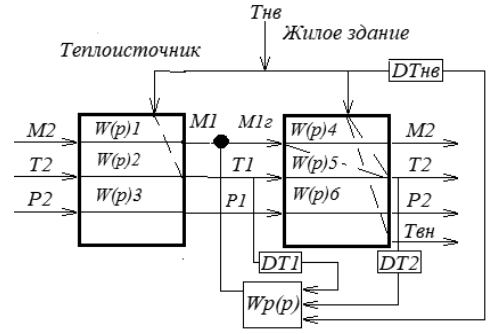


Рис. 1. Структурная схема регулирования тепловой нагрузки здания (обозначения в тексте)

Основной регулируемой величиной является внутренняя температура в здании *Твн* проектное значение которой для жилых и административных зданий принимается *Твн*=18ºС. Основным возмущающим воздействием является изменение температуры наружного воздуха *Тнв.*

Качественное управление на источнике тепловой снабжения заключается в изменении температуры в подающем трубопроводе *T1* в зависимости от

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

температуры наружного воздуха *Тнв* при постоянном проектном расходе сетевой воды *М1* в подающем трубопроводе. Тем самым обеспечивается регулирование тепловой нагрузки Q в зависимости от температуры наружного воздуха. Источник теплоснабжения представляет собой сложную взаимосвязанную систему регулирования в которой можно выделить три основных каналу регулирования с передаточными функциями *W(p)1 W(p)2, W(p)3.*

Канал *W(p)1* обеспечивает расход сетевой воды в подающем трубопроводе *М1* в зависимости от расхода воды в обратном трубопроводе *М2*. Канал *W(p)2* обеспечивает соответствие температуры в подающем трубопроводе *Т1* заданному температурному графику *Т1=f(Тнв)* при случайном изменении температуры наружного воздуха и температуры обратной сетевой воды *Т2*. Канал *W(p)3* обеспечивает заданное значение давления сетевой воды в подающем трубопроводе *Р1* при изменении давления в обратном трубопроводе *Т2.* Управление источником теплоснабжения сочетает диспетчерское ручное управление с локальными системами автоматического регулирования отдельных параметров. Система регулирования транспортом тепловой энергии в тепловых сетях не рассматривается.

Количественное регулирование тепловой нагрузки здания заключается изменении расхода сетевой воды в зависимости от температуры наружного воздуха *Тнв* и температур воды в подающем трубопроводе *Т1* и обратном трубопроводах *Т2*. Система количественного регулирования ИТП содержит три основных канала регулирования с передаточными функциями *W(p)4, W(p)5 и W(p)6.* Канал *W(p)4* обеспечивает расход греющей воды *М1г* в соответствии с температурным графиком отопления 95/70ºС и температурами *Тнв, Т1, Т2.* Канал *W(p)5* описывает температуру в обратном трубопроводе *Т2* в зависимости от теплопотребления здания. Канал *W(p)6* описывает давление в обратном трубопроводе *Р2* в зависимости от гидравлического режима здания.

На регулятор отопления *Wp(p)* поступают входные сигналы от датчика температуры наружного воздуха *DTнв* датчиков температуры прямой *DT1* и обратной сетевой воды *DT2.* Регулирующим воздействием является изменение расхода сетевой воды в подающем трубопроводе *М1г* с помощью регулирующего клапана установленного до точки смешения. Регулируемая величина - температура в обратном трубопроводе ИТП *Т2*.

III. Объект автоматического регулирования и мониторинг температур

Объектом автоматического регулирования и учета тепловой энергии и теплоносителя является жилое пятиэтажное здание г. о. Самара, по адресу ул. Красноармейская, 119, построенное в 1959 г. Здание имеет индивидуальный тепловой пункт (ИТП), имеет один тепловой ввод *Т1*, *Т2* (Ду 76 мм.) подключенный к транзитной двухтрубной тепловой магистрали (Ду 150 мм) от Привокзальная отопительная котельная (ПОК) ОПК «t плюс» филиал СамГРЭС. Схема теплоснабжения здания – зависимая. ГВС отсутствует.

Центральное качественное регулирование тепловой нагрузки на ПОК осуществляется по утвержденному температурному графику тепловой сети 135/70ºС со срезкой при 115°С, затем на ИТП происходит местное количественное регулирование по температурному графику 95/70ºС. Регулирование тепловой нагрузки осуществляется изменением расхода прямой сетевой воды поступающей к точке смешения. Регулирующий седельный клапан M1F-FD/VB-32 Ду25 установлен в подающем трубопроводе перед точкой смешения Управление клапаном отопления осуществляет одноконтурный регулятор отопления «Тритон-001» ООО НПФ «Тритон» г. Москва [6]. Регулирование перепада давления между подающим и обратным трубопроводами осуществляется регулятором перепада давления РП-32.10.1.1 Ду32 с настройкой 0,04- 0,16МПа установленном до регулирующего клапана подающем трубопроводе. На обратном трубопроводе из системы отопления до перемычки устанавливаются основной и резервный циркуляционные насосы Wilo-TOP-S 50/7. Режим работы - переключение между насосами каждые 24 часа, обеспечивается с помощью контроллера Тритон-040 [7].

При наладке системы автоматического регулирования системы отопления здания в базу данных вводятся: температурных график работ для местной системы отопления на основе рекомендаций СП 41-101-95 «Проектирование тепловых пунктов [8]; расчет настроек регулятора на основе идентифицированной передаточной функции объекта регулирования.

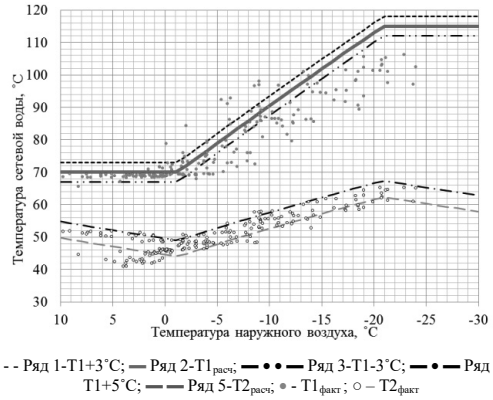


Рис. 2. Сравнение температурного графика качественного регулирования с фактическими значения температур

Сравнение действующего температурного графика качественного регулирования с фактическими значения температур представлено на рис. 2. Из рис. 2 видно, что при температурах наружного воздуха фактические температуры в подающем трубопроводе (*Т1*) значительно меньше проектных значений, что является «недотопом». Температура воды в обратном трубопроводе (*Т2*) в большинстве случаев соответствует нормативным значениям, что говорит об удовлетворительном состоянии внутренних систем теплопотребления.

Проведен мониторинг системы качественного регулирования теплоисточника по температуре в

подающем трубопроводе *T1* и температуре наружного воздуха *Тнв*, а также системы автоматического количественного регулирования в ИТП по температуре в обратном трубопроводе *T2* и температуре наружного воздуха *Тнв* по данным системы учета тепловой энергии [9]. Качество регулирования оценивалось по интегральным квадратичным критериям, которые для дискретных значений имеют вид:

$$\varepsilon 1 = \sqrt{min \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{n} \left(T1_i - T1_{факi}\right)^2}, \quad (1)$$

$$\varepsilon 2 = \sqrt{min \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{n} \left(T2_i - T2_{факi}\right)^2} \quad (2)$$

где $T1_i$, $T2_i$ - среднесуточная температура по температурному графику 135/70ºС; $T1_{факi}$. $T2_{факi}$ - фактическая среднесуточная температура; *n* – количество дней наблюдения.

Оценка отклонений фактической температуры от проектной по интегральным среднеквадратичным критериям представлена на рис.3. Видно, что для *T1* наибольшие отклонения от допустимых ± 3ºС наблюдались в декабре –марте, а для Т2 наибольшие отклонения ±5ºС отмечены в октябре и марте.

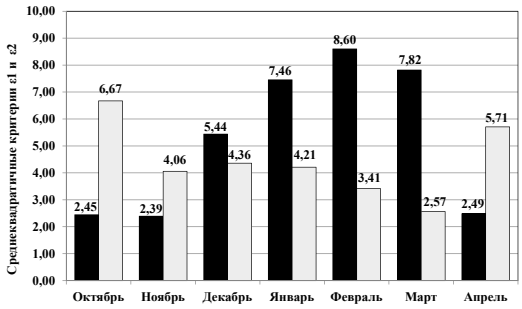


Рис. 3. Оценка отклонений фактической температуры от проектной по интегральным среднеквадратичным критериям: ■ – ε1; □ – ε2

IV. Мониторинг потребления тепловой энергии

Расчет приведенного к нормативным условиям $Q_{прив}$ фактического месячного теплопотребления проводился по формуле:

$$Q_{прив} = Q_{фак}\left(18 - t_{проект}\right)/\left(18 - t_{фак}\right) \quad (3)$$

где $Q_{фак}$ – фактическое месячное потребление тепла, Гкал/мес; $t_{проект}$ – проектная среднемесячная температура воздуха [10], ºС; $t_{фак}$ - фактическая среднемесячная температура воздуха [11], ºС.

Расчет нормативного месячного теплопотребления $Q_{проект}$ проводился по формуле для проектной часовой тепловая нагрузка $q_{проект} = 0{,}314$ Гкал/ч; *n* – количество дней в месяце

$$Q_{проект} = q_{проект}\left(18 - t_{проект}\right) \times 24 \times \frac{n}{\left(18 - (-30)\right)} \quad (4)$$

Годовое потребление тепла осуществлялось суммированием данных по месячному потреблению. Невязка годовых тепловых нагрузок проектных и фактических Δ определяется как

$$\Delta = Q_{прив} - Q_{проект} \quad (5)$$

В программной среде Microsoft Excel построены линии тренда фактической, проектной и приведенной тепловых нагрузок с линейной зависимостью от температуры наружного воздуха и получены следующие уравнеия регрессии для величины достоверности аппроксимации R^2:

- фактическая Гал/мес

$$Q_{фак} = -4{,}6103 t_{фак} + 80{,}138, \; R^2 = 0{,}9561 \quad (6)$$

- проектная Гкал/мес

$$Q_{проект} = -5{,}1454 t_{проект} + 80{,}793, \; R^2 = 0{,}9561 \quad (7)$$

- приведенная к проектным условиям Гкал/мес

$$Q_{прив} = -4{,}8038 t_{проект} + 79{,}251, \; R^2 = 0{,}9561 \quad (8)$$

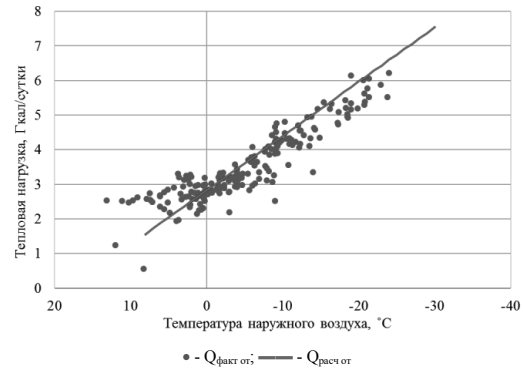


Рис. 4. Зависимость проектной Q и фактической Qф среднесуточных тепловых нагрузок от температуры наружного воздуха при количественном регулировании на ИТП

Фактическая часовая нагрузка здания приведенная к проектным условиям с учетом соотношения (6) при $n_{ср} = 30$ дней определяется как

$$q_{прив} = \frac{1}{24 n_{ср}} Q_{прив} =$$

$$= \frac{1}{24 \times 30}(-4{,}8038 \times (-30) + 79{,}251) = 0{,}3102 \text{ Гал/ч} (9)$$

Проектные, фактические и приведенные к нормативным условиям тепловые нагрузки здания с автоматизированным ИТП в отопительный сезон 2017-2018 гг. представлены в табл.

ТАБЛИЦА I. ПРОЕКТНЫЕ, ФАКТИЧЕСКИЕ И ПРИВЕДЕННЫЕ К НОРМАТИВНЫМ УСЛОВИЯМ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ ЗДАНИЯ.

Месяц, год	$Q_{фак}$, Гкал/мес	$Q_{прив}$, Гкал/мес	$Q_{проект}$, Гкал/мес	Δ, Гкал/мес
окт.17	51,89	56,831	58,4982	-1,6672
ноя.17	83,29	103,628	100,794	2,834
дек.17	111,83	130,784	134,3292	-3,5452
янв.18	135,63	151,501	153,311	-1,8095
фев.18	118,03	126,312	134,5176	-8,2056
мар.18	113,3	102,921	115,834	-12,913
апр.18	48,88	50,454	47,885	2,569
Всего	662,85	722,431	745,169	-22,738

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате системного анализа эффективности регулирования тепловой нагрузки здания следует, что годовое приведенное потребление тепла меньше нормативного на 22,738 Гкал/год, что составляет 3,04%. Значение фактической тепловой нагрузки здания 0,3102 Гкал/ч практически совпадает с проектным значением 0,314 Гкал/ч, что свидетельствует о нормальной работе системы автоматического количественного регулирования здания в сочетании с системой качественного регулирования нагрузки тепловой сети котельной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федер. закон Рос. Федерации от 23.11.2009 №261-ФЗ: // Рос. газ. – 2009. – 27 ноября..

[2] Р НП «АВОК» 3.3.1-2009 Рекомендации АВОК. Автоматизированные индивидуальные тепловые пункты в зданиях взамен центральных тепловых пунктов. Нормы проектирования. Режим доступа https://meganorm.ru/Data1/54/54675/index.htm, свободный.

[3] Ханианова В.Н. Анализ энергетической эффективности методов регулирования температуры в помещениях [Электронный ресурс] // Вестник Казанского технологического университета, 2014. С. 154 – 158. Режим доступа https://cyberleninka.ru/article/v/analiz-energeticheskoy-effektivnosti-metodov-regulirovaniya-temperatury-v-pomescheniyah, свободный.

[4] Разоренов Р.Н. Регулирование теплопотребления в малоэтажных зданиях существующей застройки // Энергосбережение, №8, 2017. С. 40 – 45.

[5] Немченко В.И. Применение приборов автоматического регулирования в системах коммунального теплоснабжения // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». Выпуск №13. – Самара, СамГТУ, 2001. С. 163-169.

[6] Регулятор для систем отопления «Тритон-001», руководство по эксплуатации. Россия, М.: .15 с.: [Электронный ресурс] - http://www.triton-pf.ru.

[7] Блок управления группой циркуляционных насосов «Тритон-040», руководство по эксплуатации. Россия, М.: 10 с: :[Электронный ресурс] -http://www.triton-pf.ru

[8] СППС СП41-101-95 Проектирование тепловых пунктов. М.:1997

[9] Методика осуществления коммерческого учета тепловой энергии, теплоносителя / Зарегистрирована в Минюсте России 12.09.г. №3440

[10] СП 131.13330.2012 СНиП 23-01-99 «Строительная климатология».

[11] Погода и климат. [Электронный ресурс] Режим доступа http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id, свободный.

Определение углового положения космического аппарата, основанное на решении обратных задач теплообмена

Ненарокомов А.В.
МАИ
Москва, РФ
nenar@mai.ru

Чебаков Е.В.
МАИ
Москва, РФ
ChebakovEvgeny@yandex.ru

Крайнова И.В.
МАИ
Москва РФ
igrid@mail.ru

Ревизников Д.Л.
МАИ
Москва, РФ
reviznikov@inbox.ru

Будник С.А.
МАИ
Москва, РФ
sbudnik@mail.ru

***Abstract* — An analysis of the possibility of developing a system of a spacecraft orientation for determining the angular position based on heat flux measurements, that incidents at the structure elements of various orientations is a subject of the present study.**

Ключевые слова — система ориентации, обратные задачи теплопроводности, космический аппарат, тепловые потоки.

I. Введение

Разработка космического аппарата (КА) является трудоемким и длительным процессом, и одну из основных задач при проектировании занимает система ориентации, без которой невозможно успешное выполнение миссии. Существует несколько подходов по проектированию систем ориентации и один из них — это определение углового пространственного положения КА, которое основано на определении внешних тепловых потоков. К сожалению, в большинстве практических случаев прямое измерение тепловых потоков невозможно, и единственным решением для преодоления этой ситуации является непрямое измерение, сформулированное как метод обратных задач.

Задача угловой ориентации КА на основе анализа внешних тепловых потоков требует решения двух обратных задач. Первая – это оценка тепловых потоков, подводимые к поверхности КА. Вторая – определение значений углов ориентации КА по определенным значениям тепловых потоков.

В данной работе рассматривается решение второй обратной задачи.

II. Определение углового положение космического аппарата в космическом пространстве

В общем случае ориентация элемента поверхности КА определяется девятью углами.

1) Три угла, определяющие текущее положение аппарата на орбите и угловое положение орбиты в планетоцентрической экваториальной системе координат *XYZ* (см. рис. 1): Ω – долгота восходящего узла, i – наклонение орбиты, u – аргумент широты. Эти углы известны из программы полета КА.

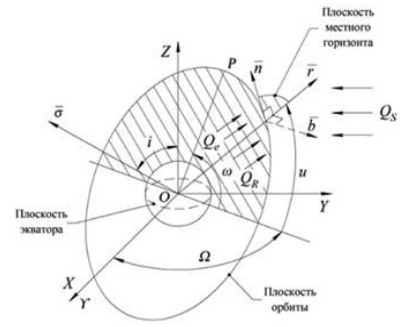


Рис. 1. Планетоцентрическая экваториальная и орбитальная системы координат

2) Три угла α_N , β_N и γ_N , определяющие положение элемента поверхности КА в связанной с аппаратом системе координат, которые задают направление вектора нормали (см. рис. 2).

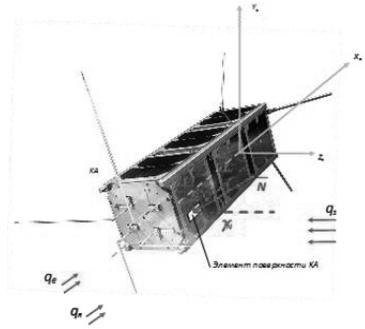


Рис. 2. Связанная с аппаратом система координат.

3) Три угла в орбитальной системе координат, которые задают ориентацию КА: ϑ – угол тангажа, ψ – угол рыскания, γ – угол крена (см. рис. 3).

Работа выполнялась в рамках проекта РНФ №16-19-10696.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

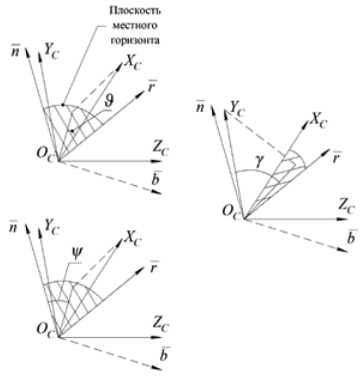


Рис. 3. Относительное положение связанной и орбитальной систем координат

Для определения координат вектора $\overline{N}$ используется матрица перехода от связанной с аппаратом системе координат к орбитальной (рис. 3).

Таким образом, можно определить ориентацию исследуемого элемента в пространстве, используя девять указанных углов. Также, чтобы определить положение аппарата, необходимо знать параметры орбиты КА, которые известны из программы полета.

III. Геометрическая обратная задача радиационного теплообмена

Ориентация КА определяется тремя углами: ϑ (угол тангажа), ψ (угол рыскания) и γ (угол крена). Если на поверхности КА установить несколько датчиков радиационного теплового потока, то можно сформулировать геометрическую обратную задачу радиационного теплообмена: определить три неизвестных угла ϑ, ψ и γ из, в общем случае, девяти углов, которые характеризуют ориентацию аппарата, по непрямым измерениям радиационного теплового потока поглощенного датчиками. Математическую модель для рассматриваемой обратной задачи можно сформулировать как (в случае, когда все датчики имеют одинаковые радиационные свойства):

$$\begin{cases} q_{\Sigma 1}(\vartheta,\psi,\gamma) = A_S q_{S1}(\vartheta,\psi,\gamma) + A_S q_{R1}(\vartheta,\psi,\gamma) + \varepsilon q_{e1}(\vartheta,\psi,\gamma); \\ q_{\Sigma 2}(\vartheta,\psi,\gamma) = A_S q_{S2}(\vartheta,\psi,\gamma) + A_S q_{R2}(\vartheta,\psi,\gamma) + \varepsilon q_{e2}(\vartheta,\psi,\gamma); \\ \ldots \\ q_{\Sigma m}(\vartheta,\psi,\gamma) = A_S q_{Sm}(\vartheta,\psi,\gamma) + A_S q_{Rm}(\vartheta,\psi,\gamma) + \varepsilon q_{em}(\vartheta,\psi,\gamma), \end{cases} \quad (1)$$

где $q_{\Sigma m}$ – интегральный тепловой поток, поглощенный m-ым датчиком, q_{Sm} – поток солнечного излучения, падающий на m-ую поверхность КА, q_{Rm} – поток отраженного от планеты солнечного излучения, падающий на m-ую поверхность КА, q_{em} – поток собственного излучения планеты, падающий на m-ую поверхность КА, A_S – коэффициент поглощения, ε – степень черноты.

Тепловые потоки q_{Sm}, q_{Rm} и q_{em}, падающие на элементы поверхности КА в системе Солнце-КА-планета, целесообразно определять с помощью аналитических выражений, представленных в работах [6].

Тогда обратную задачу можно сформулировать как решение следующего равенства:

$$q_m^{изм} \cong q_{\Sigma m}(\vartheta,\psi,\gamma) \quad \text{при} \quad m = 1...M. \quad (2)$$

Аналитическое решение системы уравнений (1) не представляется возможным по причине ее нелинейности и сложной трансцендентной формы. Поэтому эту задачу следует решать численно. Искомый вектор состояния может быть найден методом наименьших квадратов и тогда можно составить функционал:

$$J_{\min} = \sum_{m=1}^{M} (q_{\Sigma m}(\vartheta,\psi,\gamma) - q_m^{изм})^2. \quad (3)$$

Необходимым условием минимума функционала (3) является равенство нулю его частных производных. Тогда (3) сводиться к решению системы уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial J}{\partial \vartheta} = 0; \\ \dfrac{\partial J}{\partial \psi} = 0; . \\ \dfrac{\partial J}{\partial \gamma} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Систему (4) можно переписать, если продифференцировать (3) по углам ϑ, ψ и γ:

$$\begin{cases} 2\sum_{m=1}^{M} (q_{\Sigma m}(\vartheta,\psi,\gamma) - q_m^{изм}) \dfrac{\partial q_{\Sigma m}}{\partial \vartheta} = 0; \\ 2\sum_{m=1}^{M} (q_{\Sigma m}(\vartheta,\psi,\gamma) - q_m^{изм}) \dfrac{\partial q_{\Sigma m}}{\partial \psi} = 0; . \\ 2\sum_{m=1}^{M} (q_{\Sigma m}(\vartheta,\psi,\gamma) - q_m^{изм}) \dfrac{\partial q_{\Sigma m}}{\partial \gamma} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где частные производные могут быть вычислены как:

$$\frac{\partial q_{\Sigma m}}{\partial \vartheta} = A_S \frac{\partial q_{Sm}}{\partial \vartheta} + A_S \frac{\partial q_{Rm}}{\partial \vartheta} + \varepsilon \frac{\partial q_{em}}{\partial \vartheta}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial q_{\Sigma m}}{\partial \psi} = A_S \frac{\partial q_{Sm}}{\partial \psi} + A_S \frac{\partial q_{Rm}}{\partial \psi} + \varepsilon \frac{\partial q_{em}}{\partial \psi}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial q_{\Sigma m}}{\partial \gamma} = A_S \frac{\partial q_{Sm}}{\partial \gamma} + A_S \frac{\partial q_{Rm}}{\partial \gamma} + \varepsilon \frac{\partial q_{em}}{\partial \gamma}. \quad (8)$$

Решение обратной задачи проводилось методом сопряженных направлений (градиентов), который состоит в построении следующей последовательности:

$$\xi^{(k+1)} = \xi^{(k)} - \alpha_k p^{(k)}, \qquad (9)$$

где $\xi = (\vartheta, \psi, \gamma)$ – вектор состояния, k – номер итерации, $p^{(k)}$ – направление спуска для k-ой итерации:

$$p^{(k)} = \text{grad } J(\xi^{(k)}) + \beta_k p^{(k-1)}, \qquad (10)$$

где β_k – коэффициент определяющийся следующим образом:

$$\beta_k = \frac{|\text{grad } J(\xi^{(k)})|^2}{|\text{grad } J(\xi^{(k-1)})|^2} = \frac{\sum_{i=1}^{3}\left[\frac{\partial J(\xi^{(k)})}{\partial \xi_i}\right]^2}{\sum_{i=1}^{3}\left[\frac{\partial J(\xi^{(k-1)})}{\partial \xi_i}\right]^2}. \qquad (11)$$

Причем начальное значение направления спуска при $k = 0$:

$$p^{(0)} = \text{grad } J(\xi^{(0)}). \qquad (12)$$

Окончание процесса метода сопряженным направлений устанавливается по близости к нулю:

$$\left|\text{grad } J(\xi^{(k)})\right| = \left\{\sum_{i=1}^{3}\left[\frac{\partial J(\xi^{(k)})}{\partial \xi_i}\right]^2\right\}^{1/2} \le \varepsilon, \qquad (13)$$

где ε – погрешность измерения (заданная точность).

Для того чтобы запустить алгоритм оптимизации с помощью метода сопряженных направлений необходимо задать начальное приближение неизвестных углов ϑ_0, ψ_0 и γ_0, которые выбираются произвольно.

Определение экстремума с помощью метода сопряженных направлений путем установки начальных приближений не приводит к требуемым результатам по причине того, что функционал имеет несколько экстремумов (см. рис. 4 – 6). На рисунках 4 – 6 видно, что экстремумы хорошо отделены друг от друга, и при этом метод локальной оптимизации быстро сходится (см. рис. 7 – 10). Поэтому для поиска глобального экстремума будем использовать метод случайных рестартов.

Метод случайных рестартов состоит из следующей последовательности: во-первых, генерируются три случайных равномерно распределенных на отрезке $[0, 360]$ числа. Данные три сгенерированных числа задаются как начальное приближение неизвестных углов ϑ_0, ψ_0 и γ_0. Во-вторых, используя полученное начальное приближение запускается метод сопряженных направлений для определения локального экстремума и значения функционала. Повторяя предыдущие шаги j раз по определению локального экстремума и значения функционала получаем следующий вектор параметров:

$$\begin{pmatrix} \vartheta_1 & \psi_1 & \gamma_1 & J_1 \\ \vartheta_2 & \psi_2 & \gamma_2 & J_2 \\ \dots & & & \\ \vartheta_j & \psi_j & \gamma_j & J_j \end{pmatrix}. \qquad (14)$$

где j – количество повторений (рестартов).

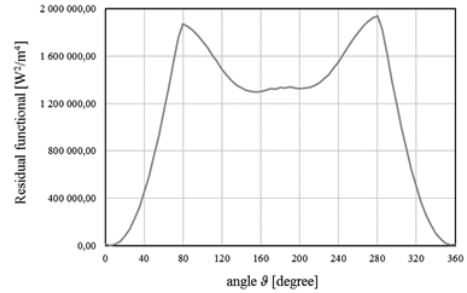


Рис. 4. Сечение функционала по углу ϑ при $\psi = 70°$, $\gamma = 20°$.

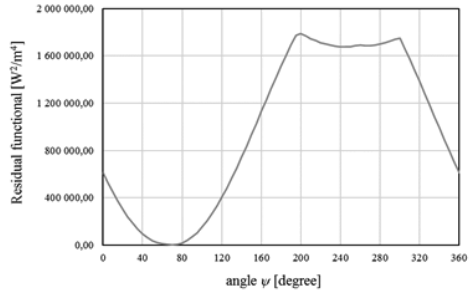


Рис. 5. Сечение функционала по углу ψ при $\vartheta = 5°$, $\gamma = 20°$.

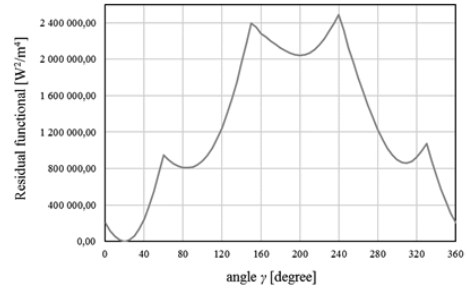
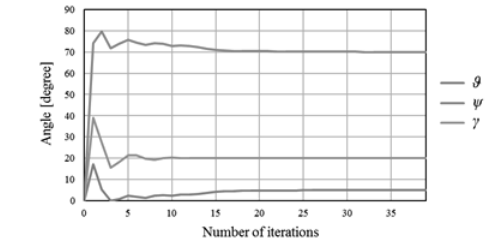


Рис. 6. Сечение функционала по углу γ при $\vartheta = 5°$, $\psi = 70°$.



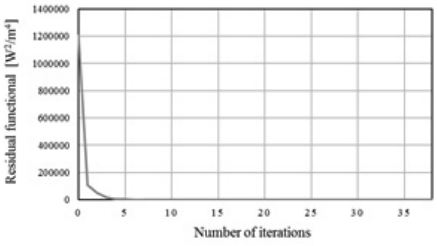
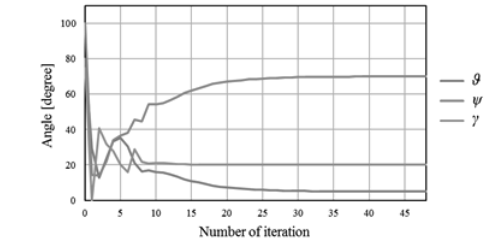


Рис. 7. Решение обратной задачи при точных значениях углов $\vartheta = 5°$, $\psi = 70°$, $\gamma = 20°$. Начальное приближение для итерационного метода градиентной минимизации задавались следующие: $\vartheta_0 = 0°$, $\psi_0 = 0°$, $\gamma_0 = 0°$.



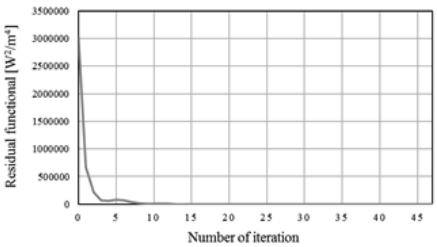
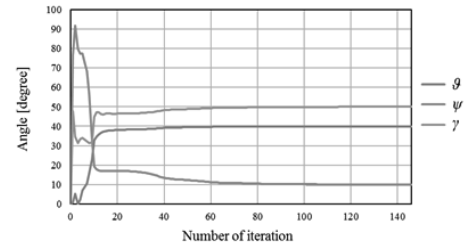


Рис. 8. Решение обратной задачи при точных значениях углов $\vartheta = 5°$, $\psi = 70°$, $\gamma = 20°$. Начальное приближение для итерационного метода градиентной минимизации задавались следующие: $\vartheta_0 = 80°$, $\psi_0 = 100°$, $\gamma_0 = 75°$.



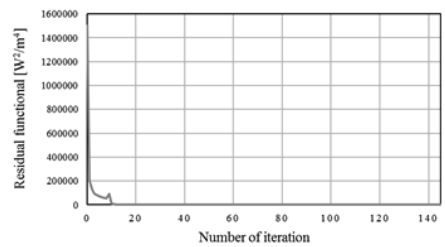
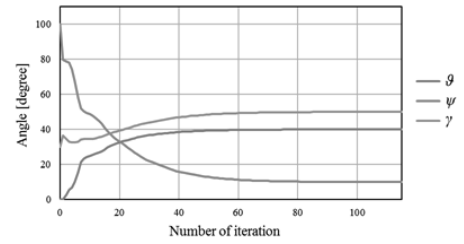


Рис. 9. Решение обратной задачи при точных значениях углов $\vartheta = 40°$, $\psi = 10°$, $\gamma = 50°$. Начальное приближение для итерационного метода градиентной минимизации задавались следующие: $\vartheta_0 = 0°$, $\psi_0 = 0°$, $\gamma_0 = 0°$.



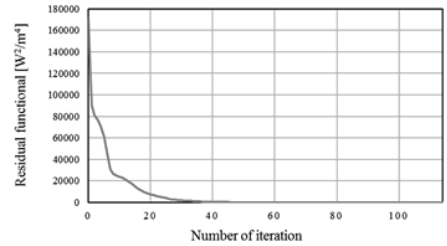


Рис. 10. Решение обратной задачи при точных значениях углов $\vartheta = 40°$, $\psi = 10°$, $\gamma = 50°$. Начальное приближение для итерационного метода градиентной минимизации задавались следующие: $\vartheta_0 = 0°$, $\psi_0 = 100°$, $\gamma_0 = 30°$.

Количество рестартов подбирается экспериментально. Для обеспечения нахождения глобального экстремума в нашем случае было выбрано 1000 рестартов.

По окончанию процесса из всех результатов локальной оптимизации выбирается вектор параметров (ϑ,ψ,γ) , при котором оптимизируемая функция принимает наименьшее значения, которая в свою очередь согласуется с погрешностью измерения ε метода сопряженных направлений.

IV. Вычислительный эксперимент

Проверка алгоритма по определению углового пространственного положения КА была выполнена численным моделированием. Для численного моделирования был выбран малый космический аппарат с простейшей геометрической формой стандарта CubSat (см. рис. 2), на каждый элемент поверхности которого установлены датчики радиационного теплового потока.

Численное моделирование состоит из двух этапов. Первый – это решение прямой термобаллистической задачи по определению внешних тепловых потоков q_{Sm}, q_{Rm}, q_{em}, падающих на датчики системы ориентации КА при заданных параметрах орбиты, угловом положении датчиков и углов ориентации КА на орбите (ϑ , ψ и γ). Рассчитанные значения тепловых потоков использовались для моделирования $q_m^{изм}$, а затем значения $q_m^{изм}$ использовались для второго этапа – решение обратной задачи.

Расчет проводился при следующих исходных данный, которые известны из программы полета КА: $\Omega = 30°$, $i = 20°$, $u = 0°$, $H_{орб} = 500$ км.

Некоторые результаты моделирования по решению обратной задачи представлены на рис. 7 – 10.

V. Заключение

В работе проведено численное моделирование по восстановлению угловой ориентации малого космического аппарата стандарта CubeSat с помощью методологии обратных задач теплообмена.

Полученные результаты моделирования хорошо согласуются с имитируемыми тепловыми измерениями в условиях космического полета. Данный метод позволяет рекомендовать предлагаемый подход для инженерных оценок ориентации малых спутников в качестве основной или резервной системы. Результаты численного моделирования показывают достаточную численную эффективность предложенного алгоритма.

Список литературы

[1] Константинов М.С., Каменков Е.Ф. и др. Механика космического полета, ред. Мишина В.П. М.: Машиностроение. 1989. 408 с.

[2] Козлов Л.В., Нусинов М.Д. и др. Моделирование тепловых режимов космических аппаратов, ред. Петрова Г.И. М.: Машиностроение. 1971. 382 с.

[3] Малоземов В.В., Рожнов В.Ф., Праветский В.Н. Системы жизнеобеспечения экипажей летательных аппаратов. М.: Машиностроение. 1986. 584 с.

[4] Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач // М.: Наука, 1979, с. 288.

[5] Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена // М.: Машиностроение, 1988, с. 280.

[6] Грицевич (Крайнова) И.В., Ненарокомов А.В. Определение внешнего теплового воздействия на поверхность орбитального космического аппарата // Тепловые процессы в технике, М.: Наука и технологии, 2013, Т. 5, № 10, с. 445-457.

Моделирование теплового потока в измерительной ячейке дифференциального сканирующего калориметра как объекта управления с распределенными параметрами

Нечаев А.С.
ФГБОУ ВО СамГТУ
г. Самара, Российская Федерация
nechaev-as@mail.ru

Мощенский Ю.В.
ФГБОУ ВО СамГТУ
г. Самара, Российская Федерация
rtu@samgtu.ru

***Abstract*—Modern differential scanning calorimeter (DSC) is a complex information-measuring system used to obtain different temperature and thermal characteristics of the investigated substances. The main subsystem of DSC is a heat block including heaters, measuring cells and heat conducting elements. In the thermal block measuring cells are often located symmetrically relative to the center, however, the heat flow coming from the main heater acts on them unevenly. With different overall parameters of the reference and the test substances, the effect of uneven heating of the cells leads to an increase in the measurement error. Since the determination of thermal characteristics of materials using DSC is carried out in a dynamic mode, when processing the data it is necessary to take into account not only the dependence of the parameters of the measuring cell on time, but also the spatial distribution of the external thermal impact affecting it. In this paper we construct a mathematical model of the measuring cell DSC as a block with a distributed input and concentrated output effect. The model takes into account the uneven spatial distribution of the thermal field in the thermal block, as well as heat removal from the substrate through the sensing elements, which were considered as inertial links. On the basis of the mathematical model of the measurement cell was constructed of a structural model system control the heat flux in a heat block DSK, which, in addition to the basic elements and their relationships, reflects the influence of radiative heat transfer on the formation of the heat flux reaching to the measuring cell and the formation of additional heat from microaggregates and its influence on the measuring cell. After a number of experiments, a computer model of the automatic heat flow control system in the measuring cell of the differential scanning calorimeter DSK-500 was built as a control object with distributed parameters. This model serves as the basis for numerical experiments required to adjust the parameters of the regulators of the main and additional heaters in the thermal block of the DSC at different modes of use of this information-measuring system.**

Ключевые слова —моделирование, распределенные параметры, тепловой поток, измерение, дифференциальная температура, калориметр

I. Введение

Тепловой блок дифференциального сканирующего калориметра(ДСК) представляет собой конструкцию, содержащую нагревательные, теплоизоляционные и измерительные элементы. В зависимости от особенностей проведения эксперимента, разрабатываются различные конструкции данного блока. Разнообразные варианты исполнения и описания функционирования тепловых блоков калориметров нашли отражение в многочисленных научных трудах и патентных исследованиях, например [1-5].

Ряд работ [4,6-8], указывают на то, что разработки в области приборостроения измерительных блоков устройств для задач дифференциального термического анализа направлены на решение специализированных задач в различных отраслях науки и промышленности. Унификация подобных систем приводит либо к существенному усложнению конструкций, либо к потере точности измерений тепловых и температурных отдельных классов веществ. Первый путь приводит к существенному удорожанию разрабатываемых устройств, пренебрежение вторым условием приводит к потере фундаментального требования, закладываемого при создании любой измерительной системы.

При получении физико-химических параметров веществ с помощью ДСК существует необходимость, когда исследователю следует контролировать и изменять состояние измерительной системы. В других случаях возникает круг задач, где следует поддерживать физические параметры измерительного блока при условии влияния на него некоторых стохастических возмущений. Есть задачи, в которых важным условием проведения эксперимента является соблюдение точных законов изменения воздействий на объект изучения. Выполнение этих потребностей позволяет осуществить блок управления, представляющий собой программно-аппаратный комплекс. Создание такого комплекса является актуальной и весьма нетривиальной инженерной задачей, поскольку для ее решения должен быть учтен внушительный объем параметров, характеризующих особенности теплового блока, изменения окружающей среды, особенности преобразователей сигналов (инерционность, нелинейность и т.п.), включая преобразователи, работающие по программно заданному методу, и многих других, принимая во внимание взаимосвязь между отдельными элементами блока.

Алгоритм программной части ДСК должен быть основан на качественной математической модели процессов, проходящих в тепловом блоке. Данные процессы представляются совокупностью различных пространственно разнесенных воздействий и откликов на них отдельных узлов блока. Создание математической модели теплового потока, позволяющей стать основой для решения задачи управления процессами в тепловом блоке, является основной целью данной работы.

Работа проводилась при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-01103 а.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

II. Методы исследования

Для аналитического способа уменьшения погрешности измерений и повышения качества регулирования температурными параметрами системы, функции, характеризующие изменение теплового потока должны представлять собой математические модели, учитывающие особенности распространения тепла втепловом блоке ДСК. К таким особенностям можно отнести наличие лучистого теплообмена, неравномерное пространственное распределение теплового поля в тепловом блоке, а также отвод тепла от подложки через чувствительные элементы.

Наличие лучистого теплообменав тепловом блоке ДСК может быть учтено путем введения в модель коэффициента теплопроводности вместо температуропроводности, выраженного полиномиальной зависимостьюседьмого порядка от температуры [9]. Коэффициенты данного полинома определяются из анализа ряда экспериментов для каждого отдельного теплового блока без наличия в нем газовых взвесей.

Конвективным переносом тепла в блоке можно пренебречь, поскольку его внутренний объем весьма мал и представляет собой замкнутое пространство, где нагрев осуществляется вертикальными стенками [9-11]. Таким образом, процесс распространения тепла в блоке ДСК можно рассматривать как модель теплопроводности в твердом теле.

На рис. 1 схематично показана рабочая область теплового блока, имеющего основной внешний нагревательный элемент 1, металлическую подложку 2, по которой тепловой поток передается от нагревателя к измерительным ячейкам 3. В центре измерительной ячейке расположен температурный датчик 4, в роли которого чаще всего используется термопара.

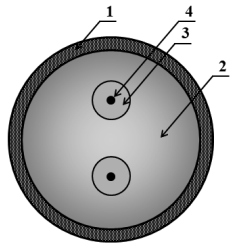


Рис. 1. Схема рабочей области теплового блока

Изменение тепловыхпоказателей в измерительной ячейке зависит от теплового потока, генерируемого нагревательным элементом, воздействий на металлическую подложку, начальных условий проведения эксперимента, размеров подложки и теплофизических свойств материала из которого она изготовлена.

Для уменьшения погрешности измерения, в частностидинамической погрешности, существуют конструкции тепловых блоков, включающие в себя дополнительный микронагреватель одной из ячеек, для отработки инерционности температурных датчиков [12,13]. Такое изменение конструкции ведет к усложнению задачи регулирования тепловых характеристик блока, поскольку система становится многоконтурной. Однако данное усложнение оправдано при верной настройке режимов работы контуров.

Решение задачиуменьшения погрешности измерений и повышения качества регулирования температурными параметрами системы предлагается осуществить с помощью математического моделирования теплового потока в измерительной ячейке термоблока ДСК с учетом пространственной распространенности его параметров. Полученную математическую модель необходимо представить в виде удобном для компьютерного моделирования, что позволит провести численные эксперименты и настроить многоконтурную систему, включающую дополнительный микронагреватель.

III. Моделирование и имитационный подход

A. Структурное представление теплового блока ДСК

Создание модели теплового потока в тепловом блоке ДСК следует начать с построения структурной схемы этого блока. Это даст возможность указать входные и выходные сигналы, влияющие на распространение тепла. Данная схема приведена на рис. 2.

На схемеобозначены: T – температура, переданная измерительной ячейке подложкой (П); T(R) – температура,генерируемая внешнего нагревателя (ВН)и поступающая на внешнюю границу подложки печи;$T_{обр}$ – температура образца исследуемого вещества; ΔT – дифференциальная температура на выходе теплового блока; ΔT_1 – суммарная температура, создаваемая тепловым потоком с внешнего нагревателя, проходящего через подложку и микронагревателя (МН), идущая на ячейку с эталонным веществом; $T_{эт}$ – температура ячейки с эталонным веществом;$T_{мн}$ – температура микронагревателя, $U_{\Delta T}$ – напряжение от датчика температуры, усиленного блоком «УС», $U_{вн}$ – напряжение, поступающее к внешнему нагревателю от блока усилителя мощности ($УМ_1$), $U_{мн}$ – напряжение, поступающее кмикронагревателю от усилителя мощности ($УМ_2$), x_1, x_2 – входные задающие сигналы для регуляторов внешнего (Рег-p_1) и микро- (Рег-p_2) нагревателей, $E_{п1}$ и $E_{п2}$ – напряжение питания основного внешнего нагревателя и микронагревателя соответственно.

Внешний нагреватель представляет собой элемент сопротивления, генерирующий тепловой поток при подаче на него электрического сигнала определенной мощности. В контексте поставленной задачи он представляет собой объект управления с сосредоточенным входным воздействием и распределенным выходнымсигналом. Выходной параметр основного нагревателя представляет собой изменение температуры на внешней границе подложки, имеющей форму круглой пластины определенного радиуса. Тепловой поток, формируемый на границе подложки, распространяется к ее центру.

Измерительные ячейки чаще всего находятся симметрично друг друга относительно центра, как показано на рис. 1, что дает право говорить об одинаковом интегральном тепловом потоке, действующем на них. Однако, рассматривая каждую ячейку в отдельности, стоит отметить, что на вещество, находящееся на ней тепловой поток действует не равномерно, а там сильнее, где граница ячейки ближе к основному нагревателю. При решении задачи моделирования это не представляется реальным учесть, поскольку при исследовании новых веществ протекание реакции фазового перехода невозможно предсказать.

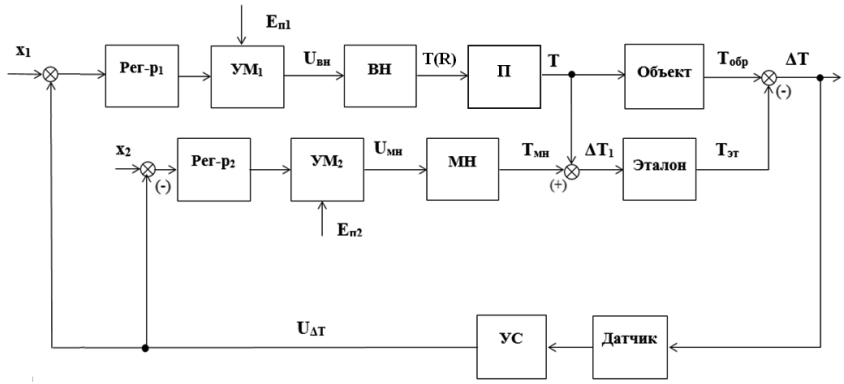


Рис. 2. Структурная схема теплового блока ДСК

На основании этого систему регулирования следует настраивать исходя из сигналов, поступающих с температурных датчиков. Размеры датчика довольно малы, а значит, его можно принять за точечный и считать выходной сигнал системы сосредоточенный.

Таким образом, в основу создания модели теплового потока в измерительной ячейке дифференциального сканирующего калориметра как объекта управления стоит заложить методы описания объектов с распределенными параметрами и сосредоточенными входом и выходом.

B. Математическое моделирование

Из структуры печи видно, что при нагревании корпуса печки теплового блока, температура передается подложке, лежащей своими границами на внутренней стенке блока.

Для уменьшения инерционности процесса передачи тепла от внешнего нагревателя к измерительным ячейкам, высотуподложки в печах ДСК делают малой (меньше 1 мм), что значительно меньше ее радиуса. Это позволяет пренебречь распределением тепла по высоте подложки, а учитывать его лишь по радиальной составляющей.Считая подложкуидеально круглой формы и постоянной высоты, а также теплофизические параметры материала подложки по всему объему одинаковыми, уравнение теплопроводности можно записать в виде:

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \frac{\lambda_э}{C\rho}\left(\frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T(r,t)}{\partial r}\right). \qquad (1)$$

Здесь T – температура подложки, r – пространственная координата, $\lambda_э$ – теплопроводность подложки, учитывающая изменение коэффициента термического сопротивления воздуха от температуры T, C и ρ – теплоемкость и плотность материала подложки.

Краевые условия для уравнения (1) в виде:

$$\begin{cases} T(r,0) = T_0(r), & 0 \le r \le R; \\ \lambda_э \dfrac{\partial T(R,t)}{\partial r} = q(t), & t \backslash > 0; \\ \dfrac{\partial T(0,t)}{\partial r} = 0, & t > 0. \end{cases} \qquad (2)$$

Здесь $T_0(r)$ – температура подложки в начальный момент времени,$q(t)$ – тепловой поток на границе подложки, R – радиус подложки

Третья формула краевых условий (2) является условием симметрии, позволяющим ограничиться рассмотрением температурного поля на отрезке[0;R] вместо [-R;R].

Решая эту задачу методом разделения временных и пространственных координат, по методу, приведенному в [14], переходя к безразмерной форме записи и применяя преобразование Лапласа по временному параметру, получим следующее уравнение операторного вида:

$$W(r,p) = \frac{2}{R}\left\{\frac{1}{p} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(k_n r) J_1(k_n R)}{k_n\left[J_0^2(k_n R) + J_1^2(k_n R)\right]} \times \right. \qquad (3)$$
$$\left. \times \frac{1/ak_n^2}{\left(1/ak_n^2\right)p + 1}\right\},$$

где $W(r,p)$ – передаточная функция рассматриваемого объекта управления; $J_0(*)$ и $J_1(*)$ – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно; k_n – корни функции Бесселя; a – коэффициент температуропроводности материала подложки.

Уравнение (3) представляет собой передаточную функцию рассматриваемого объекта с распределенными параметрами и сосредоточенными входным и выходным параметрами. Данную формулу можно использовать для представления блока «П» в численной модели системы регулирования параметрами теплового блока ДСК. Уравнение (3) представляет собой передаточную функцию блока «П», отражающую отношение температуры в измерительной ячейке к температуре на внешней границе подложки в операторной форме при указанных в (2) краевых условиях.

C. Компьютерное моделирование

Компьютерное моделирование позволяет выявить основные факторы, определяющие свойства изучаемого

объекта-оригинала и наглядно представить процессы, происходящие в нем.

Для построения компьютерной модели нашей системы следует задаться некоторыми численными значениями, характерными определенному типу ДСК. В качестве такого образца был выбран отечественный калориметр ДСК-500.

Численные значения коэффициентов измерительного блока устройства ДСК-500 выбирались исходя из того, что материалом подложки является константан,радиус подложкиR=15*мм*, начальные условия принимались как нормальные.

Параметры передаточной функции рассчитывались из условия, что выходом объекта является температура в точкена расстоянии 10 *мм* от центра подложки, а температурный датчик представляет собой инерционное звено первого порядка с постоянной времени 13.65 *с*, что соответствует термопаре типа «алюмель-константан».

Инерционность измерительных ячеек в модели задавалась исходя из значений теплофизических параметров алюминиевых тиглей массой 60 *мг* и толщиной стенок 0.3 *мм*.

Результатом моделирования стал отклик системы на ступенчатое входное воздействие, отражающий температуру в измерительной ячейке в условных единицах. На рис. 3 график 1 отражает переходную характеристику замкнутой системы без регулятора.

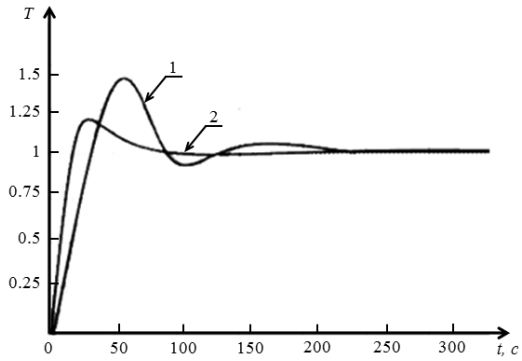


Рис. 3. Переходная характеристика модели системы

Основная задача численного моделирования заключалась в настройке параметров системы автоматического управления, обеспечивающих необходимое качество переходного процесса. В рассматриваемой задаче оно заключается в увеличении быстродействия системы, недопустимости большого перерегулирования (коэффициент перерегулирования не более 20%) и уменьшение степени колебательности для увеличения запаса устойчивости многоконтурной системы.Эти требования важны для систем с программным управлением задающего воздействия. Данный класс систем управления широко применяется в ДСК различного назначения.

В качестве регуляторов для рассматриваемой системы были выбраны ПИД-регуляторы, поскольку они являются достаточно простыми и эффективными регуляторами непрерывного действия. С помощью различных методов настройки регуляторовбыл произведен поиск лучших, по указанным ранее критериям качества, параметров настройки регуляторов в контурах рассматриваемой системы.Среди нихусовершенствованный временной метод Зиглера-Никольса[15], метод, разработанный Chien, Hrones и Reswick(CHR) [16], имеющий большую устойчивость, чем метод Зиглера-Никольса и методы автоматическогоопределения параметров регулятора в программе MatLab. Методы автоматического определения параметров ПИД-регулятора в программе MatLab выбирались по принципу минимизации ошибки между выходным и входным сигналами. Для этого использовались специальные команды в приложении OptimizationToolbox для оптимизации переходного процесса по методу наименьших квадратов и методу минимизации максимального значения выходного сигнала на заданном промежутке.

Лучшие результатынастройки регуляторов, которых удалось добиться, показаны на рис. 3 график 2 в виде переходной характеристики на выходе системы.Они получились методом автоматического определения параметров ПИД-регулятора при оптимизации переходного процесса по принципу минимизации максимального значения выходного сигнала на временном промежутке от 0 до 100 с. Параметры ПИД-регулятора для внешнего контура(«Рег-p_1» на рис. 2) получились следующие: коэффициент пропорциональной составляющей равен 1.57; коэффициент интегральной составляющей равен 0.056; коэффициент дифференциальной составляющей равен -1.077. Параметры регулятора для внутреннего контура(«Рег-p_2» на рис. 2): коэффициент пропорциональной составляющей равен 0.152; коэффициент интегральной составляющей равен 0.097; коэффициент дифференциальной составляющей равен 0.386.

Из графиков на рис. 3 видно, что время переходного процесса при настроенных регуляторах составило 75 с, что более чем в три раза меньше аналогичного показателя без настроек, а максимальное перерегулирование составляет 20%, что в два раза меньше перерегулирования в системе без регуляторов и соответствует выбранному критерию качества управления.

IV. Заключение

В результате работы была получена математическая модель распределения теплового потока в термоблоке ДСК, учитывающая распределенность ее параметров по площади подложки. Построены структурные и численные модели формирования теплового потока в измерительных ячейка блока с учетом их удаленности от нагревателя, наличия эффекта лучистого теплообмена и инерционности нагревателей и датчиков. Построена численная модель системы регулирования температурой в измерительной ячейке теплового блока отечественного калориметра ДСК-500 и определены оптимальные по критерию быстродействия параметры настройки регуляторов с учетом коэффициента перерегулирования не превышающим 20%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Пат. 48638 Российская Федерация, МПК7 G 01 N 25/02. Установка для дифференциально-термического анализа / Кочемировский В.А., Тверьянович А.С. Тверьянович Ю.С. ; патентообладатель Кочемировский В.А., Тверьянович А.С., Тверьянович Ю.С. - № 2005109364/22 ; заявл. 28.03.2005 ; опубл. 27.10.2005.

[2] Пат. 2331063 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/20. Дифференциальный сканирующий калориметр / Бойко Б.Н., Рыкунова Г.Н., Колпаков И.М., Горюнов А.В., Федулаева Л.В. ; патентообладатель Институт биологического приборостроения с опытным производством РАН. - №2006134959/28 ; заявл. 04.10.2006 ; опубл. 10.08.2008.

[3] Пат. 2247362 Российская Федерация, МПК7 G 01 N 25/02. Устройство термографического блока для термического анализа пищевых жиров / Яковлев В.Ф., Полянский К.К., Снегирев С.А. ; патентообладатель Государственное образовательное учреждение Воронежская государственная технологическая академия. - № 2003132737/28 ; заявл. 10.11.2003 ; опубл. 27.02.2005.

[4] Missal W., Kita Y. Calorimetric sensitivity and thermal resolution of a novel miniaturized ceramic DSC chip in LTCC technology. - Thermochimica Acta. - 2012. №543.-P.142-149.

[5] КалориметрбомбовыйАБК-1В (www.retech.ru/kalorimetricheskoe-oborudovanie/abk-1v/).

[6] Khaw M.K.,Mohd-Yasin F., Nguyen N.T. Microcalorimeter: Design considerations, materials and examples. - Microelectronic Engineering. - №158. 2016.- P. 107-117.

[7] Ubelhor R.,EllisonD., Pierce C. Enhanced thermal property measurement of a silver zinc battery cell using isothermal calorimetry.- Thermochimica Acta. – 2015. №606. - P.77-83.

[8] Missal W.,KitaJ., WapplerE., BechtoldF., MoosR. Calorimetric sensitivity and thermal resolution of a novel miniaturized ceramic DSC chip in LTCC technology. - Thermochimica Acta. – 2012.№543. -P.142-149.

[9] НечаевА.С., МощенскийЮ.В., ХуснутдиноваР.Р., ДмитриеваЕ.А. МодельизмерительногоблокаДСКдлясинтезасистемыуправления тепловым потоком. Датчикиисистемы. - 2016. № 6. -С. 38-43.

[10] KuehnerJ.P. Velocitymeasurementsinthefreeconvectionflowaboveaheatedhorizontalcylinder / JoelP. Kuehner, JohnR. Pflug, F. Andrew Tessier Jr., Ali M. Hamed, Franco J. Moiso Marin // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – № 55.– С. 4711-4723.

[11] Ali A.S.,Paul M.C. Transition of free convection flow between two isothermal vertical Plates. - International Journal of Heat and Mass Transfer. - 2014. № 76. -P. 307-316.

[12] Патент 116238 U1 РоссийскаяФедерация, МПКG 01 N 25/00. Устройстводлядифференциальноготермическогоанализаэнергонасыщенныхвеществ / Мощенский Ю.В., Макаров И.В., Нечаев А.С. Федотов С.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Самарский гос. техн. ун-т. - № 2012102547; заявл. 25.01.2012; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14.

[13] А. с. 1376019 СССР, МПК[4]G 01 N 25/02.Устройство для дифференциального термического анализа / Мощенский Ю.В., Трунин А.С. ; заявитель Куйбышевский политехнический институт им.В.В.Куйбышева. - №4120238 ; заявл. 17.09.1986 ; опубл. 23.02.1988.

[14] Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. - М.: Высшая школа. 2003. - 299 с.

[15] Коломыцев В.Г., Рустамханова Г.И. Модификация временного метода Зиглера-Никольса и оптимизация параметров ПИД-регуляторов средствами MATLAB // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11-3. – С. 526-531; http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41010.

[16] Сидорова А.А. Определение наиболее эффективного метода настройки ПИД-регулятора. Институт кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета. Информационные технологии в системах автоматизации. – 2012. №5. – С. 143 – 150.

Способ оценки чувствительности пылевоздушной смеси к тепловому воздействию, вызванному электрическим разрядом

Нечаева И.Н.
ФГБОУ ВО СамГТУ
г. Самара, Российская Федерация
nechaev-as@mail.ru

Нечаев А.С.
ФГБОУ ВО СамГТУ
г. Самара, Российская Федерация
nechaev-as@mail.ru

***Abstract* — Sensitivity to electrical discharges is an important characteristic of the material, allowing to judge the possibility of its practical use and its aging. It is also used in the preparation of safety requirements for working with media filled with this substance, its vapors or dust. Of particular interest is the assessment of sensitivity to the thermal effects of dusty air mixture caused by electric discharge, because it determines how to conduct technological work in areas with high risk and particularly hazardous areas. Without such premises it is impossible to imagine the construction, metallurgical, mining, chemical, military and other industries. The paper proposes a mathematical and equivalent electrical model of the installation for experiments to assess the sensitivity to the thermal effects of dusty air mixture caused by an electric discharge. As a result of the analysis of the obtained model, the possibilities of regulating the energy of the emitted spark discharge by changing certain parameters of the elements of the installation are indicated. A model of the spark discharge as a load element of the experimental setup is obtained taking into account the unevenness of the resistance of the discharge gap. This model is adapted for use in digital computers. On the basis of the obtained model, the analytical dependence of the rate of heat release of the particles of matter in the dust-air mixture under the influence of a spark discharge on the parameters of the installation, the particles of the substance and the air environment is established, which is necessary to assess the sensitivity to the thermal effects of the dust-air mixture in the considered information-measuring system. Also, the visual representation of the distribution of thermal energy formed by the spark discharge in the particles of matter depending on the size and area of their contact with the discharge channel is given.**

Ключевые слова — пылевоздушная смесь, электрический разряд, чувствительность, математическая модель, информационно-измерительная система

I. Введение

Чувствительность к электрическим разрядам является важной характеристикой материала, позволяющей судить о возможности его практического использования (диэлектрические свойства, исследование полупроводниковых материалов в силовой электронике, электроискровая обработка конструкционных материалов, электроимпульсное разрушение и измельчение горных пород и т.д.) [1,2], о его старении [3-5] (развитие в нем ударной ионизации, нарушение тепловой устойчивости, электрохимическое старение диэлектриков и т.п.), при составлении требований безопасности к работе со средами, заполненными этим веществом, его парами или пылью (угольные шахты, мукомольные заводы, транспортировка материалов в закрытых контейнерах, боксах, цистернах и т.д.) [6-10].

Особый интерес представляет собой оценка чувствительности пылевоздушной смеси (ПВС) на электрический разряд, поскольку именно она определяет, каким образом должны вестись технологические работы в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных помещениях. Без таких помещений невозможно представить строительную, металлургическую, горнодобывающую, химическую и другие виды отраслей.

В военной промышленности также присутствуют отрасли в технологических линиях которых существует необходимость уделять особое внимание возникновению электростатических разрядов и их влиянию на протекающий процесс. Так, например, пневматическое транспортирование промышленных взрывчатых веществ (ВВ) и заряжание ими взрывных полостей сопровождаются электризацией. Уровень электризации в основном определяется состоянием контактирующих поверхностей и зависит от многочисленных факторов среды, параметров вещества, технологических параметров и т.п. Возникающие электростатические разряды при этом могут стать источниками воспламенения ПВС, особенно при пневмозаряжании, когда образование пылевоздушных смесей возможно и вне трубопроводов. ПВС большинства ВВ отличаются и высокой электризуемостью, поэтому оценка чувствительности ВВ к статическому разряду является основополагающей при определении степени безопасности протекания технологических процессов изготовления продукции на их основе и учитывается при разработке соответствующих мер защиты [11,12].

Определение минимальной энергии зажигания ПВС проводится путем подачи заданной энергии искрового разряда в известный объём концентрации порошка [11,13]. Оценка количества энергии, переданной искрой пыли в настоящее время определяется согласно методике, указанному в ГОСТ Р 54745-2011. Однако в данном стандарте дается дольно грубая оценка энергии электростатической искры, характеризующаяся только параметрами схемы измерительной установки (емкость рабочего конденсатора, напряжение на заряженном конденсаторе, межэлектродное расстояние), и никак не зависящая от затухания в разрядной цепи, формы и размеров искрового канала, времени действия индуктивных фаз искрового разряда и т.п. Таким образом, учет особенностей генерации и

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

распространения тепла в газоразрядном промежутке при оценке чувствительности ПВС к искровому разряду является весьма актуальной задачей.

Цель проводимых исследований состоит в уточнении методики оценки чувствительности ПВС к тепловому воздействию, вызванному электрическим разрядом в экспериментальной установке.

II. Материалы и методы

Изменение энергетического баланса искрового разряда связано с перераспределением тепла, переданного от разряда ПВС путём теплопроводности и конвекции, а также расходуемого на потери в электродах. Стоит отметить, что часть выделенной энергии тратиться на излучение, образование ударной волны, диссоциацию, ионизацию и возбуждение молекул газа в разрядном промежутке.

Тепловой коэффициент полезного действия искрового разряда h_T можно представить как отношение:

$$h_T = W_T / W, \tag{1}$$

где W_T – энергия, выделяющаяся в газоразрядном промежутке в виде тепла; W – электростатическая энергия искрового разряда, характеризующаяся электрической энергией запасенной установкой перед разрядом.

В работе [14] отмечено, что энергия искрового разряда не является прямым показателем ее эффективности, поскольку динамика формирования начального очага существенно зависит от формы, размеров искрового канала, характеристики выделения энергии, амплитуд тока и времени действия индуктивных фаз искрового разряда. Поэтому ключевым показателем эффективности разряда стоит считать именно тепловой коэффициент полезного действия.

Для определения энергии в искровом канале вводимой экспериментальной установкой воспользуемся ее эквивалентной электрической схемой, приведенной на рис. 1.

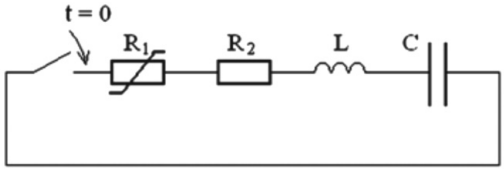


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема экспериментальной установки

Емкость цепи C отражает совокупность емкости рабочего конденсатора, паразитных емкостей составных частей схемы и емкостью разрядного промежутка до момента его пробоя. Индуктивный элемент L определяет индуктивность соединяющих проводов и электронных компонентов схемы устройства, а также индуктивностью разрядного промежутка. Активное сопротивление схемы можно представить в виде совокупности активного сопротивления проводов, внутренних сопротивлений электронных компонентов контура R_2 и полным активным сопротивлением разрядного промежутка R_1. Переменное сопротивление R_1 отражает нелинейность характеристик в разрядном промежутке.

Согласно такому представлению, энергия разряда $E(t)$, выделяемая на газорязрядном промежутке, может быть определена соотношением [16]:

$$E(t) = \frac{A_i^2 R_p \omega}{4\left(\alpha^2+\omega^2\right)}\left[\frac{\omega}{\alpha}\left(1-e^{-2\alpha t}\right) - e^{-2\alpha t}\left(\frac{2\alpha}{\omega}sin^2\,\omega t + sin\,2\omega t\right)\right]. \tag{2}$$

Здесь A_i – постоянная составляющая амплитуды тока в затухающем колебательном разряде, определяющаяся как

$$A_i = \left(U_н - U_0\right)\sqrt{\frac{C}{L}}, \tag{3}$$

где $U_н$ – напряжение заряда конденсатора; U_0 – остаточное напряжение на конденсаторе после завершения разряда; R_p – сопротивление искрового канала, которое меняется в процессе развития разряда, однако в работе [16] оно принимается постоянным и образуется усреднением величины сопротивления искрового канала по результатам анализа динамики затухания разрядного тока за несколько первых периодов разряда; ω – угловая частота для колебательного контура с затухающим разрядом, определяемая выражением [17]:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}, \tag{4}$$

где $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – резонансная частота RLC-контура; $\alpha = \left(\frac{R_p}{2L} + \alpha_{кз}\right)$ – коэффициент затухания в разрядной цепи с нагрузкой в виде газоразрядного промежутка, выражаемый через коэффициент затухания в разрядной цепи при коротком замыкании $\alpha_{кз}$ (схема представленная на рис. 1 без переменного сопротивления R_1).

Таким образом, энергия выделяемого искрового разряда в схеме может быть определена и регулируема с помощью напряжения заряда конденсатора (параметр A_i), сопротивления искрового канала (R_p), угловой частотой и коэффициентом затухания контура, зависящими преимущественно от параметров R и L контура. Стоит также отметить, что частота колебания разрядного тока оказывает влияние на происходящие в искровом промежутке процессы, которые определяют порог зажигания разряда.

Постоянная составляющая амплитуды тока, как видно из (3), зависит от параметров цепи и может быть довольно точно определено. Активное сопротивление цепи, кроме сопротивления электронных компонентов и проводников, определяется сопротивлением в разрядном

промежутке, которое непосредственно связано с физическими особенностями искрового канала. Пренебрежение этими особенностями может существенно исказить информацию, полученную о количестве тепловой энергии, переданной искровым разрядом ПВС.

Основополагающим методом для предпринимаемого исследования является моделирование процесса выделения и распространения искрового разряда. Результаты моделирования будут заложены в принципы представления процесса генерации и передачи тепла от искрового канала к частицам ПВС. Формализация протекающих в разрядном промежутке процессов позволит визуально представить процесс нагрева частиц вещества различного размера искровым разрядом.

III. Моделирование и имитационный подход

Согласно стримерной теории, если частица вещества представляют собой твердый диэлектрик, то возникающий разряд можно рассматривать как скользящий искровой разряд, протекающий вдоль поверхности раздела газа и частиц вещества, помещенного между электродами. На основании этого можно считать, что тепловая энергия участка проводящего канала разряда передается частицам вещества, вдоль которых он протекает, с учетом относительных теплопроводных характеристик частиц вещества и газовоздушной смеси.

Стримерная теория объясняет малое время формирования разряда, и развитие искрового разряда в виде довольно узкого канала [3]. После возникновения пробоя межэлектродного промежутка происходит резкое увеличение проводимости в узком канале. Схематично это показано на рис. 2, где 1 – электроды экспериментальной установки, которые формируют канал разряда 2, при обычном расположении электродов канал окружён факелами 3, то есть выбросами паров материалов, из которых выполнены электроды, а вокруг канала и факелов находится пламя разряда 4, образованные раскалёнными газами, в атмосфере которых происходит разряд.

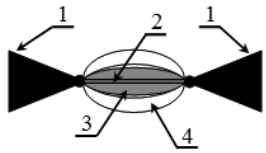


Рис. 2. Схема искрового разряда

Как только в разрядном промежутке образуется проводящий канал, в него сразу же усиленно начинает поступать энергия, и проходящий по нему ток быстро нарастает. Скорость нарастания тока обычно определяется параметрами внешней цепи. Канал сильно разогревается и расширяется, причём расширение происходит с такой скоростью, что на ранней стадии этот процесс можно приближённо рассматривать как распространение ударной волны. Температура канала разряда является непосредственной функцией плотности тока. Наибольшего значения плотность тока достигает в первые $5 \cdot 10^{-7}$ с. В это время излучение искрового разряда имеет наиболее «горячий» характер. Температура факелов вблизи электродов примерно равна температуре канала и падает по мере удаления от них. Рассмотренная модель искрового разряда характерна для многих производственных процессов, в которых возникают электростатические заряды, реализующиеся в виде разрядов на заземлённые части оборудования.

Как видно из схемы искрового разряда тепловой эффект зависит от размеров канала разряда, определяемых его длиной.

Безразмерная величина тепловой энергии искры M в [18] определяется выражением

$$M = \frac{AE_g}{4\pi\lambda_g t_* R T_*^2}, \qquad (5)$$

где A – линейная плотность тепловыделения от искры; R – газовая постоянная; λ_g – коэффициент теплопроводности газа; E_g – энергия, накопленная в газе; t_* – характерное время химической реакции окисления (горения) конденсированной взвеси в газе при температуре T_*; T_* – масштабная температура, меньшая адиабатической температуры сгорания газовзвеси, выбираемая по нескольким Семеновским интервалам для упрощения численных расчетов при выбранной смеси газов и массовой концентрации дисперсной фазы [19,20].

Линейная плотность тепловыделения представляет собой зависимость, отражающую количество тепла, выделившееся в единицу времени на длине искрового промежутка.

При определении выражения (5) авторами делались допущения, что частицы равномерно распределены в газе, имеют сферическую форму и одинаковый размер; теплообмен между газом и частицами происходит по закону Ньютона; термическое расширение газа не учитывается. Искра моделируется мгновенным нитевидным источником тепловыделения.

Данные допущения не в полной мере соответствуют поставленной нами задачи, а именно, частицы не имеют одинакового размера, а также искра представляет собой не мгновенный, а длящийся определенное время процесс.

Наличие частиц малого диаметра уменьшает энергию воспламенения и с увеличением их массовой концентрации энергия искры, необходимая для зажигания, уменьшается. Это связано с тем, что большое количество частиц вступает в реакцию в зоне энерговыделения искры. С увеличением массовой концентрации частиц малого диаметра минимальная энергия воспламенения ПВС от искры уменьшается, достигая определенного значения и с дальнейшим увеличением массовой концентрации происходит незначительное увеличение параметра A. Частицы большего диаметра затрудняют зажигание ввиду того, что тепловые затраты на их нагрев в начальном этапе зажигания значительно выше по причине сравнительно малой поверхности соприкосновения с разрядным каналом и относительно высокой тепловой инерционностью прогрева. Существенное увеличение размеров частиц потребует выделения значительной

минимальной энергии искры и времени ее существования, что маловероятно в технологических процессах, где возможно возникновение статического разряда.

Безразмерная величина тепловой энергии искры M является аналогией теплового коэффициента полезного действия искрового разряда h_T, в том случае, если речь идет о передаче тепловой энергии от искры газовзвеси с частицами взрывчатого вещества одного размера. Принимая во внимание, что выражение (2) представляет собой энергию разряда, выделяемую на газорязрядном промежутке в экспериментальной установке, то энергию, выделяющуюся в искровом канале в виде тепла можно записать как $W_T = M \cdot E(t)$.

Для определения величины тепловой энергии от искрового разряда необходимо найти функцию изменения сопротивления разрядного промежутка R_p. Поскольку сопротивление искрового разряда меняется в течение времени, то его значение можно определить и аппроксимировать для известных условий эксперимента по текущим значениям напряжения и тока в искровом промежутке. Из эквивалентной электрической схемы, приведенной на рис. 1 можно выразить сопротивление в газоразрядном промежутке через мгновенные значения напряжения и тока в фиксированные моменты времени t_n. Для практических расчетов удобно выбирать такое t_n, чтобы выполнялось условие $t_{n+1} - t_n = \Delta t = const$, причем шаг Δt можно выбирать, основываясь на знаниях параметров A_i и ω искрового разряда. Это позволит разбить весь временной промежуток искрового разряда на счетное количество отрезков N, в каждом из которых параметр $R_p(t_n)$ может считаться константой. Тогда выражение для энергии, выделяющейся в искровом канале в виде тепла можно записать как:

$$W_T = \sum_{n=0}^{N} \frac{AE_g}{4\pi\lambda_g t_* RT_*^2} \frac{A_i^2 R_p(t_n)\omega}{4\left(\alpha^2+\omega^2\right)} \times \times\left[\frac{\omega}{\alpha}\left(1-e^{-2\alpha t}\right)-e^{-2\alpha t}\left(\frac{2\alpha}{\omega}sin^2\,\omega t + sin\,2\omega t\right)\right]. \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет оценить тепловую энергию, выделенную искрой в разрядном промежутке с учетом ее длины, зависящей от расстояния между электродами и газоразрядного канала, определяемого размерами и количеством частиц пыли в этом расстоянии.

При решении задачи цифровой обработки эксперимента уравнение (6) служит основой для оценки чувствительности ПВС к тепловому воздействию, вызванному электрическим разрядом в экспериментальной установке. При этом параметр t_n может быть принят равным времени дискретизации сигнала в аналого-цифровом преобразователе информационно-измерительной системы.

На основании выражения (6) можно определить скорость тепловыделения искровым разрядом Q в ПВС, которая характеризует быстроту нарастания температуры и давления в камере воспламенения, что в итоге может привести к взрыву на технологическом участке:

$$Q = q\nu_0\, exp\left(-E/RT\right), \quad (7)$$

где $q = W_T / S_0$ – тепловой поток, идущий от искрового разряда к частице взвеси с площадью поверхности S_0; ν_0 – линейная скорость распространения искрового разряда; E – энергия активации химической реакции; T – среднее значение температуры по веществу.

Выражения (6) и (7) с учетом базовых понятий стримерной теории позволяют судить о процессе нагрева частиц ПВС в искровом промежутке, а именно:

- искровой канал формируется в свободном от частиц пространстве, обладающим наименьшим сопротивлением;
- скорость протекания искрового разряда в измерительном блоке экспериментальной установки значительно выше скорости движения частиц, следовательно, в течение времени существования искры ПВС можно считать неподвижной;
- количество переданного частицам тепла зависит от энергии генерируемой экспериментальной установкой, траектории протекания и времени существования разряда, размеров и теплофизических свойств частиц;
- время существования и начальная энергия искры полностью определяются настройками экспериментальной установки.

На рисунке 3 приведено визуальное представление протекания заряда 3 (кривая с длинным штрихом), создаваемого электродами 2, между частицами вещества 1. Кривыми 3 отражено некоторые возможные траектории протекания заряда, создаваемые электронными лавинами. Данные проводящие каналы образуются в ПВС между частицами вещества, обладающими диэлектрическими свойствами.

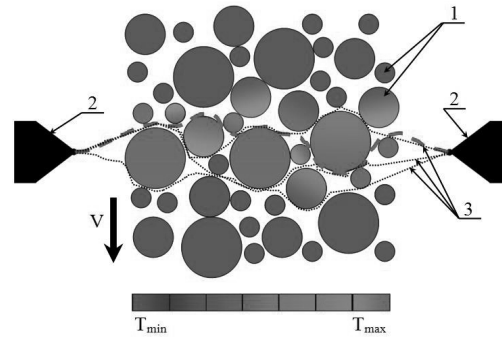


Рис. 3. Визуальное представление процесса нагрева частиц вещества искровым разрядом

На рисунке 3 также приведено распределение теплового воздействия искрового разряда на частицы вещества в зависимости от размеров и площади их контакта с каналом искрового разряда. Как видно из этого представления, частицам малого размера для повышения их внутренней энергии достаточно более короткого контакта с разрядом, чем частицам крупного

размера. В свою очередь, частицы малого размера при сгорании от энергии, полученной от разряда, могут положить начало детонации более крупных частиц, которые не детонировали при контакте с разрядным каналом. Возникновение в данной ситуации цепной реакции приводит к детонации всей ПВС, что является источником несчастных случаев на производстве.

Вопрос фиксации возгорания частиц ПВС в экспериментальной установке является приоритетным с точки зрения решения технических задач, поскольку в настоящее время установление эффекта горения осуществляется преимущественно самим экспериментатором. Это вызывает довольно существенные погрешности в обработке экспериментальных данных, поскольку световая и тепловая энергии от горения небольшой массы частиц смеси значительно уступают в количественном отношении подобным видам энергии, выделенными самой искрой. Однако, по приведенным зависимостям, зная параметры экспериментальной установки и усредненные статистические параметры ПВС можно оценить чувствительность исследуемой газовзвеси к тепловому воздействию, вызванному искровым разрядом определенной мощности.

IV. Заключение

В результате работы получена модель искрового разряда как элемента нагрузки экспериментальной установки с учетом неравномерности сопротивления разрядного промежутка. Данная модель адаптирована для использования в цифровых вычислительных машинах. На основе полученной модели установлена аналитическая зависимость скорости тепловыделения частиц вещества в пылевоздушной смеси при воздействии искрового разряд, от параметров установки, частиц вещества и воздушной среды, что является необходимым для оценки чувствительности к тепловому воздействию пылевоздушной смеси в рассматриваемой информационно-измерительной системе.

Также приведено визуальное представление распределения тепловой энергии, формируемой искровым разрядом, в частицах вещества в зависимости от размеров и площади их контакта с каналом разряда.

Список литературы

[1] Tan T.-H., Yan J. Atomic-scale characterization of subsurface damage and structural changes of single-crystal silicon carbide subjected to electricaldischargemachining //Acta Materialia. - V. 123. - 2017.-P. 362-372.

[2] Pramanik A., Basak A., Islam M., Littlefair G. Electricaldischargemachining of 6061 aluminium alloy // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. - V. 25. - 2015. - P. 2866-2874.

[3] Воробьев Г.А., Похолков Ю.П., Королев Ю.Д., Меркулов В.И. Физика диэлектриков (область сильный полей). - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. - 245 с.

[4] Mohanty C.P., Sahu J., Mahapatra S.S. Thermal-structural Analysis of ElectricalDischargeMachining Process // Procedia Engineering. V. 51. - 2013. - P. 508-513.

[5] Lauwers B., Vleugels J., Malek O., Brans K., Liu K. Electricaldischargemachining of composites // Machining Technology for Composite Materials. - 2012. - P. 202-241.

[6] ПБ 05-618-03 Правила безопасности в угольных шахтах (www.znaytovar.ru/gost/2/pb_0561803_pravila_bezopasnost).

[7] Правила безопасности при обогащении и брикетировании углей (сланцев) (www.base.safework.ru/law?doc&nd=33303091&nh=1).

[8] Федеральный закон от 21.07.1997 N 116-ФЗ (ред. от 03.07.2016) "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" (www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234).

[9] Федеральный закон. Технический регламент «О требованиях к безопасности продуктов переработки зерна, процессов их производства, хранения, перевозки, реализации и утилизации» (www.docs.cntd.ru/document/1200050466).

[10] РД 13-78-94 Правила безопасности при перевозке взрывчатых материалов автомобильным транспортом (www.znaytovar.ru/gost/2/RD_137894_Pravila_bezopasnosti.html).

[11] Раско С.Л. Эксплуатационная безопасность конденсированных взрывчатых веществ: учебное пособие / С.Л. Раско, А.Г. Овчаренко. Бийск. - Изд-во Алт. гос. тех. ун-та, 2006. - 147 с.

[12] Таубкин И.Г. Об опасности электризации граммонитов при пневмозаряжании шпуров и скважин / И.Г. Таубкин [и др.] // Взрывное дело. - М: Недра, 1978. - №80/37. - С. 221-228.

[13] ГОСТ Р 54745-2011 Взрывоопасные среды. Часть 20-2. Характеристики материалов. Методы испытаний горючей пыли. М.: Стандартинформ, 2013

[14] Францев С.М. Выбор характеристик выделения энергии искрового разряда для системы зажигания // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». Вып. 2. - 2014. - С. 1-11.

[15] Корытченко К.В. Усовершенствованный метод расчета динамики ввода энергии в искровой канал по кривой разрядного тока / К.В. Корытченко, О.В. Галак // Прикладная радиоэлектроника. - 2011., том 10, №1. - С. 51-59.

[16] Zhang B., Dick H. Ng., Lee J.H.S. Measurement and relationship between critical tube diameter and critical energy for direct blast initiation of gaseousdetonations // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. - V. 26, 2013. - P. 1293-1299.

[17] Kamenskihs V., Dick H.Ng., Lee J.H.S. Measurement of critical energy for direct initiation of spherical detonations in stoichiometric high-pressure H2-O2 mixtures // Combustion and Flame. – V. 157, 2010. - P. 1795-1799.

[18] Крайнов А.Ю. Моделирование самовоспламенения, зажигания, горения и взрыва газовзвесей и процессов в сети горных выработок угольных шахт // Диссерт. раб. на соиск. уч. ст. д.ф.-м.н. по спец. «01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника». Томск. - 2003. - С. 354.

[19] Крайнов Ю.А. Распространение пламени в смеси горючих газов и частиц // Физика горения и взрыва. - 2000. Т. 36, №2. - С. 3-9.

[20] Крайнов Ю.А. Распространения фронта горения по газовзвеси, выделяющей горючие летучие компоненты // Труды международной конференции «Байкальские чтения-II по моделированию процессов в синергетических системах», Улан-Удэ-Томск: Изд-во ТГУ, 2002. - С. 48-51.

Имитационная модель электротехнического комплекса добывающей скважины с винтовой насосной установкой

Нурбосынов Д. Н.
Кафедра Электро- и теплоэнергетики
ГБОУ ВО Альметьевский государственный нефтяной институт
Альметьевск, РФ
nurbosinovdn@mail.ru

Табачникова Т.В.
Кафедра Электро- и теплоэнергетики
ГБОУ ВО Альметьевский государственный нефтяной институт
Альметьевск, РФ
tvtab@mail.ru

Швецкова Л.В.
Кафедра Электро- и теплоэнергетики
ГБОУ ВО Альметьевский государственный нефтяной институт
Альметьевск, РФ
shvetskova_L@mail.ru

Нурбосынов Э.Д.
Кафедра Электро- и теплоэнергетики
ГБОУ ВО Альметьевский государственный нефтяной институт
Альметьевск, РФ
whitedrago@mail.ru

Abstract - In the article is presented the power supply circuit of the electrical complex of the oil production well and a replacement power circuit. The system of algebraic and differential equations developed. Also developed the mathematical model of the electrical engineering complex of the oil production well. The system of algebraic and differential equations supplemented by the equation of motion and the step function of stress. A simulation model of the electrical complex of an oil production well developed with the PSCAD program.

As a result of mathematical and simulation modeling, graphs of current and electromechanical moment dependencies were obtained as a function of time in steady-state and transient processes.

The energy parameters and the bordering parameters of the guaranteed start and self-start of the electric drive of the complex under consideration are determined. It have been established that by varying all dependent and independent variables of the complex under consideration in the proposed configuration, a guaranteed start-up and self-starting of the electric drive, as well as a steady state of the electric drive when exposed to external and internal disturbances in the distribution network, is provided.

Ключевые слова — электротехнический комплекс добывающей скважины, винтовая насосная установка, компенсирующая установка, математическая модель, имитационная модель, пуск электропривода.

I. Введение

Объектом исследования является электротехнический комплекс добывающей скважины (ЭКДС), который подключен в конце самой длиной отходящей линии (характерная точка распределительной электрической сети (РЭС)) промысловой подстанции (рис. 1).

Разработана математическая модель по схеме замещения питающей линии и ЭКДС (рис. 2), получены аналитические зависимости.

Согласно ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [1] отклонение напряжение в характерных точках системы электроснабжения составляет ±0,1 о.е. от номинального уровня напряжения, т.е. в самой удаленной точке системы электроснабжения напряжение должно составлять 0,9 о.е. В связи с вышеизложенным произведено исследование процесса пуска электропривода ЭКДС с целью повышения энергоэффективности электрооборудования данного комплекса.

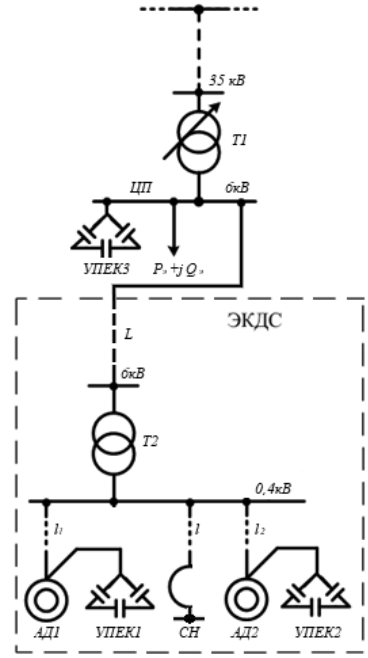


Рис. 1. Принципиальная схема электротехнического комплекса добывающей скважины, подключенного к характерной точке распределительной электрической сети

На рис. 1 представлены следующие элементы: Т1- силовой трансформатор промысловой подстанции; УПЕК3 – централизованная компенсирующая установка; $P_э + jQ_э$ – эквивалентная нагрузка всех отходящих линий промысловой подстанции; Т2 – силовой трансформатор ЭКДС; АД1, АД2 - асинхронные двигатели; УПЕК 1, УПЕК 2 - индивидуальные компенсирующие установки; СН – скважинный нагреватель; l – питающий плоский кабель в скважине длиной до 1000 м, l_1, l_2 – кабели питающие АД.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

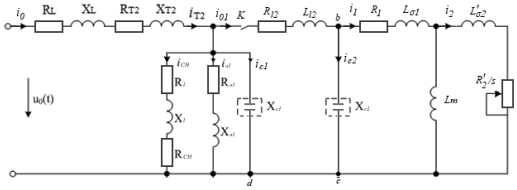


Рис. 2. Схема замещения электротехнического комплекса добывающей скважины

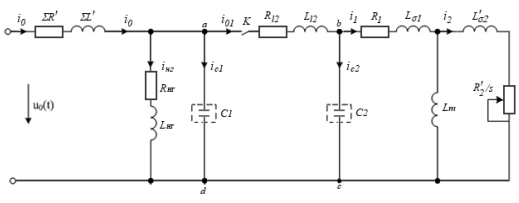


Рис. 3. Схема замещения с эквивалентными параметрами электротехнического комплекса добывающей скважины

Эквивалентное сопротивление отходящей линии (L) и индивидуального трансформатора ($T2$) приведены к напряжению 0,4 кВ:

$$\Sigma R' = \left(R_L + R_{t_2}\right)\left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}}\right)^2;$$

$$\Sigma L' = \left(L_L + L_{t_2}\right)\left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}}\right)^2.$$

По эквивалентной схеме замещения ЭКДС (рис. 3) составлена система алгебраических и дифференциальных уравнений:

$$i_0 = \frac{u_0}{\sqrt{(\Sigma R' + R_{ad'})^2 + ((\Sigma L' + L_{ad'})\cdot \omega_0)^2}};$$

$$\mathrm{u_{c1}} = \mathrm{u_{ad}} = u_0 - i_0 \cdot \sqrt{R_{нс}^2 + (\omega_0 \cdot L_{нс})^2};$$

$$\mathrm{u_{c2}} = \mathrm{u_{c1}} - i_{0_1} \cdot R_{l_2} + L_{l_2}\frac{i_{l_2}}{dt};$$

$$i_{01} = i_1 + C_2\frac{du_{c_2}}{dt};$$

$$u_{C_2} = i_1 \cdot R_1 + \frac{d\psi_1}{dt};$$

$$0 = i_2 \cdot R_2 + \frac{d\psi_2}{dt},$$

где u_0 – входное напряжение в ЭКДС; i_0 – входной ток ЭКДС; i_{01} – ток участка ab ; u_{C1} – напряжение на зажимах конденсатора C_1 ; i_{c2} – ток через конденсатор C_2 ; u_{c2} – напряжение на зажимах статора; i_1 – ток статора, i_2 - ток ротора; $\psi_1 = i_1 L_1 + i_2 L_m$, $\psi_2 = i_2 L_2 + i_1 L_m$ - потокосцепления обмоток статора и ротора соответственно; R_1 – активное сопротивление обмотки статора; R_2' – приведенное активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора; $L_1 = L_{\sigma 1} + L_m$, $L_2 = L_{\sigma 2} + L_m$ – полные индуктивности обмоток статора и ротора соответственно.

Система алгебраических и дифференциальных уравнений приводится к форме Коши, дополняется уравнением движения и единичной ступенчатой функцией напряжения [5]:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_m}m_c - \frac{k_1}{T_m \mathrm{X}_2'}\left(\psi_{1y}\cdot\psi_{2x} - \psi_{1x}\cdot\psi_{2y}\right);$$

$$U(t) = 1(t) - k\cdot 1(t-t_1) + k\cdot 1(t-t_2).$$

где s – скольжение; m_c – суммарный момент сопротивления; k_1 - коэффициент связи статора; T_{m} – величина механической постоянной вращающихся масс в относительных единицах; X_2' - переходное индуктивное сопротивление обмотки ротора; t_1 - момент снижения уровня напряжения; t_2 - момент восстановления уровня напряжения; k - коэффициент, характеризующий степень снижения уровня напряжения.

Численное решение системы уравнений приведенных к форме Коши позволяет получить энергетические параметры и граничные параметры гарантированного пуска и самозапуска электропривода рассматриваемого комплекса.

Математическое моделирование произведено при варьировании переменных параметров распределительной электрической сети, с учетом внешних и внутренних возмущающих факторов. Выбор оптимальной величины емкости представлен в [4]. В результате математического моделирования получены графики зависимостей напряжения, тока и электромеханического момента в функции времени [2, 3, 5]. Полученные результаты использовались для корректировки имитационной модели.

Разработана имитационная модель электротехнического комплекса добывающей скважины (рис. 4) с использованием программы PSCAD. Произведено имитационное моделирование режима работы электротехнического комплекса добывающей скважины при следующих допущениях и начальных условиях: – отклонение напряжение в характерных точках системы электроснабжения составляет ±0,1 о.е. от номинального уровня напряжения, т.е. в самой удаленной точке системы электроснабжения напряжение должно быть равно или больше 0,9 о.е. согласно

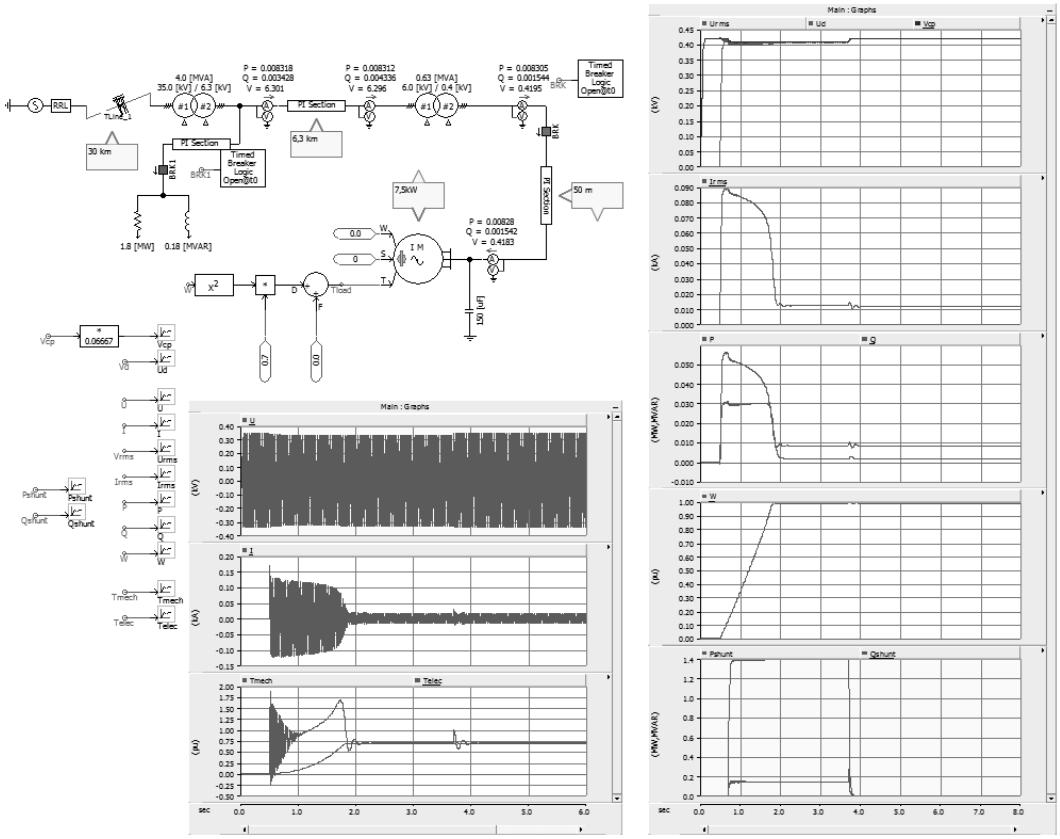


Рис. 4. Имитационная модель комплекса с винтовой насосной установкой с поверхностным приводом, индивидуальной компенсирующей установкой и графики зависимостей напряжения, тока, электромагнитного момента и момента сопротивления

ГОСТ 32144-2013 [1]; – скважинный нагреватель включается за 30 минут до включения насосных агрегатов; – один из двух насосных агрегатов находится в работе; – второй насосный агрегат производит самозапуск; – отклонение напряжения в распределительной электрической сети составляет 10%; – провал напряжения в распределительной электрической сети при пусках электроприводов электротехнического комплекса вспомогательного оборудования (дожимная насосная станция, кустовая насосная станция и буровая установка) достигает 40% при длительности более 3 секунд.

На рис. 4 представлены имитационная модель ЭКДС с винтовой насосной установкой с поверхностным приводом и графики зависимостей напряжения, тока, электромагнитного момента и момента сопротивления с учетом компенсирующей установки.

Результаты сравнения энергетических параметров имитационных моделей ЭКДС приведены в таблице 1, где представлены параметры учитывающие режим работы скважинного нагревателя. КПД увеличилось на 0,5 %, коэффициент мощности повысился на 0,338, коэффициент реактивной мощности снизился на 0,969.

ТАБЛИЦА I. СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ЭКДС

Энергетические параметры режима работы ЭКДС	***Режим работы ВНУ с ПП без КУ***	***Режим работы ВНУ с ПП и с КУ***	***Разность энергетических параметров***
$P_{ВНУ\ с\ ПП}$, кВт.	8,28	8,28	0
$Q_{ВНУ\ с\ ПП}$, кВАр.	9,75	1,54	-8,210
$P_{ш}$, кВт.	8,36	8,32	-0,040
$Q_{ш}$, кВАр.	11,55	3,43	-8,120
tgφ	1,382	0,412	-0,969
cosφ	0,586	0,925	0,338
η	0,990	0,995	0,005

II. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что при варьировании всех зависимых и независимых переменных параметров рассматриваемой имитационной модели ЭКДС в предлагаемой комплектации обеспечивается гарантированный пуск и самозапуск электропривода, а также устойчивый установившийся режим работы электропривода при воздействии внешних и внутренних возмущений в распределительной электрической сети.

Список литературы

[1] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - Москва: Стандартинформ, 2014.

[2] Табачникова Т.В., Швецкова Л.В., Нурбосынов Э.Д. Снижение энергетических затрат в электротехническом комплексе добывающей скважины // Труды IX МНПК «Ашировские чтения». – Самара: СамГТУ, 2012. – Т.I. – С. 108-112.

[3] Табачникова Т.В., Швецкова Л.В. Снижение потерь электрической энергии в технологии добычи нефти при эксплуатации винтовой насосной установки // Международный научно-исслед. журнал. Сборник по результатам XVII заочной научной конференции Research Journal of International Studies. – №7(14). Ч. 2. – Екатеринбург, 2013. – С. 113-115.

[4] Швецкова Л.В. Повышение энергоэффективности электротехнического комплекса добывающей скважины с высоковязкой нефтью: дис. канд. техн. наук: 05.09.03. - Самара, 2016. - 153 с.

[5] Нурбосынов Д.Н., Табачникова Т.В., Швецкова Л.В. Анализ режима работы электропривода электротехнического комплекса добывающей скважины при провалах уровня напряжения и уменьшения поперечного сечения насосно-компрессорной трубы //Электротехнические и информационные комплексы и системы. – Уфа: УГТУ, 2017. №4, т.13. – С. 52-58.

Сравнительный анализ использования LES и RANS подхода при численном 3D-моделировании горения метана

Пащенко Д.И.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
pashchenkodmitry@mail.ru

Гнутикова М.И.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
gnutikovamariya@gmail.com

***Abstract* — This paper presents the results of numerical simulation of methane combustion for LES and RANS approaches in modeling fluid dynamics. CFD modeling was performed using the ANSYS Fluent software. Reynolds-averaged Navier-Stokes equations solved with the standard k-ε turbulence model. For the three-dimensional model of large vortices (LES, large eddy simulation), HPC calculations (high performance computing) are used. Simulation of the kinetics of methane-air premixed combustion was performed using the eddy dissipation model (EDC model) for the RANS approach and using the PDF model for the LES approach. To account for radiant heat transfer, the R-1 radiation model was used. An assessment was made of the possibility of using the vortex dissipation model according to the Damkoler number. The scientific substantiation and verification of the physical and mathematical approaches laid down in ANSYS Fluent for the simulation of methane combustion was carried out. A numerical experiment was performed for a turbulent flow. It has been established that in the case of a turbulent flow, the character of the temperature and velocity contours obtained using the LES and RANS approaches differ significantly. On the basis of a numerical experiment, it was found that the difference between the average temperatures of the combustion products is minimal in the area adjacent to the methane output. The maximum discrepancy of the average temperature is observed for the region of developed turbulence..**

Ключевые слова — горение, метан, численное моделирование, модель турбулентности, контур температуры

I. Введение

Численное моделирование различных физико-химических процессов в технике и технологиях с использованием специализированных программных продуктов в последние годы находит все большее применение в работе инженеров и ученых разных стран. Так, согласно отчету NASA “Vision 2030”, к 2030 году около 80% вычислительной мощности всех компьютеров будет расходоваться на решение задач численного моделирования различных процессов и объектов [1].

Широкий спектр решенных задач к настоящему времени задач позволяет утверждать, что с помощью специальных программных продуктов, таких как, ANSYS, Comsol, OpenFOAM и др., возможно решать большинство известных научно-технических задач, имеющих отношение с численным моделированием различных физико-химических процессов. Задаче численного моделирования горения газообразных углеводородных топлив посвящено множество научных работ. В литературе можно встретить статьи посвященные моделированию горения метана [2], водорода [3], синтез-газа [4] и др. В программном продукте ANSYS заложен мощный модуль с алгоритмами для расчета горения разнообразных топлив, в частности, кинетика горения для использования модели крупных вихрей (Eddy dissipation model), PDF-функции (probability density function) для расчета диффузионного горения и другие [5].

Целью настоящей работы является сравнение результатов численного моделирования горения предварительно смешенного с воздухом метана при использовании RANS и LES моделей турбулетности. Кроме того, на основании разработанных алгоритмов проведено численное исследование основных характеристик горения метана.

Сможет ли численное моделирование в будущем полностью и частично заменить физический эксперимент во многом зависит от точности и адекватности используемых моделей горения, турбулентности, излучения и т.д. Поэтому одной из задач настоящей работы является верификация и научное обоснование заложенных в ANSYS Fluent моделей применительно для задачи CFD-моделирования горения метана.

II. Описание алгоритма

Общая схема решения задачи моделирования горения метана показана в виде блок-алгоритма на рис.1.

Рис. 1. Блок-алгоритм решения задачи CFD-моделирования горения метана

Для генерации области вычислений (расчетной геометрии) использован программный продукт Solid Works. Генерация и адаптация расчетной сетки выполнена в модуле ANSYS Meshing. Область вычислений и структура расчетной сетки показана на рис. 2.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 19-19-00327, 2019-2021 гг. по теме «Разработка и оптимизация технологии термохимической регенерации теплоты продуктов сгорания органического топлива: экспериментальное и численное исследование»

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

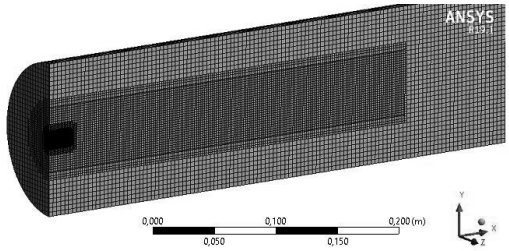


Рис. 2. Область вычислений и структура расчетной сетки

Для моделирования динамики потока в области горения в ANSYS Fluent решается система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая движение вязкой ньютоновской жидкости, называемых уравнениями Навье-Стокса. В общем виде, уравнения Навье-Стокса состоят из уравнения неразрывности (закон сохранения массы) и уравнения движения (закон сохранения импульса) [6].

Уравнение неразрывности, записанное в общем виде для нестационарного потока:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \vec{u}) = 0\,, \qquad (1)$$

где u – скорость; ρ – плотность.

Уравнение сохранения импульсов имеет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{u}) + \nabla(\rho\vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\bar{\tau}} + \tau') + \rho\vec{g} + \vec{F}\,, \qquad (2)$$

где p – статическое давление; $\rho\vec{g}$ и $\vec{F}$ - гравитационные и сторонние (внешние) силы, соответственно; τ' – тензор рейнольдсовых напряжений.

Тензор напряжений в уравнении (2) определяется как:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu\left[\left(\nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T\right) - \frac{2}{3}\nabla\vec{u}I\right], \qquad (4)$$

где μ - молекулярная вязкость; I – единичный тензор. Первый член выражения (4) является тензором скоростей деформаций, а второй член учитывает объемное расширение.

Основываясь на предварительном анализе и литературном обзоре, в численной модели использовано уравнение состояния Редлиха – Квонга [7].

Для моделирования горения использованы два метода решения уравнений Навье-Стокса: метод осредненных по рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) [8] и метод крупных вихрей (LES) [9, 10]. Для RANS метода уравнения Навье-Стокса замыкаются стандартной k-ε моделью турбулентности (k-ε standard), которая позволяет достаточно экономично решать задачи для широкого диапазона чисел Рейнольдса [11, 12]. Кинетическая энергия (k) и скорость диссипации турбулентной энергии (ε) могут быть определены из следующих выражений для стационарного потока:

$$\nabla(\rho \cdot k \cdot \vec{u}) = \nabla\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_k}\right)\nabla k\right] + G_k + G_b - \qquad (5)$$

$$-\rho \cdot \varepsilon - Y_M + S_k\,,$$

$$\nabla(\rho \cdot \varepsilon \cdot \vec{u}) = \nabla\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - \qquad (6)$$

$$-C_{2\varepsilon} \cdot \rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon\,,$$

где μ_t – турбулентная вязкость; $Pr_{k,\varepsilon}$ – турбулентное число Прандтля для k и ε, соответственно; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ – константы k-ε модели турбулентности; G_k – генерационный член; G_b – кинетическая энергия выталкивающей силы; Y_M – вклад переменного расширения при турбулентности сжатия в общую скорость диссипации (обычно учитывается при больших числах Маха).

Константы, используемые в уравнениях (5) и (6), имеют следующие значения: $C_{1\varepsilon}$=1,44; $C_{2\varepsilon}$=1,92; $C_{3\varepsilon}$=1; Pr_k=1,0; Pr_ε=1,3.

Метод LES основан на том, что большие масштабы турбулентности рассчитываются явно, а эффекты более мелких вихрей моделируются с использованием правил подсеточного замыкания. Уравнения сохранения для моделирования крупных вихрей получаются фильтрованием мгновенных уравнений сохранения. LES для потоков определяет мгновенное положение «большого масштаба», разрешающего фронт пламени, но подсеточная модель требует учесть влияние малых масштабов турбулентности на горение. Для струйного пламени LES ухватывает низкочастотные изменения параметров, в отличие от RANS, когда в итоге получаются постоянные средние значения величин. При этом затрачиваются большие вычислительные мощности.

Граничные и начальные условия для расчетной области, приведенной на рис. 2, определены как:

- выходное сечение топливовоздушной смеси из подводящего канала (входное сечение в область горения):

$$x = 0;\ T_g = T_{g(in)};\ g_i = g_{i(in)} \qquad (7)$$

- выходное сечение из области горения:

$$x = L;\ \frac{\partial g_i}{\partial x} = 0 \qquad (8)$$

- осевая линия области горения:

$$y = 0;\ \frac{\partial g_i}{\partial y} = 0;\ \frac{\partial T_g}{\partial y} = 0 \qquad (9)$$

В связи с тем, что температура во фронте пламени больше 2000К, а в газовом потоке находятся трехатомные компоненты, такие как H_2O и CO_2, а также метан, в области горения будет иметь место влияние лучистого теплообмена на потери энтальпии в газовом потоке [13]. Несмотря на то, что некоторые авторы полагают, что влияние лучистого теплообмена при горении метана не оказывает существенного влияния на потери энтальпии в газовом потоке [14], в представленной автором модели используется модель излучения P-1, которая является упрощенной версией более общей модели P-N, основанной на разложении интенсивности излучения в ортогональный ряд сферических гармоник [15].

При моделировании горения метана для RANS-модели использовалась глобальная химическая реакция, предложенная в модуле Species Transport решателя Fluent: $CH_4+O_2=CO_2+2H_2O$. В расчетах использована модель диссипации вихря (Eddy-dissipation model), основанная на следующих предположениях: химическая реакция протекает достаточно быстро относительно диффузионных процессов в реагирующем потоке; когда реагенты смешиваются на молекулярном уровне, они мгновенно образуют продукты реакции; скорость реакции может быть прямо отнесена ко времени, которое необходимо для смешивания реагентов на молекулярном уровне. Известно, что такие допущения справедливы для случая, когда скорость протекания химической реакции во много раз больше скорости протекания других физических процессов, в частности диффузии. Оценка числа Дамкелера для реакции горения метана показала, что Da>>10. Поэтому использование модели EDCM является оправданным и обоснованным [4]. В случае использования модели диссипации вихря стадийный характер реакций горения не учитывается, а скорость глобальных реакций, приведенных выше, определяется масштабом времени турбулентного смешивания реагентов.

При моделировании горения для LES-модели использована более затратная в вычислительном плане PDF модель (probability density function). Для PDF модели учитывается двухстадийный характер реакции горения метана [16].

Для сравниваемых методов моделирования горения выбраны следующие настройки решателя Fluent: схема аппроксимации второго порядка (second order upwind) [17], число шагов 2000, время одного шага 0,001 с, сходимость по уравнению энергии 10^{-5}, по уравнению моментов 10^{-3}.

III. Результаты и их обсуждение

Основным преимуществом результатов CFD-моделирования является их наглядность и возможность их быстрой обработки и анализа. На рис.3 показаны результаты моделирования горения метана для LES и RANS подходов при начальной скорости метана 65 м/с и температуре 300 К. Температура метана и воздуха равны.

Рис. 3 показывает значительные расхождения в характере контуров температуры, полученных при использовании LES и RANS подходов. Так, если для контура LES модели наблюдается характерные для турбулентного течения вихри, то в результатах RANS модели изменение температуры является плавным. Это связано с тем, что LES подход основан на том, что большие масштабы турбулентности рассчитываются явно, а эффекты более мелких вихрей моделируются с использованием правил подсеточного замыкания. LES для потоков определяет мгновенное положение «большого масштаба», разрешающего фронт пламени, но подсеточная модель требует учесть влияние малых масштабов турбулентности на горение. Для струйного пламени LES ухватывает низкочастотные изменения параметров, в отличие от RANS, когда в итоге получаются постоянные средние значения величин [18]. При этом затрачиваются большие вычислительные мощности.

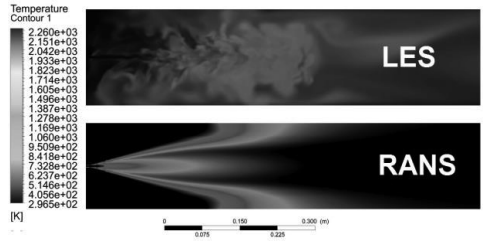


Рис. 3. Результаты CFD-моделирования горения при использовании LES и RANS подхода: контуры температуры

Для наглядности расхождения результатов моделирования турбулентности, на рис. 4 показаны контуры скорости для начальной скорости метана 65м/с.

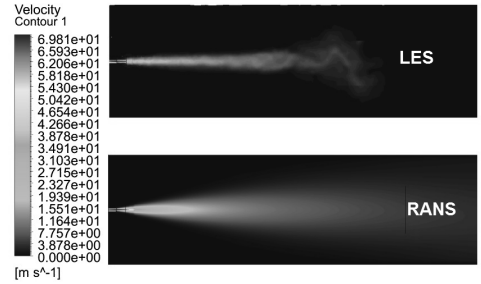


Рис. 4. Контуры скорости при турбулентном режиме течения при использовании LES и RANS подхода

На рис. 4 видно, что для результатов LES-подхода видны турбулентные вихри при движении топливно-воздушной смеси, в то время как, для результатов RANS-подхода турбулентные вихри осредняются и имеет место плавное изменение скорости вдоль оси горения. Однако, несмотря на значительные расхождения в характере контуров скорости, угол раскрытия струи топливно-воздушной смеси для LES и RANS подходов совпадает.

Рис. 5 показывает сравнение средней температуры по оси горения метана, полученной с помощью LES и RANS подходов. Относительное расстояние показывает

отношение осевого расстояния к половине общей длины области горения сгорания z/L. Здесь z/L=0 соответствует выходу топливовоздушной смеси из подводящего патрубка, z/L=1 – середине области горения. На рис. 5 видно, что максимальные расхождения между температурами наблюдаются для области развитого течения, когда турбулентные вихри оказывают заметное влияние на тепловой баланс в области горения [19]. При этом на начальном участке расхождения температур минимальные. Для RANS подхода наблюдаются более высокие температуры, так как в этом случае отсутствует перемещение линий тока, вызванных турбулентными вихрями.

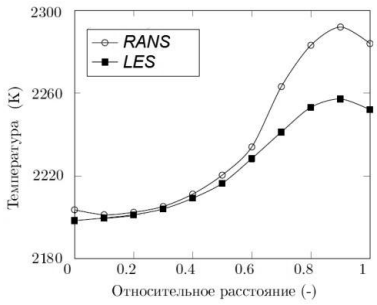


Рис. 5. Сравнение средней температуры по сечению оси горения для LES и RANS подходов

IV. Заключение

В работе представлены результаты численного исследования горения метана для LES и RANS подходов моделирования динамики движения жидкости. В LES подходе использована PDF-модель (probability density function model) химической кинетики горения метана, в RANS подходе использована модель диссипации вихря (eddy dissipation concept model). Численное моделирование выполнено для турбулентного режима течения при начальной скорости метана 65 м/с и температуре 300К.

Результаты показали значительное расхождение характера контуров температуры и скорости, полученных при LES и RANS подходе. Так, в контурах температуры, полученных с помощью LES подхода наблюдаются устойчивые турбулентные вихри, в то время для контуров температуры, полученных с помощью RANS подхода, наблюдается плавные развитие течения. Это связано с тем, что при использовании LES подхода большие масштабы турбулентности рассчитываются явно, а эффекты более мелких вихрей моделируются с использованием правил подсеточного замыкания. Уравнения сохранения для моделирования крупных вихрей получаются фильтрированием мгновенных уравнений сохранения. LES для потоков определяет мгновенное положение «большого масштаба», разрешающего фронт пламени, но подсеточная модель требует учесть влияние малых масштабов турбулентности на горение. Для струйного пламени LES ухватывает низкочастотные изменения параметров, в отличие от RANS, когда в итоге получаются постоянные средние значения величин. При этом затрачиваются большие вычислительные мощности.

Сравнение средних температур в радиальных сечениях области горения показало, что максимальное расхождение в результатах имеет место в области развитой турбулентности. При этом на начальном участке, прилегающем к выходу метана, расхождение температур минимально.

Список литературы

[1] Slotnick, J., Khodadoust, A., Alonso, J.. CFD vision 2030 study: a path to revolutionary computational aerosciences. – NASA. 2014.

[2] Norton D. G., Vlachos D. G. Combustion characteristics and flame stability at the microscale: a CFD study of premixed methane/air mixtures // Chemical engineering science, 2003. №. 21 (58). – с.4871-4882.

[3] Pashchenko D. Comparative analysis of hydrogen/air combustion CFD-modeling for 3D and 2D computational domain of micro-cylindrical combustor //International Journal of Hydrogen Energy. 2017. №. 49 (42). – с. 29545-29556.

[4] Пащенко Д.И. CFD-моделирование горения синтетического топлива систем термохимической регенерации тепла // Физика горения и взрыва. 2018. №6. – с.50-58.

[5] Ansys Fluent theory guide // ANSYS Inc., USA. – 2011.

[6] Смирнов Е. М., Гарбарук А. В. Течения вязкой жидкости и модели турбулентности: методы расчета турбулентных течений //СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2010.

[7] Soave G. Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state //Chemical engineering science. 1972. №. 6 (27). – С. 1197-1203.

[8] Nanduri J. R., Parsons D. R., Yilmaz S. L. Assessment of RANS-based turbulent combustion models for prediction of emissions from lean premixed combustion of methane // Combustion Science and Technology. 2010. №7. – с. 794-821.

[9] Janicka J., Sadiki A. Large eddy simulation of turbulent combustion systems //Proceedings of the Combustion Institute. 2005. №. 1 (30). – с. 537-547.

[10] Секундов А. Н., Чепрасов С. А., Якубовский К. Я. Сопоставление результатов моделирования полей CO на фронте пламени методами RANS и LES //Теплофизика высоких температур. 2015. №. 5 (53). – с. 747-751.

[11] Vervisch L., Hauguel R., Domingo P. Three facets of turbulent combustion modelling: DNS of premixed V-flame, LES of lifted nonpremixed flame and RANS of jet-flame // Journal of turbulence. 2004. № 5(4) – с.1-8.

[12] Kong S. C., Han Z., Reitz R. D. The development and application of a diesel ignition and combustion model for multidimensional engine simulation //SAE transactions. 1995. - с. 502-518.

[13] Semenov B. A., Pashchenko D. I., Mitenev S. A. Mathematical modelling of heat transfer in a gas radiant of “dark” type //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing. 2018. №. 1 (1111). – с.012008.

[14] Wenming Y., Dongyue J., Kenny C.K.Y., Dan Z. Combustion process and entropy generation in a novel microcombustor with a block insert // Chemical Engineering Journal. 2015. №. 274. – с. 231-237.

[15] Arablu M., Poursaeidi E. Using CFD for NO x emission simulation in a dual fuel boiler //Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2011. №. 4 (47). – с. 426-435.

[16] Wenming Y., Dongyue J., Kenny C.K.Y. Combustion process and entropy generation in a novel microcombustor with a block insert // Chemical Engineering Journal. 2015. №274. – с. 231-237.

[17] Warming R. F., Beam R. M. Upwind second-order difference schemes and applications in aerodynamic flows //AIAA Journal. – 1976. – Т. 14. – №. 9. – с. 1241-1249.

[18] Батраков П. А., Мракин А. Н., Селиванов А. А. Численное исследования процессов образования оксида азота в топках некруглого профиля //Динамика систем, механизмов и машин. 2016. №. 1 (2). – с. 318-323.

[19] Jones W. P., Prasad V. N. LES-pdf simulation of a spark ignited turbulent methane jet // Proceedings of the Combustion Institute. 2011. №. 1 (33). – с. 1355-1363.

Оценка влияния срывных явлений на характеристики вентилятора с помощью NLH метода

Попов Г.М.
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов
Самарский университет
Самара, Россия
grishatty@gmail.com

Горячкин Е.С.
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов
Самарский университет
Самара, Россия
evgeni0063@yandex.ru

Новикова Ю.Д.
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов
Самарский университет
Самара, Россия
y.d.novikova@gmail.com

Корнеева А.И.
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов
Самарский университет
Самара, Россия
akorneeva94@mail.ru

***Abstract*—The paper presents the results of numerical simulation of the effect of flow nonuniformities at the engine inlet on the working process of the engine fan. Flow nonuniformities is created by pushing the interceptor into the flow part of inlet device like as it is often done during field tests. The authors have created a numerical model capable of considering nonstationary processes in the fan using nonlinear harmonic analysis. As a result, qualitative and quantitative estimates were obtained of the influence of overlapping of the inlet duct by the interceptor on the main parameters of the fan workflow. It is shown that the more the duct is blocked, the more its parameters are deteriorated. Moreover, the deterioration is not linear, but according to the dependence of the 2nd order.**

Ключевые слова —входное устройство, входная кромка, отрывное течение, входная неоднородность,расчетная модель

I. Введение

Входные устройства турбореактивных двухконтурных двигателей (отличающихся повышенной степенью двухконтурности) современных пассажирских самолетов имеют большое проходное сечение, относительно коротки (их длина менее диаметра). Казалось бы, что потери в таких условиях должны быть минимальны во всех условиях типового полета. Однако в некоторых случаях (например, при сильном боковом ветре, полете со скольжением вбок и т.д.) на входной кромке воздухозаборника возникает отрывное течение, которое приводит к тому, что поток на входе в вентилятор становится неравномерным. Это в свою очередь является причиной существенного снижения эффективности компрессора низкого давления (КНД) и двигателя в целом. Кроме того, входная неравномерность является причиной колебаний лопаток вентилятора, что может привести к их разрушению.

В данной работе авторы ставят своей целью проверить возможность проведения расчетного исследования влияния входной неоднородности на рабочий процесс (эффективность) вентилятора ТРДД, воспроизведя испытания со входным имитатором. Также будет дана качественная и количественная оценка влияния входной неоднородности на основные параметры рабочего процесса вентилятора ТРДД.

II. Объект исследования

В качестве объекта исследования был выбран вентилятор турбореактивного двухконтурного двигателя НК-56 (рис. 1), разработанного в ПАО «Кузнецов» для самолетов гражданской авиации в начале 1980 х годов, но не попавшего в серийное производство. Основные параметры двигателя НК-56 приведены в таблице 1 [1].

ТАБЛИЦА I. Основные параметры двигателя НК-56 [4]

Тяга, кН	Степень повышения давления	Температура газов перед турбиной, К	Степень двухконтурности
177	25,5	1571	4,8
Удельный расход топлива (M=0, H=0), кг/кНчас	Удельный расход топлива (M=0,8, H=11км), кг/кНчас	Наружный диаметр, м	Масса с реверсом, кг
39,1	63,75	2,05	3340

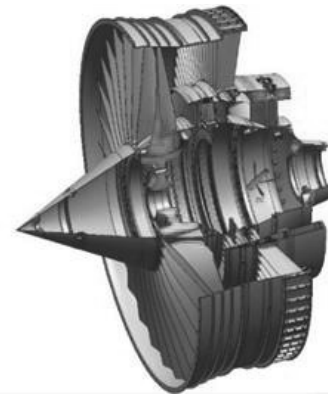


Рис. 1. Каскад низкого давления двигателя НК-56

Внешний вид исследуемого вентилятора представлен на рис. 1. Число рабочих лопаток – 30. Информация о геометрии вентилятора и некоторые результаты его испытаний (в виде внутренних отчетов фирмы) была передана ПАО «Кузнецов» в Самарский национальный исследовательский университет в рамках проведения совместных исследований.

III. Описание базовой расчетной модели рабочего процесса компрессора низкого давления двигателя НК-56

Для проведения исследований в программном комплексе Numeca FineTurbo [2] была создана расчетная

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

модель КНД двигателя НК-56, включающая в себя вентилятор с подпорной ступенью.

При создании расчетной модели были приняты следующие допущения:

- между доменами РК и НА использовались интерфейсы Mixing Plane;
- течение в каждом венце НА и РК обладает свойством циклической симметрии;
- свойства рабочего тела описываются моделью идеального газа с учетом переменности теплоёмкости и вязкости в зависимости от температуры рабочего тела;
- теплообмен между стенками проточной части и потоком отсутствует.

В расчетах использовались модели турбулентности Spalart-Allmaras и k-epsilon.

Геометрия расчетной области была создана в соответствии с чертежами, переданными ПАО «Кузнецов». Расчетная область включала в себя входной участок, рабочее колесо (РК) и направляющие аппараты (НА) вентилятора, участок канала второго контура и вторую ступень КНД с опорой двигателя (рис. 2). При построении модели учитывалась деформация рабочих лопаток от действующих на них сил.

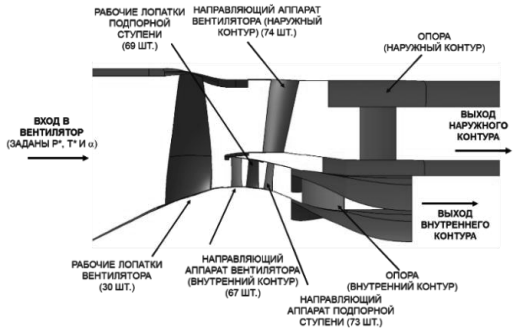
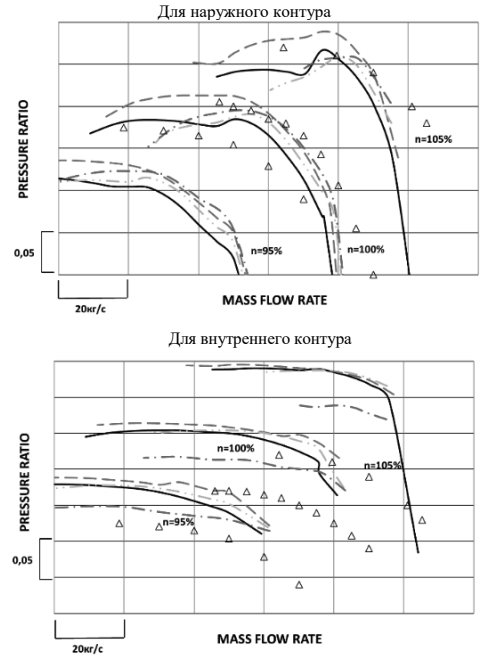


Рис. 2. Внешний вид расчетной модели вентилятора с подпорными ступенями

Для расчетной модели было создано две сеточных модели: легкая (всего 2,36 млн. конечных объемов, Y+ более 7) и тяжелая (7,06 млн. конечных объемов, Y+ более 2).

IV. Верификация расчетной модели компрессора низкого давления двигателя НК-56

На первом этапе исследования была проведена оценка адекватности и валидация созданной расчетной модели. Для этого расчетные характеристики, полученные с помощью различных стационарных моделей, отличающихся моделью турбулентности и густотой сетки конечных объемов, сопоставлялись с результатами испытания на стенде в составе двигателя, предоставленными ПАО «Кузнецов». Сопоставление полученных в результате стационарного расчета результатов с экспериментальными данными приведено на рис. 3 и 4 и таблице II.



△ - данные эксперимента; ▬ ▬ - модель №1
▬▬ - модель №2;
▬ ▪ ▬ - модель №3; ▬ ▪ ▪ - модель №4

Рис. 3. Сопоставление напорных характеристик, полученных с помощью созданных расчетных моделей, с экспериментальными данными

ТАБЛИЦА II. Сопоставление результатов расчетов, полученных с помощью рассмотренных численных моделей с данными ПАО «Кузнецов»

№ модели	Сетка	Модель турбулентности	Отклонение расчетов по численной модели относительно данных ПАО «Кузнецов»					
			КПД внутреннего контура	КПД наружного контура	Расход внутреннего контура	Расход наружного контура	$\pi_к^*$ внутреннего контра	$\pi_к^*$ наружного контра
1	2,36 млн.	Spalart-Allmaras	Больше на 0,5...2%	Больше на 3...6%	Ниже на 6%	±2%	Больше на 0,05	Больше на 0,07...0,13
2	2,36 млн.	k-epsilon	Больше на 0...1%	Больше на 3...6%	Ниже на 4%	±2%	Больше на 0,03	Больше на 0,05...0,12
3	7,06 млн.	Spalart-Allmaras	Больше на 1,5%	Больше на 2%	±2%	±2%	Совпадает	Больше на 0,02
4	7,06 млн.	k-epsilon	Больше на 1...3%	Больше на 1,5...5%	Ниже на 3%	±2%	Больше на 0,02	Больше на 0,03...0,1

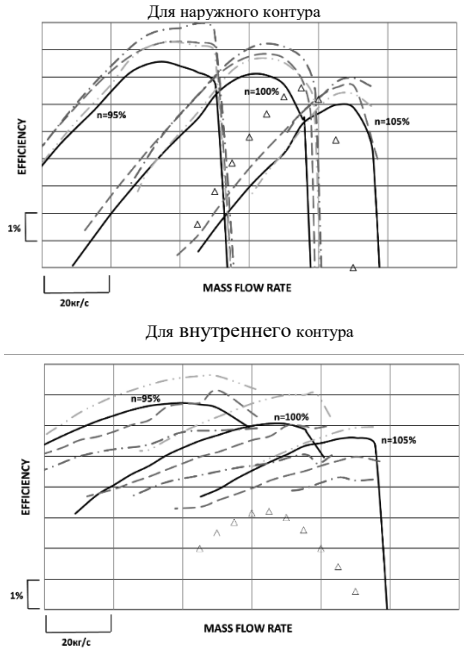


Рис. 4. Сопоставление КПД характеристик, полученных с помощью созданных расчетных моделей, с экспериментальными данными (обозначения соответствуют таковым на рис. 3 – экспериментальные данные известны только для частоты вращения 100%)

Анализируя данные, представленные на рис. 3 и 4 и в таблице II можно прийти к следующим выводам:

- не одна из созданных расчетных моделей не показывает полного совпадения с экспериментальными характеристиками во всем рассматриваемом диапазоне интересующих параметров;
- все расчетные модели показывают существенно завышенные значения степени повышения давления в наружном контуре, но в тоже время хорошо предсказывают характеристики внутреннего контура;
- все расчетные модели показывают завышенные значения КПД, особенно в наружном контуре (разница достигает 6%);
- значение расхода рабочего тела, при котором достигается максимальное значение КПД, для наружного контура хорошо согласуется с данными проектного расчета, в то время как для внутреннего контура полученное значение расхода, как правило, занижено на 2…4%;
- наименьшее расхождение для наружного контура наблюдается при большой частоте вращения ротора (n=105%), а для внутреннего контура - при малой (n=95%);
- учет реальной деформации лопатки с помощью спряженного моделирования прочности и газовой динамики позволяет уменьшить количественное расхождение данных расчета и проектных данных. Качественно характер расчетных характеристик КНД при этом не меняется.

Из всех рассмотренных моделей, наилучшее совпадение с данными проектного расчета показывает модель №3 (густая сетка и модель турбулентности Spalart-Allmaras). Она и принимается в качестве окончательной для дальнейших исследований рабочего процесса в межлопаточных каналах вентилятора.

Несмотря на полученные результаты, по мнению авторов не корректно говорить о том, что созданные расчетные модели непригодны для численного моделирования, либо пригодны только для грубой оценки. К сожалению, исследуемая постановка (двухконтурный вентилятор) является сложной как со стороны происходящих в них процессов (сложные трехмерные течения), так совместной работы двух контуров. По этой причине необходим дополнительный объем верификации по результатам экспериментальных данных (как по условиям испытания и имитации рабочих режимов, так и погрешностям изменения), по которым имеется более полный объем информации, нежели имеется для исследуемого вентилятора.

V. Расчетная модель для исследования оценки влияния входной неоднородности на характеристики вентилятора двигателя НК-56

На втором этапе исследования, на базе созданной и верифицированной расчетной модели рабочего процесса КНД двигателя НК-56 была создана расчетная модель для исследования влияния входной неравномерности на рабочий процесс его вентилятора.

Она создавалась таким образом, чтобы соответствовать условиям, которые имеют место при испытании вентилятора с имитатором входной неоднородности на стендах ПАО «Кузнецов». Там неоднородность моделируется путем выдвижения интерцептора в канал между лемнискатой и входом в вентилятор (рис. 5). Во время испытаний интенсивность входной неравномерности регулировалась глубиной выдвижения интерцептора в проточную часть канала.

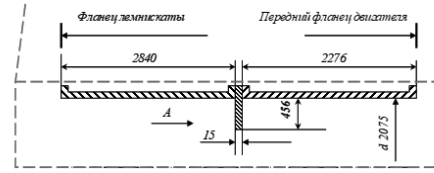


Рис. 5. Геометрия моделируемого варианта интерцептора во входном устройстве при испытаниях двигателя НК-56

Из-за сугубо переменного характера течения на входе в вентилятор, поставленную задачу следовало решать в нестационарной постановке. При этом, поскольку генерируемая интерцептором неравномерность имеет различную интенсивность, направление векторов скоростей по окружности РК, допущение о периодичности течения не может быть принято, и расчетная модель должна содержать все межлопаточные каналы.

Решение задачи исследования влияния входной неоднородности на рабочий процесс КНД с помощью нестационарного моделирования полноокружной модели (содержащий все каналы КНД ТРДД) требует запредельных компьютерных ресурсов, и не может быть успешно в приемлемые сроки с помощью доступного авторам вычислительной техники. По этой причине было принято решение проводить исследования с помощью метода нелинейного гармонического анализа (NLH) [3, 4], который позволяет получать нестационарные картины течения в разы быстрее, чем с помощью нестационарного моделирования.

NLH метод не мог быть применен для необходимого числа лопаточных венцов и при работе компрессора одновременно на 2 контура. По этой причине геометрия КНД была существенно упрощена: разделитель контуров был устранен (задача стала одноконтурной). Расчетная область содержала только РК и модельный НА («уделенный вверх» НА вентилятора внутреннего контура) (рис. 6), имитирующий влияние на ротор расположенных ниже по потоку элементов.

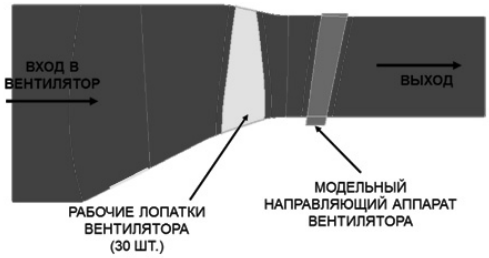


Рис. 6. Упрощенная геометрия вентилятора двигателя НК-56 для проведения исследования влияния входной неравномерности на его рабочий процесс

Ко входной границе доменов вентилятора был пристроен входной участок, имитирующий входной канала двигателя с интерцептором (рис. 7). Его геометрия создавалась в программном комплексе Numeca IGG. Было создано несколько вариантов его геометрии, отличавшихся длиной, на которую был выдвинут интерцептор. Общее число конечных объемов расчетной модели, показанной на рис. 12 – 4 млн. Сеточные модели доменов РК и НА были сделаны с настройками, соответствующим модели №3 КНД (см. выше).

Рис. 7. Расчетная модель для исследования влияния входной неоднородности на рабочий процесс вентилятора

VI. Результаты исследования влияния выдвижения интерцептора на рабочий процесс вентилятора ТРДД

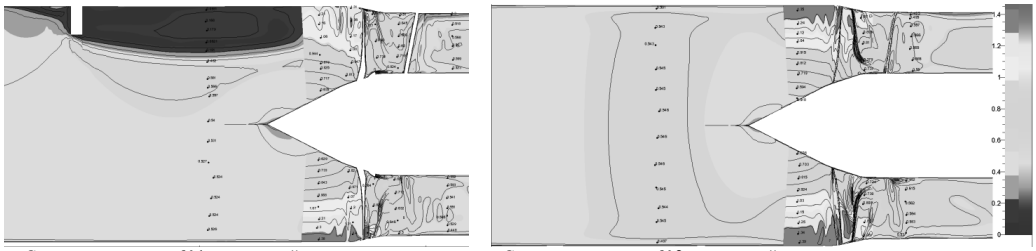
В ходе исследования была проведена серия квазинестационарных расчетов методом NLH, отличающихся расстоянием, на которое был выдвинут интерцептор. Анализ полученных результатов показал, что перекрытие проточной части входного канала интерцептором вызывает появление отрывной зоны на входе в вентилятор, которая оказывает существенное влияние на его рабочий процесс.

На рис. 8 в качестве примера показаны поля чисел Маха в относительном движении при выдвижении интерцептора в проточную часть так, что он перекрывает 6,8% проточной части канала, в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, проходящих через ось двигателя. Из него видно, что перед интерцептором образуется зона торможения потока, а за ним - развитая отрывная зона, достигающая входа в двигатель, находящегося на расстояние более величины его наружного диаметра (т.е. на величину более одного калибра). При этом часть потока, вошедшего в канал напротив интерцептора, перенаправляется к оси двигателя, вызывая местное ускорение потока, и меняя структуру канала там. То есть, введение интерцептора влияет не только на структуру непосредственно вблизи него, но на остальную часть подводящего канала на глубину более половины диаметра двигателя.

Указанные обстоятельства приводят к появлению существенной неоднородности по сечению поля давлений на входе в вентилятор (рис. 9). Видно, что за интерцептором образуется, и, с ростом степени выдвижения интерцептора, растет область пониженного полного давления за ним. При этом рис. 9 подтверждает, что с увеличением перекрываемой площади подводящего канала равномерность поля давления нарушается по всему поперечному сечению. И чем выше степень выдвижения – тем больше уровень неравномерности. Неравномерность потока с увеличением перекрытия проточной части интерцептором увеличивается линейно. Причем при перекрытии 13% неравномерность достигает 50%.

Описанные выше явления приводят к тому, что условия на входе в каждый межлопаточный канал и, соответственно, структура течения там получаются уникальными (рис. 10), нарушая взаимодействие соседних каналов и снижая степень повышения давления, КПД, запасы устойчивой работы и расход воздуха через вентилятор.

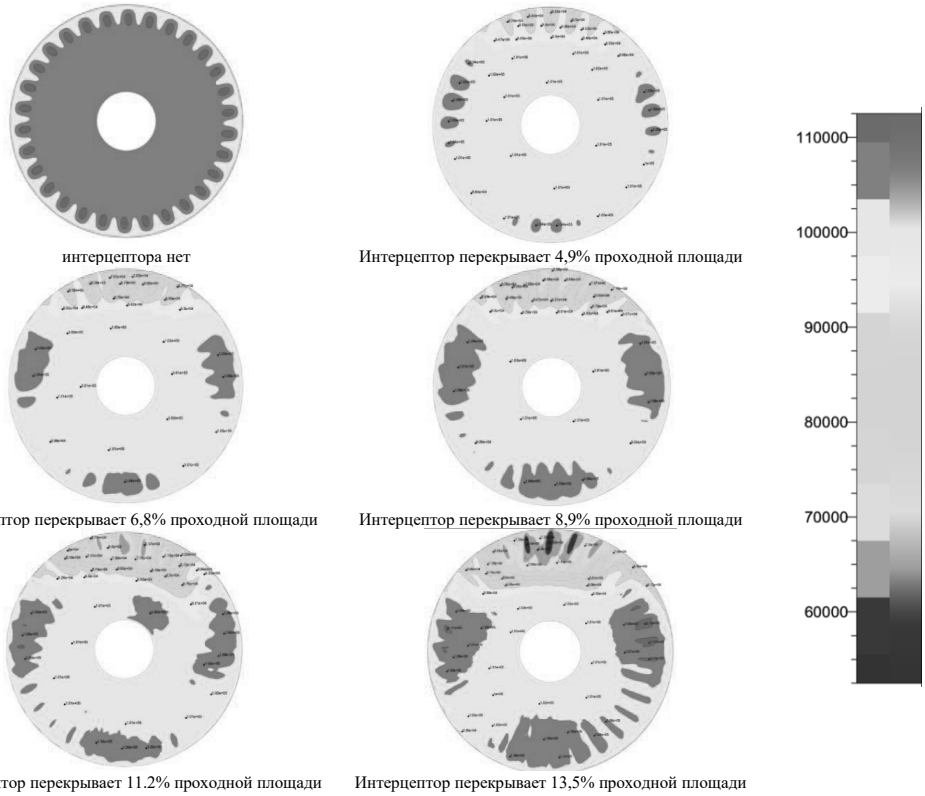
Влияние неоднородности на параметры рабочего процесса вентилятора при частоте вращения n=100% можно оценить по эволюции характеристик по мере перекрытия входного канала интерцептором (рис. 11). Из приведенных данных видно, что с ростом доли канала, перекрытого интерцептором, все параметры компрессора ухудшаются: уменьшается расход рабочего тела, степень повышения давления, КПД. Кроме того, диапазон расходов между режимами срыва и запирания также сокращаются, напорные линии становятся более вертикальными. Это сигнализирует о снижении устойчивости работы компрессора.



Сечение плоскостью №1 проходящей через ось двигателя перпендикулярно интерцептору

Сечение плоскостью №2 проходящей через ось двигателя перпендикулярно плоскости №1

Рис. 8. Полученное в расчете Поля изменения числа Маха в относительном движении в системе «входной канал + вентилятор» при выдвижении интерцептора так, что он перекрывает 6,8% проточной части канала



интерцептора нет

Интерцептор перекрывает 4,9% проходной площади

Интерцептор перекрывает 6,8% проходной площади

Интерцептор перекрывает 8,9% проходной площади

Интерцептор перекрывает 11.2% проходной площади

Интерцептор перекрывает 13,5% проходной площади

Рис. 9. Трансформация поля полного давления у входного фланца вентилятора при различной степени выдвижения интерцептора (вверху) в проточную часть подводящего канала

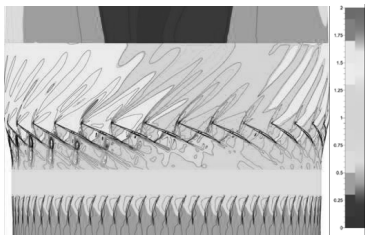
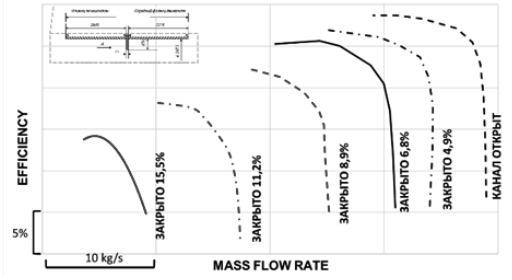


Рис. 10.Поля чисел Маха в относительном движении в периферийной части вентилятора (высота 98%) напротив места установки интерцептора

Количественная оценка влияния перекрытия проточной части входного канала на параметры рабочего процесса компрессора, полученная на основании анализа рис. 11 приведена на рис. 12. Как видно рост степени выдвижения интерцептора ухудшает параметры не линейно, а по параболической зависимости. Наименее всего изменится расход рабочего тела (при уменьшении площади входного канала на 10% снижается на 3%). Более всего изменяется разница между расходами запирания и срыва (при уменьшении площади канала на 10% снижается на 40%). При уменьшении площади канала на 10% КПД компрессора уменьшается на 11% (отн.), а степень повышения давления на 9%.

Напорная характеристика



КПД характеристика

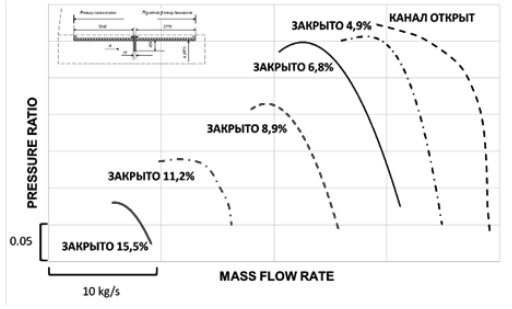


Рис. 11.Сравнение характеристик вентилятора при n=100% при разных значениях выдвижения интерцептора в поточную часть

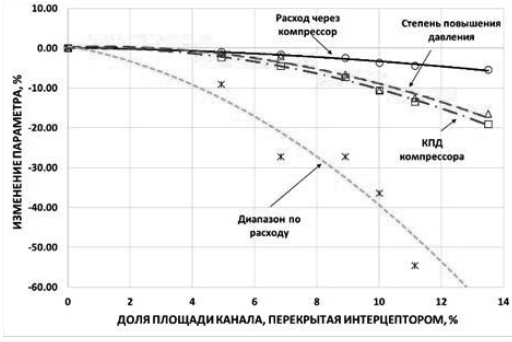


Рис. 12.Изменение основных параметров рабочего процесса компрессора при разных степенях перекрытия входного сечения

VII. Заключение

Для решения поставленной задачи авторами была разработана и верифицирована численная расчетная модель рабочего процесса входного устройства, выдвижного интерцептора – генератора входной неоднородности и ступени вентилятора ТРДД с помощью NLH подхода. Анализ результатов расчетов, проведенных с помощью созданной расчетной модели, показал, что:

- характеристики вентилятора, полученные в стационарной постановке, имеют более высокий запас устойчивой работы по сравнению с характеристиками, полученными с помощью нелинейного гармонического анализа;
- выдвижение интерцептора в проточную часть входного канала увеличивает неоднородность пролей давлений и скоростей на входе в вентилятор;
- интерцептор влияет не только на структуру потоку непосредственно вблизи себя, но и вызывает изменения в потоке на глубину более чем радиус вентилятора, за счет перераспределения расхода рабочего тела из области интерцептора в другие;
- неравномерность поля давления на входе в вентилятор с увеличением перекрытия проточной части интерцептором уменьшается линейно. Причем при перекрытии 13% неравномерность достигает 50%;
- с ростом доли канала, перекрытого интерцептором, все параметры компрессора ухудшаются: уменьшается расход рабочего тела, степень повышения давления, КПД, напорные линии становятся более вертикальными;
- рост степени выдвижения интерцептора ухудшает параметры не линейно, а по параболической зависимости;
- при уменьшении канала площади на 10% расход воздуха через компрессор уменьшился на 3%, КПД на 11% (отн.), степень повышения давления на 9%, разница между расходами запирания и срыва на 40%.

Список литературы

[1] Зрелов В.А. Отечественные ГТД. Основные параметры и конструктивные схемы. Часть 2. - Самара: СГАУ, 2002. -250 с

[2] NUMECA (https://www.numeca.com/home).

[3] Vilmin S., Lorrain É., Tartinville B., Capron A., Hirsch C., The nonlinear harmonic method: from single stage to multi-row effects // International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2013. №27(2). –с.88-99.

[4] The Nonlinear Harmonic module 2019 (https://www.numeca.com/product/nlhmethod).

Моделирование термостабилизирующего отжига органоморфных преформ из окисленного полиакрилонитрила

Просунцов П.В.
ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
Москва, Россия
pavel.prosuntsov@mail.ru

Богачев Е.А.
АО «Композит»
г. Королев, Московская область, Россия
eug-bogatchev@mail.ru

Елаков Е.Б..
АО «Композит»
г. Королев, Московская область, Россия
e_zann@mail.ru

***Abstract* — The simulation results of the polyacrylonitrile extruded organomorphic frame samples thermal stabilization process are presented. The local temperature maximum occurrence in the sample depth due to an exothermic oxidation reaction was confirmed. The possibility of the avalanche exothermic effect onset, which can lead to a sample burnout, is demonstrated theoretically. The analysis of the influence of the initial fiber oxidation degree on the sample temperature state have been carried out.**

Ключевые слова — технологичнский процесс, органоморфный каркас, полиакрилнитрил, термостабилизация, экзотермический эффект

I. Введение

Методы получения армирующих каркасов композиционных материалов характеризуются большим разнообразием технологий и оборудования [1]. В последнее время внимание исследователей привлекают органоморфные каркасы, состоящие, в частности, из карбонизованного спрессованного полиакрилонитрила (ПАНа) [2-4]. При производстве углерод-углеродных (УУКМ) и углерод-керамических композиционных (УККМ) материалов в качестве исходного сырья используется ПАН в виде жгутов из моноволокон или нетканых прессованных образцов. Первая стадия производства УУКМ и УККМ заключается в проведении термостабилизации (окисления) исходного ПАН сырья. В процессе термостабилизации происходит циклизация и окисление ПАН заготовки. С точки зрения технологии производства важным является тот факт, что процесс термостабилизации протекает с выраженным экзотермическим эффектом, поэтому слишком резкий нагрев ПАН заготовки может провести к выделению большого количества тепла и термическому пережогу заготовки. При производстве непрерывной углеродной нити [5-6] это тепло снимают при помощи обдува волокон значительными объемами воздуха, добиваясь разницы в температуре волокна по длине не более 2 градусов, что при термообработке прессованных заготовок (преформ) невозможно.

Объектом исследования являлись заготовки из нетканого полотна Оксипан®, состоящего из штапельных волокон частично окисленного полиакрилонитрила марки Ругон®. Из кусков полотна набирали плиты необходимой толщины, скрепленные иглопробивным способом с последующей подпрессовкой с усилием от 5 МН до 50 МН.

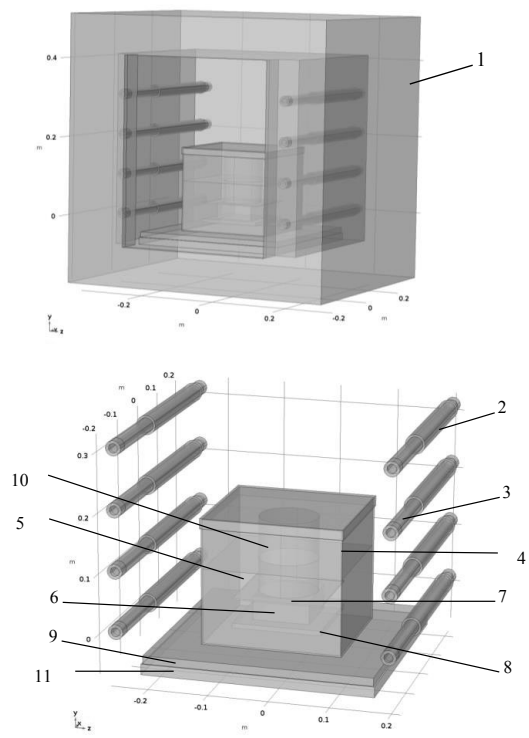
©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

Целью работы являлось оценка влияния экзотермического эффекта, происходящего при термостабилизации органоморфного каркаса, на температурное состояния образца.

II. Модель процесса термостабилизации

Моделировался процесс термообработки заготовки из прессованного органоморфмного каркаса в электрической печи (рис. 1). Источником нагрева являлись нагреватели из нихромовой проволоки, навитые на керамические трубки. Стальной контейнер с образцом размещался на керамической и стальной плитах, размещенных на поде печи. Образец органоморфного каркаса в виде плоской плиты из прессованного полиакрилонитрила размерами 95×95×40 мм находился между двумя стальными пластинами. На верхней поверхности образца для создания давления устанавливался стальной массивный груз. Для повышения равномерности нагрева образца контейнер заполнялся засыпкой из металлургического кокса до высоты примерно на две трети от его верха. Остальная часть контейнера оставалась свободной.

Были построены физическая и математическая модели теплообмена в печи термостабилизации. Рассматривался трехмерный нестационарный процесс комбинированного радиационно-кондуктивного теплообмена. При моделировании использовались экспериментально измеренная зависимость мощности нихромовых нагревателей от времени. При этом считалось, что данная мощность равномерно выделяется во всем объеме нагревателей. Процесс радиационного теплообмена рассматривался отдельно для двух зон – в основном объеме печи и в свободной от засыпки полости контейнера. В обоих случаях излучающие и отражающие поверхности тел считались серыми и диффузными. Газовая среда в объеме печи принималась диатермической лучепрозрачной. Конвективный теплообмен в объеме печи не учитывался. Также моделировался кондуктивный теплообмен во всех твердых телах – изоляции печи, керамических трубках и плите, корпусе контейнера, засыпке, грузе. Теплофизические характеристики всех материалов зависели от температуры. Считалось, что при термостабилизирующем отжиге в образце органоморфного каркаса происходят физико-химические превращения с выделением тепла. Принималось, что изменение степени завершенности процесса термостабилизации материала подчиняется закону Аррениуса.



1-теплоизоляция печи; 2 - нихромовые нагреватели; 3 - алундовые трубки; 4 - стальной контейнер; 5 - коксовая засыпка; 6 - образец органоморфного каркаса; 7-9 - стальные плиты; 10 - стальной груз; 11 - керамическая плита

Рис. 1. Геометрическая модель печи для термостабилизации с установленным в ней контейнером с образцом органоморфного каркаса

Значения энергии активации, предэкспоциальных множителей и тепловых эффектов термостабилизации на данном этапе исследования заимствовались из работ других авторов, ранее экспериментально изучавших процесс термостабилизации непрерывного ПАН-волокна [5, 6]. Однако, в отличие от [5, 6] в данном случае использовалось уже предварительно частично окисленное ПАН-волокно, то есть процесс физико-химических превращений в нем уже частично прошел. К сожалению, данные о конкретном значении степени окисления Оксипана® изготовитель материала не предоставляет. Поэтому было проведено параметрическое исследование влияния начального значения степени окисления окисления материала на температурное состояние образца.

III. Анализ влияния экзотермического эффекта на температурное состянние образца

Результаты моделирования показали (рис. 2 и 3), что температурное поле и поле завершенности процесса термостабилизации обладает достаточно высокой неоднородностью. Значительный перепад температуры в направлении оси X объясняется смещением образца относительно поперечной плоскости симметрии печи.

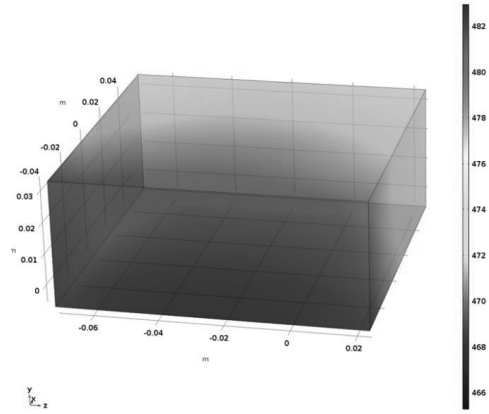


Рис. 2. Поле температуры в образце из органоморфного каркаса в момент времени 59700 с при начальной степени окисления материала 0.5, К

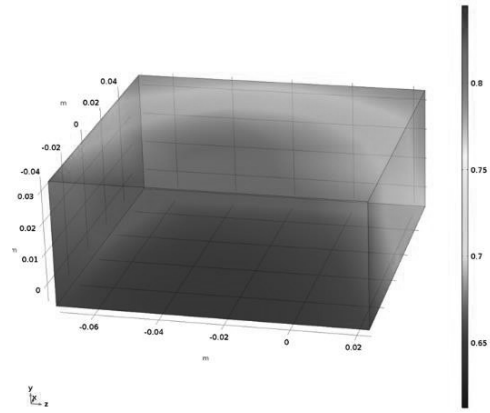


Рис. 3. Степень завершенности процесса термостабилизации в образце из органоморфного каркаса в момент времени 59700 с при начальной степени окисления материала 0.5

На рис. 4 и 5 представлено изменение температуры и степени завершенности процесса термостабилизации в образце. Видно (рис. 4), что температура в центре образца в зоне интенсивных физико-химических превращений выше, чем на внешней поверхности. Вследствие этого (рис. 5) и скорость физико-химических превращений в центре образца заметно выше, то есть в центре образца процесс превращения начинается позже и завершается раньше, чем на внешних поверхностях.

Максимальные значения объемного выделения тепла, характеризующего экзотермический эффект физико-химических превращений, который непосредственно связан со скоростью превращения, также существенно выше именно в центральной зоне образца (рис. 6). Анализ показал, что этот эффект объясняется затрудненным теплоотводом из центральной зоны, что связано с низким коэффициентом теплопроводности органоморфного каркаса (порядка 0,06 Вт/(м·К)).

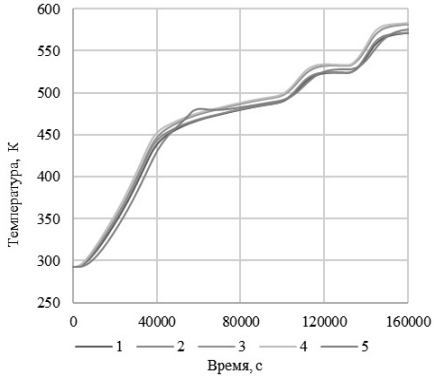


Рис. 4. Изменение температуры в угловых точках (1-4) и центре (5) образца

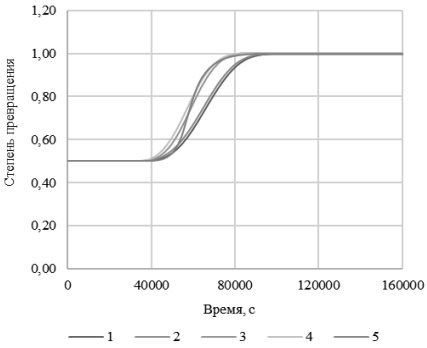


Рис. 5. Изменение степени превращения в угловых точках (1-4) и центре (5) образца

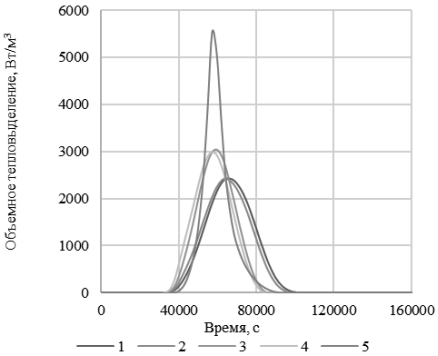


Рис. 6. Изменение объемного тепловыделения в угловых точках (1-4) и центре (5) образца

Результаты моделирования указывают, что за время порядка 160000 с процесс термостабилизации в образце из спрессованного Оксипана®, полностью завершается, при этом процесс окисления начинается с 40000 с от начала термостабилизации и практически заканчивается после 100000 с. Максимум экзотермического эффекта термостабилизации приходится примерно на 60000 с от начала процесса.

IV. Анализ влияния начальной степени окисления на температурное состояние образца

Изучение влияния начального значения степени окисления органоморфного каркаса показало, что экзотермический эффект, происходящий в центральной зоне образца, очень существенно влияет на динамику его температурного состояния (рис. 7). Видно, что превышение температуры в центре образца над периферийными зонами резко растет при снижении начальной степени окисления и при значении 0.25 начинается лавинообразный экзотермический эффект. В реальных условиях это может привести к пережогу и прогару органоморфного каркаса. На рис. 8 представлено изменение во времени температуры в центре образца при различных значениях начальной степени окисления по сравнению с вариантом отсутствия экзотермического эффекта. В то же время начальное значение степени окисления практически не оказывает влияния на динамику физико-химических превращений, т.е. время начала и конца процесса практически совпадает (рис. 9).

Временной момент наступления максимального значения объемного тепловыделения лишь незначительно смещается в область меньших значений, а вот сами максимальные значения тепловыделения сильно изменяются (рис. 10).

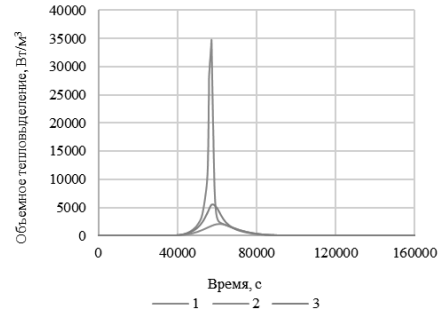


Рис. 7. Изменение степени превращения в центре образца при различных начальных значениях степени окисления 1 – 0,4; 2 – 0,5; 3 – 0,7

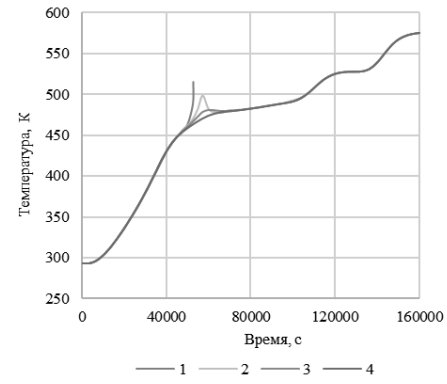


Рис. 8. Изменение температуры в центре при различных начальных значениях степени окисления 1 – 0,25; 2 – 0,40; 3 – 0,50; 5 – 0,70

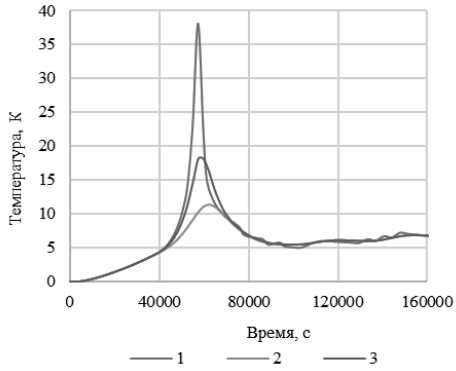


Рис. 9. Рост температурыв центре образца при различных начальных значениях степени окисления
1 – 0,4; 2 – 0,5; 3 – 0,7

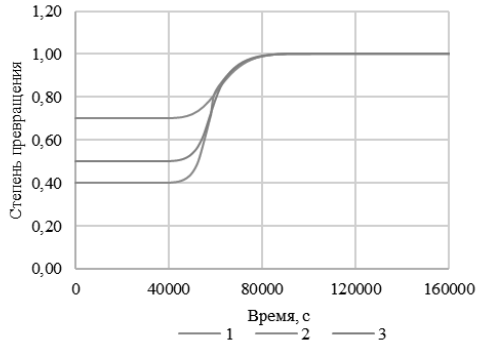


Рис. 10.Изменение объемного тепловыделения в центре образца при различных начальных значениях степени окисления
1 – 0,4; 2 – 0,5; 3 – 0,7

Результаты моделирования позволили скорректировать температурно-временной режим термостабилизации, минимизировать негативное влияние экзотермического эффекта в спрессованном массиве и исключить пережог материала в ходе пиролиза скомпактированных полимерных волокон.

Для оценки влияния экзотермического эффекта в прессованном массиве органоморфного каркаса было проведено экспериментальное измерение температуры в различных точках образца. Горячий спай одной термопары размещался в центральной части образца в предварительно подготовленном углублении, спай второй находился на краю образца. Сравнение экспериментальных и расчетных значений температуры показывает, что разработанная модель термостабилизирующего отжига адекватно отражает основные закономерности процесса термостабилизации.

V. Заключение

Анализ результатов моделирования указывает на следующие основные закономерности процесса термостабилизации:

- отрицательную величину перепада температуры между центром и краем образца до начала проявления экзотермического эффекта термостабилизации;
- существенное (до 10-15 К) превышение температуры в центре образца над температурой его края во время интенсивного превращения материала;
- существенную зависимость интенсивности экзотермического эффекта от начальной степени окисления материала каркаса;
- возможность начала лавинообразного экзотермического эффекта, который может привести к пережогу образца.

Список литературы

[1] Буланов И.М., Воробей В.В..Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. – М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 1998. 516 с.

[2] Способ изготовления пористого каркаса-основы композиционного материала/ Е.А. Богачев, А.Б. Елаков, А.П. Белоглазов, Ю.А. Денисов, А.Н. Тимофеев // Патент РФ №2620810 от 29.05.2017.

[3] Богачев Е.А. Высокотемпературные конструкционные материалы с минимальной структурной ячейкой/ Е.А. Богачев // Композиты и наноструктуры. 2017. Т. 9. №1. С.12-23.

[4] Ипрессконы – перспективные преформы для высокотемпературных композиционных материалов. / Богачев Е.А. // Сборник материалов VI Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества»: Суздаль, 2016. С.37.

[5] Бирюков В.П. Оптимизация процесса термостабилизации при получении углеродного волокна на основе ПАН. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: 2002, 341 с.

[6] Исаев А.С. Совершенствование тепловой работы печи термостабилизации при производстве углеродных волокон с целью снижения энергозатрат. Диссертацияна соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: 2016, 127 с.

Управление процессами обработки гетерогенных отходов

Пыстин В.Н.
НЦПЭ
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
Самара, Российская Федерация
vitaliy.pystin@yandex.ru

Шерстобитов Д.Н.
Кафедра ХТ и ПЭ
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
Самара, Российская Федерация
sherstobitovdn@gmail.com

Миннигуллова А.А.
Кафедра ХТ и ПЭ
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
Самара, Российская Федерация
emailalbina_694@mail.ru

***Abstract* — Industrial production is accompanied by the formation of side material flows, many of which do not find practical application and go into the category of waste. At the present time, along with the constant formation of new waste, a lot of accumulators have been formed, the contents of which are open heterogeneous systems. The most large-tonnage in large waste-forming spaces are heterogeneous systems represented by sludges, slags, ashes, and sludge. The dispersed components of these systems are preferably considered as technogenic raw materials, and both individual components isolated from waste and their transformation products can be demanded. Potentially, each of the heterogeneous wastes may be disposed of in a product with useful properties: fertilizers, building materials, sorbents, or directly into the target product of the main production process. Meanwhile, the genesis of the main volume of heterogeneous wastes implies the possibility of using them as soil-like reclamation materials for restoring disturbed geomedia.**

To ensure the possibility of using waste, it is necessary to process it using a combination of methods: conditioning, dehydration, mineralization, hardening. Despite the availability of technologies and equipment for processing heterogeneous wastes into products, the solution to the problem is hampered by the lack of an integrated systemic mechanism for assessing the properties and managing transformation into a product.

The paper discusses approaches to the creation of control systems that establish causal relationships between the states of heterogeneous wastes at selected stages of the life cycle, stages of conversion and phase transitions during sequential and parallel processing. The construction of process control systems for the processing of technogenic raw materials also makes it possible to predict the properties of the products obtained.

Ключевые слова — техногенное сырье; обезвоживание геоконтейнерное, минерализация, упрочнение, грунты, управление отходами.

I. Введение

Деятельность человека сопровождается образованием материальных потоков, многие из которых не находят применения и переходят в категорию отходов.

В отходообразующих пространствах наиболее крупнотоннажными выступают гетерогенные отходы – твердые, жидкие и пастообразные образования, твердая фаза которых представлена частицами минеральной и/или органической природы. Количество подобных образований составляет до 60 % от общего объема отходов. Потоки отходов в геосреду послужили причиной формирования накопителей, оказывающих отрицательное воздействие на окружающую среду.

Содержимое накопителей представлено шламами, шлаками, золами, илами и подобными им многокомпонентными дисперсными материалами. Существуют направления утилизации ряда отходов в качестве сырья. При этом могут быть востребованы как индивидуальные компоненты отходов, так и продукты их трансформации. Потенциально каждый из гетерогенных отходов может утилизироваться в продукт, обладающий полезными свойствами. Известны направления перевода гетерогенных отходов в продукты смежных производств, таких как удобрения, строительные материалы, сорбенты, а также в рециклаты основного технологического процесса их образования.

Управление состоянием подобных гетерогенных отходов может не только снижать нагрузку на окружающую среду, но и приносить прибыль. Отходы могут использоваться в качестве сырья или добавок для производства цемента, кирпича, клинкера, тепло- и шумоизоляционных материалов, вяжущих и др. [1-6].

Одним из наиболее распространенных направлений рециклирования гетерогенных отходов является производство на их основе грунтоподобных рекультивационных материалов (ГРМ). Данные материалы могут быть использованы для восстановления геосреды, нарушенной размещением отходов. Применение гетерогенных отходов для рекультивации обосновано тем, что использование подобных материалов предотвращает необходимость разработки карьеров природного грунта и снятия плодородного почвенного слоя. Количество данных отходов сопоставимо с потребностями предприятий в грунтах.

Препятствием прямого использования гетерогенных отходов в качестве материалов являются избыточная влажность, наличие органических включений, патогенной микрофлоры, нефтепродуктов, солей тяжелых металлов, низкая прочность дисперсной фазы.

II. Объекты исследования

В качестве объектов исследований выступали гетерогенные отходы предприятий Самарской области: осадки и избыточные активные илы очистных сооружений (ОПО и ИАИ), отходы затвердевшего расплава производства теплоизоляционного материала (ЗР), твердые коммунальные отходы (ТКО), нефтесодержащие шламы (НШ) и нефтезагрязненные грунты (НЗГ) нефтеперерабатывающих заводов, агропромышленные отходы (АПО), шламы водоподготовки различного генезиса (ШХВО), шламы оборотного водоснабжения (ШОВ), нефтесодержащие донные осадки (ДО), твердые коммунальные отходы длительного пребывания в геосреде (ТКО), буровые шламы (БШ), пульпы и отходы хвостохранилищ (ОХХ), золошлаковые отходы ТЭЦ (ЗШО), отходы производства асфальтобетонных смесей. Основные характеристики отходов представлены в таблице 1.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

ТАБЛИЦА I. ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЛАМОВЫХ ОТХОДОВ

Показатели	Ед. изм.	Наименование отхода						
		ОПО и ИАИ	***ТКО***	***ШХВО***	***ШОВ***	***ЗШО***	***НШ, НЗГ, ДО***	***БШ и ОХХ***
Физико-механические и водно-физические свойства								
Влажность	%	50-90	20-99	70-99	50-80	25-45	40-95	20-80
Удельное сопротивление фильтрации (УСФ)	10^{-10} см/г	50-1000	600-2900	70-1600	2000-6000	менее 300	-	500-9000
Плотность	кг/м^3	0,7-1,5	0,4-1,3	1,1-1,4	0,9-1,3	1,6-2,2	1,3-2,4	0,99-1,98
Преимущественный гранулометрический размер	мм	0,0001-0,001	0,001-0,005 1,0-100	0,001-0,05	0,0001-0,001	0,25-5,0	0,25-1,0	0,001-0,1
Петрохимический состав								
CaO	%	8,9-36,7	15,4-26,7	26,6-58,4	1,4-3,8	2,6-20,7	1,3-4,9	0,6-7,8
MgO		1,4-3,4	0,3-2,4	1,9-9,6	0,03-0,19	3,4-9,5	0,2-1,1	0,2-0,9
Al_2O_3		2,3-16,9	3,4-8,9	7,3-43,2	2,6-4,8	23,6-41,2	3,7-10,7	2,4-8,5
Fe_2O_3		5,0-18,7	12,3-42,7	2,9-43,6	10,3-31,5	2,4-6,5	2,8-16,2	12,7-24,9
SiO_2		15,2-49,6	20,4-37,8	7,4-19,3	23,7-41,9	35,8-53,9	26,7-60,3	30,6-51,4
Показатели экологического состояния								
Водородный показатель (pH)	ед.	6,5-7,5	4,5-10,5	7,7-9,5	6,8-8,4	6,1-8,7	5,4-8,3	7,9-10,8
Нефтепродукты	%	-	до 1,0	-	до 10	-	0,01-0,99	0,1-25,0
Содержание беззольного вещества	%	40-80	10-90	7,7-54,9	70-90	0-1,0	0,01-0,99	1,0-30,0
Органический углерод	% от массы сухого вещества	65-82	до 50	до 10	30,3-51,4	-	до 10	-
Азот общий		2,4-7,5	до 1	до 1	1,5-2,2	-	до 1	-
Общий фосфор		0,8-1,9	-	-	0,6-0,8	-	-	-
Общий калий		0,2-0,7	-	-	0,15-0,22	-	-	-
Общее микробное число (ОМЧ)	Кл/кг	до 10^{10}	до 10^8	до 10^6	до 10^9	-	-	-
Химическое загрязнение (Zc)	-	>128	>32	<32	<64	32-128	>128	>128
Активность радионуклидов, $A_{эфф.}$	Бк/кг	менее 370	менее 370	менее 370	менее 370	менее 1500	менее 370	менее 1500

Состав и свойства отходов имеют широкий диапазон изменения характеристик, а именно плотности, влажности, удельного сопротивления фильтрации, гранулометрических размеров, а также содержания органического углерода, наличия микрофлоры. С учетом перечисленного, необходимо разрабатывать индивидуальный подход к каждому виду отходов, рационально управлять преобразованием в форму, пригодную для дальнейшего использования.

Некоторые виды шламовых отходов с высокой влажностью необходимо обезвоживать. Золошлаковые отходы ТЭЦ за счет прочной матрицы можно использовать совместно с другими видами отходов для повышения их прочности. Осадки и избыточные активные илы станций аэраций, шламы оборотного водоснабжений благодаря высокому содержанию редуцирующей микрофлоры предпочтительно использовать для очистки от органических загрязнений углеводородной природы, в том числе нефтесодержащих шламов и замазученных грунтов. Снижение суммарного показателя химического загрязнения можно обеспечивать введением обезвреживающих компонентов (минеральных вяжущих, корректоров реакции среды).

III. УПРАВЛЕНИЕ ОБРАБОТКОЙ ГЕТЕРОГЕННЫХ ОТХОДОВ

Для перевода отходов в продукт необходима их обработка с применением совокупности методов: кондиционирования, обезвоживания, минерализации, упрочнения, фазового разделения, термической обработки. Несмотря на наличие большого количества методов и технологий переработки шламов в продукт, отечественного и зарубежного оборудования, решение проблемы сдерживается из-за отсутствия комплексного системного механизма оценки состояния и управления трансформацией гетерогенных отходов в продукт, который бы учитывал как исходных материалов, так и свойства получаемого продукта. Сдерживающими факторами использования отходов в качестве сырья по-прежнему выступают наличие доступной базы природных ресурсов, экономическая неэффективность ряда технологий обращения с отходами и сложность обработки одного наименования отхода с непостоянными составом и свойствами. В современных условиях актуальна совместная утилизация отходов с учетом свойств одних отходов благоприятно влияющих на корректировку свойств других.

При этом наряду с известными оценочными параметрами свойств необходим учет состояния гетерогенных отходов на выделенной стадии жизненного цикла, учет фаз и стадий конверсии в виде обобщенной структурной характеристики или группы взаимосвязанных характеристик во времени, а также поиск соответствия характеристик гетерогенных отходов на выделенных стадиях типу получаемого продукта. Сказанное также диктует необходимость разработки и адаптации технологий, учитывающих направление утилизации. В таблице 2 представлены некоторые примеры совместной обработки гетерогенных отходов с выделением стадий и направления использования продуктов, полученных на их основе.

Анализ таблицы 2 показывает, что индивидуальная и комплексная обработка отходов, как и пребывание отходов в геосреде, сопровождаются последовательной сменой состояний, описываемых функционально-временными характеристиками. При этом, именно управление процессами обработки на различных стадиях и переходах позволяет получать продукцию с требуемыми характеристиками и минимизировать воздействие на окружающую среду [7-12].

ТАБЛИЦА II. ПРИМЕРЫ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ И КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ОТХОДОВ

Виды дисперсных отходов	Функционально-временные характеристики	Стадия обработки или жизненного цикла	Переход	Продукция
АПО, ИАИ, НЗГ, ШОВ, НШ	Температурная	Минерализация углеводородов совместно с добавками (источники микрофлоры, разрыхлители, источники микроэлементов)	Мезофильно-термофильный	Рециркулиционный материал-инокулятор
			Окончание процесса	Грунты биологической рекультивации
БШ, отходы хвостохранилищ	Фильтрационная	Обезвоживание, капсулирование	Фильрационно-пластификационный	Выравниватели и материалы технического экранирования
			Пластификационно-консолидационный	
ШХВО, ЗШО, ШОВ	Агрегационная	Обезвоживание, слоевая минерализация, упрочнение	Пластификационно-агрегационная	Структуро- и барьерообразователи для создания отсекающих и секционирующих дамб
			Агрегационно-консолидационный	Основания для объектов пониженного уровня ответственсоти
ОПО и ИАИ	Температурная	Биотермическая обработка совместно с органоминеральными отходами	Мезофильно-термофильный	Источник редуцирующей микрофлоры
			Окончание процесса	Удобрения

Обезвоживание – одно из важнейших направлений обработки отходов, управление которым позволит возвратить в хозяйственное использование до 5 млн. т. ресурсов только в Самарской области. Обезвоживанию перед использованием должны подвергаться отходы с влажностью более 60 %, к подобным отходам относят БШ, ШХВО, в ряде случаев – ШОВ. Кроме того, данные гетерогенные отходы обладают высокой стабильностью, что при их разделении обуславливает низкую водоотдающую способность и необходимость предварительного кондиционирования.

Образование БШ происходит при проведении операций, связанных с ремонтом и строительством скважин, регенерации промывных растворов и отстаивании сточных вод в накопителях на нефтяных и газовых месторождениях. Для использования этого вида отхода необходимо его обезвоживание, которое в естественных условиях сдерживается значительной толщиной слоя и атмосферными осадками. В качестве элемента воздействия, позволяющего обезводить БШ в контролируемых условиях, применен геотекстильный контейнер, как альтернатива капиталозатратным установкам центрифугирования, фильтр-прессования и вакуум фильтрации. [13].

Перспектива применения контейнерного обезвоживания БШ сопряжена со спецификой строительства скважин, природой выбуренной горной породы, составом и назначением применяемого бурового раствора. В таблице 3 представлены предложенные группы показателей состояния исходного БШ и выходные параметры после их обработки. Входные параметры анализируются на стадии выбора метода обработки осадка (рис.1), выходные – являются индикатором достаточности мероприятий, осуществленных для конверсии БШ в техногенный грунт [13,14].

Основные этапы управления обезвоживанием гетерогенных отходов представлены на рис. 1. Собственно стадии обезвоживания предшествует анализ отходов для определения экологической целесообразности их обработки, а также выбор технологической схемы, включающий изучение водоотдающей способности системы.

ТАБЛИЦА III. ДИАПАЗОНЫ ЗНАЧЕНИЙ ОТДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЫХ ШЛАМОВ

Группа	Входной параметр				Выходной параметр			
	Наименование	*Обозначение*	*Ед.изм*	*Значения*	*Наименование*	*Обозначение*	*Ед.изм*	*Значения*
Токсикологическая	Содержание нефтепродуктов начальное	$С_{н/пр\ н.}$	% мас.	до 7,0	Содержание нефтепродуктов конечное	$С_{н/пр\ кон.}$	% мас.	≤ 1,0
	Солесодержа-ние исходное	$S_{исх}$	мг/л	>1000	Солесодержание конечное	$S_{кон}$	мг/л	<1000
	МЭД радионуклидов	$А_{эфф}$	Бк/кг	< 275,0	МЭД радионуклидов	$А_{эфф}$	Бк/кг	< 275,0
	Содержание тяжелых металлов	Z_c	Усл.ед.	<16	Содержание тяжелых металлов	Z_c	Усл.ед.	<10
Фильтрационная	Влажность начальная	$W_н$	%	78-95)±3	Влажность конечная	$W_к$	%	(55-65)±3
	Удельное сопротивление фильтрации	r	0^{-10}, см/	До 10^3	Удельное сопротивление фильтрации	r	0^{-10}, см/	До 10^5
	Гранулометрический состав	dч	мм	0,001-5,0	Не определяется			
Геомеханическая	Исходный модуль деформации	$Е_{исх}$	МПа	Не определяется	Конечный модуль деформации	$Е_{кон}$	МПа	≥ 0,9
	Число пластичности	$Mр_{ос}$	д.ед.		Число пластичности	$Mр_{тпм}$	д.ед.	≥ 5
	Показатель консистенции	$В_{ос}$	д.ед.		Показатель консистенции	$В_{тпм}$	д.ед.	0,7-1,6
	Плотность	$р_{ос}$	т/м^3	1,01-1,2	Плотность	$р_{тпм}$	т/м^3	≥ 1,5

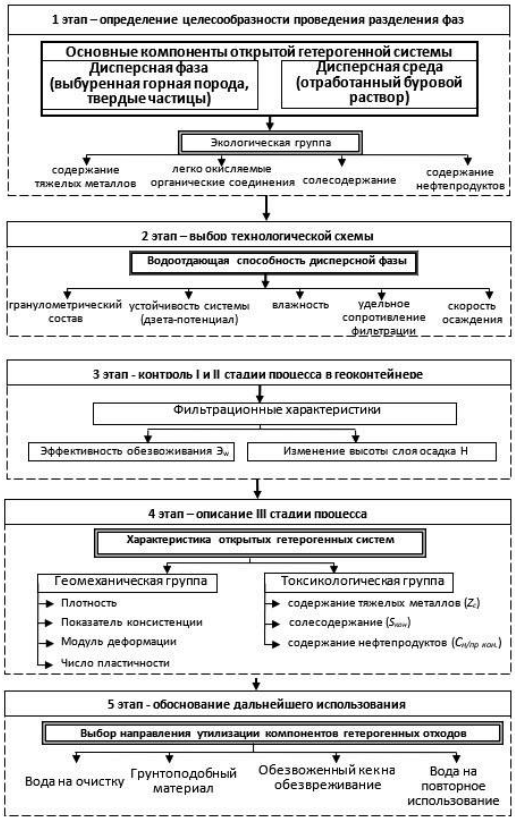


Рис. 1. Основные этапы управления обезвоживанием гетерогенных отходов

Контроль процесса обезвоживания в геоконтейнере осуществляется измерением параметра эффекта снижения влажности [14]:

$$\upsilon_w = \frac{d\Theta_w}{dt} \ [\%/\text{ч}], \qquad (1)$$

Влажность шлама, обработанного в фильтрующей оболочке в течении определенного периода процесса обезвоживания Т, контролируется выражением:

$$W_к = W_н - \frac{\upsilon_{w\text{-}c} T W_н}{100}, \qquad (2)$$

где $\upsilon_{w\text{-}c}$ - среднее значение скорости относительного снижения влажности шлама за период времени Т;

$W_н$ – начальная влажность шлама, %.

В ходе проведения исследований по геоконтейнерному обезвоживанию решались следующие задачи:

1) Изучение интенсивности обезвоживания различных образцов гетерогенных отходов. Выделение стадий обезвоживания и определение их продолжительностей;

2) Определение рационального диапазона массовых соотношений «отход – кондиционирующая добавка» для последующего обезвоживания шламовых смесей;

3) Исследование готовности обезвоженных отходов к утилизации или к дополнительной обработке;

Первым этапом исследований выступало определение водоотдающей способности исходных образцов шламов без внесения кондиционирующей добавки. Процесс обезвоживания шламов в лабораторном геоконтейнере для различных шламов представлен на рис. 2.

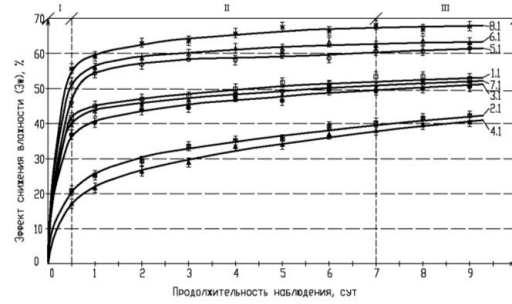


Рис. 2. Эффект обезвоживания в лабораторном геоконтейнере для различных образцов шламов; I, II, III – стадии обезвоживания.

На графике выделено три стадии обезвоживания:

I - стадия интенсивного обезвоживания (свободное обезвоживание под действием гравитационных сил);

II - стадия стесненного обезвоживания (интенсивное водоотделение прекращается, движущей силой процесса обезвоживания выступает испарение с поверхности фильтрующей оболочки). На данной стадии материал постепенно приобретает пластические свойства при достижении влажности близкой к влажности на границе текучести;

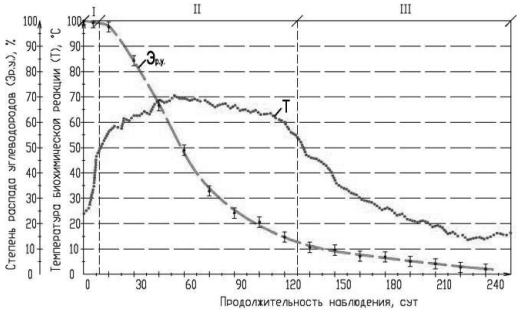
III - стадия пластификации, характеризующаяся постепенным изменением консистенции грунта из текучепластичного к твердому состоянию.

Процессы, происходящие в контейнере, обусловлены действием двух сил: силы гидростатического давления слоя шлама и капиллярной силы всасывания жидкости в межпоровое пространство. Величина силы капиллярного всасывания, действующая на жидкую фазу, может считаться постоянной, т.к. ширина и длина фильтрующего полотна постоянна. Величина силы гидродинамического давления будет изменяться с изменением толщины слоя и влажности суспензии на фильтрующем полотне [13]. Изменения показателей в фильтрующем контейнере обусловлены процессами обезвоживания и упрочнения. Удаление связанной и свободной влаги происходит через одностороннюю мембрану, на которой в последствии образовывается уплотненный шлам (кек). В контейнере происходит уплотнение исходного материала за счет агломерации частиц в процессе слеживания обезвоживаемого шлама и появления пластификационных связей в твердой фазе. Управление процессом обезвоживания может заключаться в снижении удельного сопротивления

фильтрации (УСФ) путем кондиционирования (разрушение структуры, снижение дзета-потенциала, повышение гранулометрии). Например, при значении УСФ более $1000*10^{-10}$ см/г возможно проведение работ по кондиционированию гетерогенных отходов внесением коагулянтов или золошлаковых отходов. Обезвоживание, как правило, выступает первой стадией обработки гетерогенных отходов. Дальнейшее их использование может сдерживаться наличием органики. Удалить органическую компоненту химической и/или биологической природы можно путем осуществления процесса биодеструкции.

Деструкция органики протекает с образованием фермент-субстратных комплексов и подчиняется законам ферментативной кинетики.

Ниже представлен график распада углеводородов (Эр.у.) в гетерогенных отходах при внесении материалов, содержащих микроорганизмы-биодеструкторы. (рис. 3). На рисунке также отображен график температурной функционально временной характеристики биохимической реакции (Т).



Условные обозначения: I – Фаза роста температуры (индукция);
II – Фаза высоких температур (интенсивная биодеструкция);
III – Фаза медленного падения температур.

Рис. 3. Ход процесса биодеструкции

При биотермическом компостировании органоминеральных отходов обычно выделяют 3 микробиальные фазы. В первой фазе при повышении температуры происходит усиленное размножение неспороносных мезофилов. Далее, за счет увеличении температуры до 50-70ºС, происходит развитие бактерий-термофилов, которые разлагают более стойкие соединения углеводородов, используя в качестве субстрата отмершие клетки мезофилов. Фаза быстрого возрастания температуры обычно составляет от 1 до 10 суток. Во второй фазе (высоких температур или интенсивной биодеструкции) происходит быстрый рост термофильных бактерий, длительность которой составляет до 4 месяцев при температуре до 70ºС, распад нефтепродуктов составляет 90%. На третье фазе происходит дозревание и медленное падение температуры при постепенном отмирании термофильных бактерий, так как израсходованы легкодоступные формы питания. Следом развиваются терморезистентные формы споровых бактерий, мезофильные актиномицеты и грибы, которые используют в качестве источника питания отмершие тела термофилов, а также тяжелоокисляемую органику. Это самая продолжительная фаза, длящаяся от 3 месяцев до года. Анализ температурной функционально временной характеристики позволяет управлять процессом биодеструкции. Так снижение температуры при проведении процесса оперативно сигнализирует об ингибировании биохимической реакции продуктами жизнедеятельности микроорганизмов и является сигналом к началу процесса аэрации.

Кроме того, выделение фаз процесса позволяет оптимизировать процесс биодеструкции путем оформления конструктивно-технологических зон на объектах обработки отходов, специально предназначенных для протекания соответствующей фазы.

Также в качестве примера представлены графики полной обработки гетерогенных отходов, образующихся при водоподготовке (ШХВО), с применением методов геоконтейнерного обезвоживания, мезофильной слоевой биодеструкции совместно со шламами оборотного водоснабжения (рис. 4).

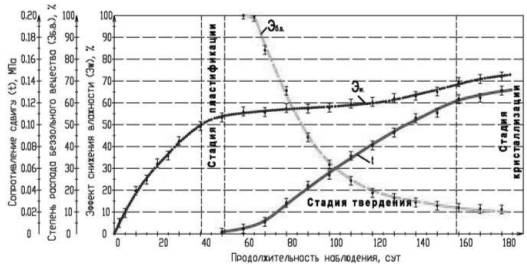


Рис. 4. Изменение характеристик ШХВО при его постадийной обработке (Условные обозначения: Эб.в. – степень распада беззольного вещества; Эw – эффект снижения влажности; t – сопротивление сдвигу).

Здесь же представлена деформационно-временная характеристика (t), как инструмент анализа состояния обрабатываемых отходов для контроля качества готового материала.

Еще одним примером управления гетерогенными отходами является усадка полигонов ТКО. Данный вид управления позволяет минимизировать площади, отводимые под размещение отходов, путем сокращения продолжительности и увеличения осадки их массивов. Интенсификация процесса осадки осуществляется закачкой нефтесодержащих отходов и ИАИ очистных сооружений в качестве источника микрофлоры-деструктора в массив ТКО [15]. Поиск оптимального количества вводимых компонентов осуществлялся экспериментально на выделенных площадках полигона размещения отходов. Для биоразложения органики в массиве была предусмотрена система высоконапорной аэрации. Расход воздуха, необходимого для окисления органики теоретически определяется по стехиометрической потребности в кислороде. На практике общий максимальный расход воздуха, необходимый для полного разложения органики составляет 6,8 литра на 1 грамм. Диапазон концентраций вводимой органики в смесях отходов, подвергаемых компостированию, лежал в пределах от 10000 до 50000 мг/кг. Величину осадки определяли по формуле:

$$H_{ос} = h \cdot e^{-\frac{\tau}{T}}, \quad (3)$$

где $H_{ос}$ – величина осадки, м;

h – начальное значение высоты, м;

τ – текущее время осадки, сут.;

T – постоянная времени процесса осадки, в сут.

Время максимальной осадки отходов составляет:

$$t = 3 \cdot T, \quad (4)$$

где T – постоянная времени процесса осадки, в сут., t – время, при котором процесс осадки входит в зону 5% от величины установившегося значения осадки, т.е. t – время окончания процесса.

В ходе эксперимента были установлены оптимальные значения количества вводимой органики, составляющей 1-2% от массы размещенных отходов. Данное количество обеспечивало максимальную осадку и скорость массива, а также не приводили к ингибированию микрофлоры-деструктора.

Помимо рассмотренных методов управления гетерогенными отходами, включающие их кондиционирование, обезвоживание, минерализацию, повышение прочности, осадку, важной задачей выступает контроль и управление экологическими характеристиками. Предложен комплексный показатель снижения токсичности, учет которого позволяет производить материалы с заданными экологическими параметрами. Суть применения параметра заключается в определении индекса снижения токсичности и при необходимости осуществления контроля и изменения этого показателя. Управление заключается в использовании методов снижения токсичности в процессе обработки, к которым относится, в том числе минерализация, известкование, солидификация.

Предложенный показатель степени снижения токсичности, характеризует уровень связывания загрязняющих веществ и минимизации их миграционной способности:

$$S_{с.т.} = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_{iбш} / C_{iрм}}{n \times (M/m)}, \quad (5)$$

где $S_{с.т.}$ – показатель степени снижения токсичности, $C_{iбш}$ и $C_{iрм}$ – начальная и конечная концентрация i-го вещества в буровом шламе и грунтовом материале соответственно, n – количество рассматриваемых загрязняющих веществ, M/m – частное, учитывающее изменение массы, где M – масса продукта, m – масса исходного отхода.

Данный коэффициент можно применять для обоснования минимального количества реагента, достаточного для обработки гетерогенной системы с заданными экологическими характеристиками, либо обеспечить запас реагентов для гарантированного обезвреживания отхода непостоянного состава и свойств.

IV. Заключение

Рассмотренные подходы к управлению состоянием гетерогенных отходов позволяют осуществлять их обработку с получением целевых продуктов. Выделение фаз, стадий обработки и установление закономерностей процесса позволяет оформлять конструктивно-технологические зоны объектов обработки отходов. Комплексный подход к управлению отходами с их совместной обработкой повышает экологическую и экономическую эффективность утилизации гетерогенных отходов за счет вовлечения одних видов отходов в процессы обработки других.

Список литературы

[1] Тараканов О.В., Пронина Т.В., Тараканов А.О. Применение минеральных шламов в производстве стро-ительных растворов // Строительные материалы. 2008. № 4. С. 68–70.

[2] Чумаченко Н.Г., Коренькова Е.А. Промышленные отходы — перспективное сырье для производства строительных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 3. С. 20–24.

[3] Шайхиев И.Г. Валеев Р.Ш. Утилизация шламовых отходов теплоэнергетических централей при производ-стве строительных материалов // Экология и промышлен-ность России. 2010. № 2. С. 28–29.

[4] Sales A., Rodrigues de Souza F., do Couto Rosa Al-meida F. Mechanical properties of concrete produced with a composite of water treatment sludge and sawdust // Construc-tion and Building Materials. 2011. No. 25. Pp. 2793–2798.

[5] Julcour Lebigue C., Andriantsiferana C., Krou N.et al. Application of sludge-based carbonaceous materials in ahybrid water treatment process based on adsorption and cata-lytic wet air oxidation // Journal of Environmental Manage-ment. 2010. No. 91. Pp. 2432–2439.

[6] Chung-Ho Huang, Shun-Yuan Wang Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate // Construction and Building Materials. 2013. No. 43. Pp. 174–183.

[7] Патент № 2175580 РФ. Состав для очистки почвы от нефтяных загрязнений и способ очистки почвы от нефтяных загрязнений [Текст] / Чертес К. Л., Быков Д. Е., Стрелков А. К., Тараканов Д. И., Радомский В. М., Шинкевич М. Ю., Атанов Н. А., Бурлака В. А., Лапкин А. Г. – Опубл. 10.11.2001, Бюл. № 31.

[8] Патент № 2249580 РФ. Способ обработки и утилизации органосодержащих отходов [Текст] / Чертес К. Л., Быков Д. Е., Тупицына О. В., Радомский В. М., Седогин М. П., Ендураева Н. Н. – Опубл. 10.04.2005, Бюл. № 10.

[9] Патент № 2250146 РФ, МПК 7 B09C1/10. Способ переработки нефтешламов и очистки замазученных грунтов [Текст] / Быков Д. Е., Бурлака В. А., Чертес К. Л., Шинкевич М. Ю. – Опубл. 20.04.05.

[10] Патент № 85472 РФ, МПК C 02 F 3/00; C 02 F 3/02. Реактор доочистки сточных вод [Текст] / Тупицына О. В., Чертес К. Л., Быков Д. Е., Радомский В. М., Самарина О. А. – Опубл. 10.08.09.

[11] Патент № 2487767 РФ. Способ получения композиционных материалов для строительства на основе переработанных отходов [Текст] / Пыстин В.Н., Сафонова Н.А., Тупицына О. В., Чертес К. Л., Быков Д. Е., Радомский В. М. – Опубл. 20.04.2016, Бюл. № 11.

[12] Патент № 2584031 РФ. Способ переработки нефтешламов и очистки замазученных грунтов [Текст] / Чертес К. Л., Быков Д. Е., Тупицына О. В., Пыстин В.Н., Сафонова Н.А., Радомский В. М. – Опубл. 20.05.2016, Бюл. № 14

[13] Сафонова Н.А. Обработка осадков буровых сточных вод: монография / О.В. Тупицына, Н.А. Сафонова, Б.М. Гришин, С.Ю. Андреев, А.А. Ярыгина, К.Л. Чертес – Самара: ООО «Издательство Ас Гард», 2014. – 130 с.

[14] Чертес К.Л., Тупицына О.В., Сафонова Н.А., Пыстин В.Н., Назаров М.В., Ярыгина А.А. Геоконтейнерная обработка буровых шламов / К.Л. Чертес, О.В. Тупицына, Н.А, Сафонова, В.Н. Пыстин, М.В. Назаров, А.А. Ярыгина // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. - 2014. - №3. - С. 36-39.

[15] Патент № 2487767 РФ. Способ утилизации твердых бытовых отходов и устройство для его осуществления [Текст] / Чертес К.Л., Быков Д.Е., Тупицына О.В., Радомский В.М., Пыстин В.Н., Гвоздева Н.В. – Опубл. – 20.07.2013, Бюл. № 20

Обеспечение инвариантности к ограниченным возмущениям в задаче управления перевернутым маятником

Рассадин Ю.М.
Лаборатория систем
с разрывными управлениями
Института проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН
Москва, Россия
rassadin@ipu.ru

***Abstract* — The problem of stabilization of the inverted pendulum on the cart is considered. As a control device a DC motor is considered. The moment of friction is assumed to be unknown, but limited along with its derivatives in time. The use of vortex feedback synthesis algorithms allows to suppress unmatched external disturbances and unknown negative moments of friction forces. The final control action is chosen in the class of discontinuous functions with constant amplitude.**

Ключевые слова — перевернутый маятник, скользящие режимы, несогласованные возмущения

I. Введение

Задача стабилизации перевернутого маятника по обратной связи является одной из наиболее иллюстративных в теории управления. Изучение динамики подобных объектов встречается как в классических трудах по механике [3], так и в современных работах [4, 5, 6]. Рассмотрение электромеханической системы, как правило, включает в себя анализ механического "медленного" блока переменных состояния, "промежуточного" блока электрических величин и блока "быстрых" переменных, описывающих управляющее устройство на основе микроконтроллера. Различия в темпах движений этих блоков позволяют применять широкую палитру известных методов управления (классических, численных, дискретных и непрерывных), а также допущений различного характера, что также обуславливает интерес к объектам этого класса. Описание механической подсистемы, как правило, сопровождается вводом неопределенных величин различной природы, например, неизвестного в общем случае момента силы трения, которые не могут быть непосредственно компенсированны управлением, и поэтому могут рассматриваться в качестве ограниченных внешних несогласованных (unmatched) возмущений [2]. Вихревые алгоритмы управления [2] позволяют обеспечить асимптотическую инвариантность к возмущениям такого рода. Закон обратной связи, синтезируемый по этому алгоритму, состоит из двух аддитивных величин – непрерывной и разрывной, что создает сложности при реализации. Данную проблему предполагается решить на основе метода эквивалентного управления [4]. Этот метод позволит выбрать обратную связь в классе разрывных фунцкий с постоянной амплитудой, что является оптимальным с точки зрения, например, тепловых потерь в реальных управляющих устройствах.

Работы, посвященные стабилизации перевернутого маятника, как правило, рассматривают либо модели, линеаризованные в окрестности номинальных режимов, либо просто исключают из рассмотрения положения маятника ниже точки подвеса. Причиной тому, по видимому, служат углы ориентации маятника $\theta = \pm\pi/2$, в которых система теряет управляемость. Задачу раскачки маятника, т.е. сообщения ему достаточной для вертикального положения энергии, рассматривают отдельно [5], оговаривая необходимость в дальнейшем переключиться на стратегию балансирования маятника. Основная идея данной работы заключается в том, чтобы рассмотреть неопределенности, возникающие при описании механической подсистемы, и их влияние на синтез обратной связи для исполнительного устройства. Один из подходов к учету подобных неидеальностей – объединение их с вектором внешних возмущений. Обеспечив инвариантность замкнутой системы, закон обратной связи решает основную задачу управления.

II. Постановка задачи

В данной работе рассматривается физический маятник, представляющий из себя стержень массы m с равномерным распределением плотности, вращающийся вокруг оси на подшипнике, который закреплен на каретке массы M. Каретка, в свою очередь, может перемещаться вдоль направляющей рельсы, как в станках с ЧПУ, за счет момента, развиваемого электродвигателем постоянного тока (ДПТ). Схематично такая установка представлена на Рис.1, основные обозначения приведены в таблице 1. Так как ДПТ не является основным предметом исследования, при математическом описании можно ограничиться простой приведенной моделью первого порядка, которая будет приведена позднее.

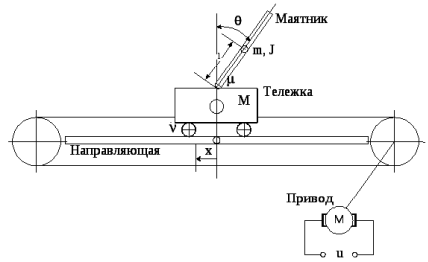


Рис. 1. Схема матяника на тележке

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

ТАБЛИЦА I. ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Переменная	Описание
x	координата тележки на рельсе
θ	угол ориентации маятника
M	масса тележки
m	масса маятника
I	момент инерции маятника относительно центра масс
l	расстояние от точки подвеса до центра масс маятника
μ	коэффициент трения тележки и направляющей
g	ускорение свободного падения
τ	коэффициент вязкого трения

Простейшая математическая модель перевернутого маятника на тележке, рассмотренная в [3], представляет из себя систему двух точечных масс, соединенных невесомым нерастяжимым стержнем, в поле силы тяжести. Одно из тел может свободно вращаться вокруг оси, совмещенной со вторым телом, способным двигаться вдоль продольной оси *x*. На основе формализма Лагранжа и ограничений на обобщенные координаты выводятся уравнения движения этой системы. С точки зрения данной работы такой вывод является слишком упрощенным, так как не рассматривается сила реакции опоры, определяющая силу трения каретки и рельсы. Уравнения, полученные с помощью записи баланса сил, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= v,\\
\dot{v} &= \frac{1}{M+m}\left(\tau - \mu \mathrm{sgn}(\dot{x})N + ml\dot{\theta}^2\sin\theta - ml\dot{\omega}\cos\theta\right)\\
\dot{\theta} &= \omega\\
\dot{\omega} &= \frac{1}{J+ml^2}(mgl\sin\theta - \dot{v}ml\cos\theta - \tau_{fric}),
\end{aligned} \tag{2}$$

где N – сила нормальной реакции опоры. Перепишем уравнения (2) в более компактном виде, разрешив их относительно вторых производных от обобщённых координат:

$$\begin{pmatrix}\ddot{x}\\ \ddot{\theta}\end{pmatrix} = \frac{1}{a(\theta)}\begin{pmatrix} I+ml^2 & -ml\cos(\theta)\\ -ml\cos(\theta) & M+m\end{pmatrix}\begin{pmatrix}F_x\\ F_g\end{pmatrix} \tag{3}$$

где $a(\theta) = (I+ml^2)(M+m) - m^2l^2\cos^2(\theta)$ – определитель матрицы перед вектором сил в (3), $F_x = \tau - F_{fr} + ml\dot{\theta}^2\sin(\theta)$ – суммарная сила, действующая на объект вдоль оси *x*, а $F_g = mgl\sin(\theta) - \tau_{fric}$ – момент вращения вокруг оси маятника, создаваемый силой тяжести и противодействующее трение в подшипнике.

Уравнение, описывающее вращающий момент ДПТ имеет вид

$$\dot{\tau} = -A\tau - D\omega + Bu, \tag{4}$$

где *A, D, B* – конструктивные положительные параметры ДПТ, τ– развиваемый обобщенный момент, *u*– реальное управляющее воздействие.

Таким образом, целью управления в данной работе является перевод маятника из нижнего положения равновесия в неустойчивое верхнее, удержание его там с одновременным позиционированием каретки в заданной точке, а в терминах системы (2) можно записать $\theta \to 0$, $\omega \to 0$ при $x \to x_d = \mathrm{const}$.

III. СИНТЕЗ БАЗОВОГО АЛГОРИТМА

Запишем уравнение для кинетической энергии системы (2):

$$T = (I+2ml^2)\frac{\dot{\theta}^2}{2} + \frac{m}{2}(\dot{x}^2 + 2l\dot{x}\dot{\theta}\cos(\theta)). \tag{5}$$

Потенциальная энергия матяника равна $U = mgl\cos(\theta)$. Подход базового алгоритма подразумевает синтез закона управления в предположении, что все величины известны или доступны прямому измерению, поэтому моментом силы трения, который полагается неизвестным, а влияет лишь на точность регулирования в верхней точке, в данном разделе можно пренебречь. Продифференцировав энергию системы *E=T+U* по времени, в терминах системы (3) получим:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{(E_1, E_2)}{a(\theta)}\left(A(\theta)\begin{pmatrix}F_x\\ F_g\end{pmatrix} - ml\dot{\theta}\sin(\theta)(\dot{x}\dot{\theta} - g)\right) \tag{6}$$

где $E_1 = m\dot{x} + ml\dot{\theta}\cos(\theta)$, $E_2 = (I+2ml^2)\dot{\theta} + ml\dot{x}\cos(\theta)$.

Для достижения цели управления необходимо перевести энергию системы из начального состояния $E_0 = -2mgl$ в верхнее положение равновесия $E_c = 0$. Для этого производная по времени от энергии должна быть положительной, а следовательно воздействие F_x – отрицательным.

$$\begin{aligned}
F_x^* = &-ml\sin(\theta)\dot{\theta}^2 +\\
&+\frac{(I+ml^2)(M+m) - m^2l^2\cos^2(\theta)}{E_1(I+ml^2) - E_2ml\cos(\theta)}\left(ml\dot{\theta}\sin(\dot{x}\dot{\theta} - g) - k\Delta E\right) -\\
&-\frac{E_2(I+ml^2) - E_1ml\cos(\theta)}{E_1(I+ml^2) - E_2ml\cos(\theta)}\left(mgl\sin(\theta) - \tau_{fric}\right)
\end{aligned}$$

где $\Delta E = E - E_c$.

Для максимизации темпов сходимости энергии к требуемому значению амплитуда входного сигнала должна быть также максимальна. Тогда закон фиктивного управления для ускорения тележки можно записать в виде

$$F_x^* = \mathrm{sat}_{a_{max}} k(E - E_c)\, sign\left[\frac{(E_1, E_2)}{a(\theta)}\begin{pmatrix}A_{11}(\theta)\\ A_{21}(\theta)\end{pmatrix}\right], \tag{7}$$

где a_{max} – максимальный момент, который способен развивать ДПТ. Такой алгоритм позволит решить задачу накачки энергии в колебания маятника.

Вторым возможным вариантом раскачки маятника является положительная обратная связь по угловой скорости при замыкании системы (3). Уравнения для угловой ориентации маятника будут иметь вид

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_1 &= \theta_2, \\ \dot{\theta}_2 &= -k_1\theta_1 + k_2\theta_2 + \Omega(t), \end{aligned} \tag{8}$$

где $\Omega(t)$ можно рассматривать как внешние возмущения, а выбором положительных коэффициентов обратной связи k_1, k_2 достигается рост амплитуды колебаний маятника, достаточный для перевода его в вертикальное положение.

На втором этапе управления решается задача стабилизации маятника в вертикальном неустойчивом положении равновесия и позиционировании подвижной каретки в заданную заранее точку на оси x. В большинстве работ эта проблема решается отдельно от перевода в верхнее положение равновесия, логика переключений алгоритмов становится предметом отдельных исследований [6].

Если математически описать переключения алгоритмов управления, то закон обратной связи для момента ДПТ должен иметь вид

$$F_{dc} = C_{swing}F_{swing} + C_{stab}F_{stab} \tag{9}$$

где $F_{swing} = F^*$ из (7), а F_{stab} – закон обратной связи, синтезированный для линеаризованной модели маятника около верхнего положения равновесия, который будет рассмотрен далее. Логика коэффициентов, стоящих перед законами управления, должна быть следующая:

$$C_{swing} = \begin{cases} 1, |\theta| < \theta_{sw}, \\ 0, |\theta| \geq \theta_{sw}, \end{cases}$$
$$C_{stab} = \begin{cases} 1, |\theta| \geq \theta_{sw}, \\ 0, |\theta| < \theta_{sw}. \end{cases}$$

Реализовать данную логику можно с помощью выражений

$$C_{swing} = \frac{1}{2}(1 - \mathrm{sgn}(\theta^2 - \theta^2{}_{sw})), C_{stab} = 1 - C_{swing}$$

где sgn – функция знака.

Линеаризованная модель для системы (3) будет иметь вид

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{x} \\ \dot{\omega} \\ \dot{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{mlgM_{eq}}{\Delta} & 0 & \frac{-\mu_p M_{eq}}{\Delta} & \frac{-ml\mu_{beq}}{\Delta} \\ \frac{m^2 l^2 g}{\Delta} & 0 & \frac{-\mu_p ml}{\Delta} & \frac{-\mu_{beq} J_{eq}}{\Delta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ x \\ \omega \\ v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{ml}{\Delta} \\ \frac{J_{eq}}{\Delta} \end{pmatrix} F,$$

где $F = F_{dc} - \mu N \mathrm{sgn}(v)$ – результирующая сила управляющего устройства и сухого трения в контакте рельсы и каретки, $\Delta = M(I + ml^2) + Im$, μ_p – коэффициент вязкого трения в подшипнике, $J_{eq} = I + ml^2$ – момент инерции маятника относительно точки подвеса, $M_{eq} = M + m$, μ_{beq} – эквивалентный коэффициент трения.

Закон обратной связи для этой системы, соответствующий F_{stab} из системы (9) должен содержать как отклонение маятника от вертикального положения $\Delta\theta = \theta - \theta_{ref}$, что в нашем случае совпадает с углом ориентации, так и ошибку позиционирования каретки $\Delta x = x - x_{ref}$, требуемую точку будем считать постоянной и заданной заранее.

В соответствии с принципом блочного управления [1], выберем фиктивное управление этапа стабилизации

$$F^*{}_{stab} = -k_x \Delta x - k_\theta \Delta\theta \,, \tag{10}$$

где k_θ, k_x – положительный коэффициенты, выбором которых обуславливаются темпы сходимости объекта к выбранным точкам $\theta = 0, x = x_{ref}$. Следует отметить, что если коэффициент k_x определяет скорость передвижения каретки по оси x, то k_θ отвечает за устойчивость маятника в верхнем положении к незначительным внешним воздействиям. Выбранный закон обратной связи, соответствующий уравнению (9), должен на последнем шаге реализовываться реальным управляющим устройством, двигателем постоянного тока (4). Поясним идею выбора реального управления в следующем разделе.

IV. Модифицированная поверхность скольжения

Рассмотрим систему уравнений

$$\begin{aligned} \dot{e} &= -\tau ml\cos(\theta)\dot{\theta} - \eta, \\ \dot{\tau} &= -A\tau - B\dot{\theta} + Bu, \end{aligned} \tag{11}$$

где $e = E - E_c$ – невязка управления, а η обозначает негативное воздействие неучтенных моментов сил и фиктивное управление из раздела 3. При описанных выше ограничениях на составляющие модели объекта, на основе вихревых алгоритмов, запишем уравнения для поверхности скольжения S [4]:

$$\begin{aligned} s &= v - v^*, \\ \dot{v}^* &= -\alpha v^* - M\mathrm{sgn}(e). \end{aligned} \qquad (12)$$

Вихревой алгоритм, как было показано в [2], обеспечивает асимптотическую инвариантность к неизвестным несогласованным возмущениям, в качестве которых рассматривается воздействие неучтенных моментов. Продифференцируем уравнение поверхности скольжения S в соответствии с (11) и (12):

$$\dot{s} = -A\tau - D\dot{\theta} + Bu + \alpha v^* + M\mathrm{sgn}(e) \qquad (13)$$

Выбрав истинное управление в виде $u = -U\mathrm{sgn}(s)$, при достаточно большой амплитуде можно обеспечить соотношение $s=0$, а значит и реализацию вихревого алгоритма [2]. Тогда невязка энергии сойдется к нулю, что решает задачу накачки энергии маятника до требуемого значения.

V. Численное моделирование

Численные эксперименты в данной работе проводились в среде «Matlab/Simulink». Стоит отдельно отметить, что системы с разрывными управлениями могут быть адекватно аппроксимированы только явной разностной схемой первого порядка. Схемы «предиктор-корректор» не подходят для расчетов релейных элементов, работающих в ключевом режиме (после попадания на поверхность скольжения) потому, что релейный элемент должен изменять свой знак вместе регулируемой величиной. Таким образом, шаг моделирования по времени соответствует частоте переключений релейного элемента.

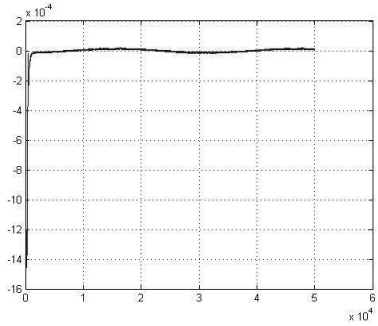


Рис. 2. Ошибка регулирования энергии маятника

Численное моделирование проводилось при следующих значениях параметров объекта: $m=1$; $l=1$; $I=1$; $g=10$; $M=3$; $\mu=0{,}01$; $\tau=0{,}01$. Шаг по времени равнялся 0,001 сек. Сходимость ошибки регулирования к нулю демонстрирует асимптотическую инвариантность подсистемы ДПТ к внешним неконтролируемым возмущениям, которые возникают при учете неидеальностей модели, сухого трения а также на этапе выбора фиктивного управления ускорения каретки при решении задачи стабилизации и позиционирования маятника, что подтверждает работоспособность предложенного подхода.

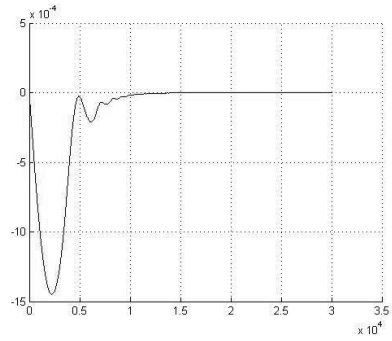


Рис. 3. Ошибка регулирования скорости маятника

VI. Заключение

В данной работе был рассмотрен вопрос стабилизации перевернутого маятника на тележке с горизонтальной степенью свободы. Подробное описание объекта, включающее моменты сухого трения и другие внешние негативные воздействия приводит к возникновению несогласованных возмущений в исполнительном устойстве. В отличии от классических методов, примененный в работе вихревой алгоритм позволяет обеспечить асимптотическую инвариантность к возмущениям такого рода. Реальное управление было выбрано в классе разрывных функций с постоянной амплитудой, что позволяет говорить о простоте синтеза и надежности прикладного применения результатов. Численные эксперименты иллюстрируют работоспособность предложенного подхода. Направлением дальнейших исследований может служить рассмотрение ограничений на аплитуду движения тележки, которое отсутствует в маятнике Фуруты [5], точка подвеса которого совершает вращательные движения вокруг вертикальной оси. Также интерес представляет робастная постановка задачи. К примеру, дополнительный вынесенный груз не только сместит "нулевой" угол ориентации маятника, но и изменит физические параметры установки, такие как массу и момент инерции, что повлечет за собой необходимость подстройки коэффициентов контроллера.

Список литературы

[1] Дракунов С.В., Изосимов Д.Б., Лукьянов А.Г., Уткин В.А. и др., Принцип блочного управления // Автомат. и телемех. Ч. I. 1990. № 5. С. 3--13; Ч. II. 1990. № 6. С. 20--31.

[2] С. А. Кочетков, В. А. Уткин, “Инвариантность в системах с несогласованными возмущениями” // Автомат. и телемех., 2013, № 7, С. 46--83

[3] Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц, Краткий курс теоретической физики. Кн. 1. Механика. Электродинамика, М.: Наука, 1969. 271 с.

[4] Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. М.: Наука, 1981. 368 с.

[5] K.J. Astrom, K. Furuta, Swinging up a pendulum by energy control // Automatica, Volume 36, Issue 2, 2000, P. 287--295.

[6] B. Srinivasan, P. Huguenin, K. Guemghar, and D. Bonvin A Global Stabilization Strategy for an Inverted Pendulum // IFAC Proceedings Volumes, Volume 35, Issue 1, 2002, P. 133--138.

Отработка методики исследования коэффициента теплопроводности анизотропных композитов

Резник С.В.
ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
Москва, Россия
sergeyreznik@bmstu.ru

Просунцов П.В.
ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
Москва, Россия
pavel.prosuntsov@mail.ru

Бондалетов Д.Н.
«Гусевской стекольный завод им. Ф.Э. Дзержинского»,
г. Гусь-Хрустальный
Владимирская обл., Россия
bondalet@mail.ru

Денисов О.В.
ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
Москва, Россия
denisov.sm13@mail.ru

Денисова Л.В.
ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
Москва, Россия
u.pasika@yandex.ru

Петров Н.М.
ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
Москва, Россия
avpdrago@gmail.com

Abstract **This article is devoted to the verification of the reliability of the calculation method and the experimental determination of the thermal conductivity coefficient of composite materials in the plane of reinforcement. A sample of optical quartz glass KV was used as a model material. Control tests were carried out on the installation of contact heating. The experimental data were processed using the mathematical apparatus of inverse problems. The thermal conductivity coefficient of the sample material differs from the control value by 10%.**

Ключевые слова — ***композиты, теплопроводность, обратная задача, эксперимент, образцовые материалы, тепловизор***

I. Введение

В ракетно-космической технике нашли применение разнообразные композиционные материалы (КМ), обладающие существенной анизотропией коэффициента теплопроводности и других характеристик. Применение анизотропных КМ расширяет возможности решения ряда практически важных задач. Например, выбирая КМ с повышенным коэффициентом теплопроводности в заданном направлении, можно снизить перепады температур и тем самым уменьшить напряжения и перемещения, а значит повысить формо-размеростабильность конструкции. Очевидно, что уменьшение погрешности определения характеристик КМ способствует повышению точности проектирования конструкций.

В ряде работ предложены подходы к определению коэффициента теплопроводности анизотропных материалов [1-15]. Теоретическую основу этих подходов составляли решения обратных задач теплопроводности (ОЗТ) в двумерной или трехмерной постановке. Аналитические решения линейных ОЗТ были получены методом обращения решения прямой задачи. Значительный прогресс достигнут в разработке численных методов решения нелинейных ОЗТ.

Экспериментальные исследования с анизотропными материалами проводились при неравномерном нагреве круглых и прямоугольных пластин или стержней с помощью концентрированных источников теплового излучения, контактных нагревателей и прямого пропускания электрического тока через образец. Измерения температуры выполнялись с помощью термопар и пирометров. Недостатком ранее проведенных исследований можно считать отсутствие проверки достоверности экспериментальных данных с помощью образцовых мер теплопроводности [16].

Настоящая работа является развитием и продолжением исследований, начатых в [17-19], направленных на определение температурных зависимостей коэффициента теплопроводности КМ в тонкостенных элементах космических конструкций типа корпуса наноспутника или полых стержневых элементов трансформируемых рефлекторов крупногабаритных космических антенн [20-25]. Температурные поля изменялись с помощью термопар и тепловизора.

II. Подготовка и проведение эксперимнта

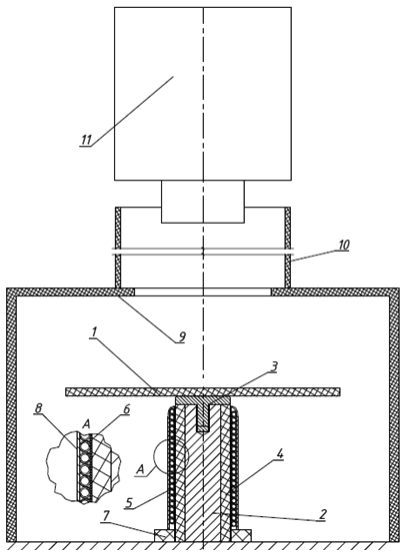
Оценку достоверности экспериментальных данных можно проводить с помощью образцов оргстекла (полиметилметакрилата) или оптического кварцевого стекла КВ, справочные значения коэффициента теплопроводности которых в диапазоне от 293 К до 373 К составляют 0.20 Вт/(м·К) и 1.45 Вт/(м·К) соответственно [26, 27]. Использование кварцевого стекла КВ в качестве эталона более предпочтительно, т.к. его коэффициент теплопроводности гораздо ближе к ожидаемому коэффициенту теплопроводности КМ, а термическая стабильность выше, чем у оргстекла.

В работе проведена оценка достоверности экспериментальных данных с помощью образцов оптического кварцевого стекла КВ при контрольных испытаниях на установке контактного нагрева (рис. 1).

Экспериментальная установка состоит из керамического электрического нагревателя ПЭВ – 30 (4), в который вставлен латунный стержневой элемент (2) с контактной втулкой (3) диаметром 20 мм. Температура нагревателя контролируется с помощью термопары ХА, зачеканенной в контактной втулке. Для уменьшения

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

влияния излучения между образцом и нагревателем корпус последнего окружен радиатором (5) в виде латунной трубки, по которой циркулирует охлаждающая жидкость (вода). Наружная поверхность радиатора закрыта алюминиевой фольгой (8), а между его внутренней поверхностью и корпусом нагревателя проложен слой стеклоткани (6). Нижняя часть нагревателя теплоизолирована (7).



1 – образец, 2 – стержневой элемент, 3 – контактная втулка, 4 – нагреватель, 5 – радиатор, 6 – стеклоткань, 7 – изолятор, 8 – алюминиевая фольга, 9, 10 – камера спокойного воздуха, 11 – тепловизор

Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Образец (1) из кварцевого стекла КВ с размерами 100x100x3 мм центральной частью устанавливается на втулку (3), а для гарантированного контакта между ними наносится слой термопасты КПТ-8. Для подавления естественной конвекции и уменьшения случайных воздействий окружающей среды эксперименты проводятся в камере спокойного воздуха, состоящей из прямоугольной (9) и цилиндрической (10) оболочки. Температура поверхности образца измеряется при помощи тепловизора Fluke Ti – 400 (11) через окно, вырезанное в центре прямоугольной оболочки.

Чтобы уменьшить методические погрешности измерения температуры особое внимание было уделено подготовке образца и изучению оптических свойств его поверхности. Тепловизор должен регистрировать температуру поверхности образца, но может «видеть» нагреватель через прозрачное стекло. На поверхность стекла был нанесен тонкий слой черной акриловой краски MIPA для исключения «просвечивания» и попадания в приемник теплового излучения электрического нагревателя. Покрытие наносилось вручную с помощью распылителя на экспериментальный образец и контрольные образцы того же стекла диаметром 50 мм и толщиной 3 мм, полученных из ОАО «Гусевский стекольный завод имени Ф. Э. Дзержинского». Покрытие оказалось достаточно оптически плотным (рис. 2), хотя имело толщину около 9 мкм. Так, в диапазоне волновых чисел 500-4000 $см^{-1}$ (соответствует диапазону длин волн 20.0-2.5 мкм) пропускание не превышало 1.25%, а на длине волны 5 мкм (2000 $см^{-1}$), отвечающей максиму энергии излучения теплового источника с температурой 573 К, менее 0.2%.

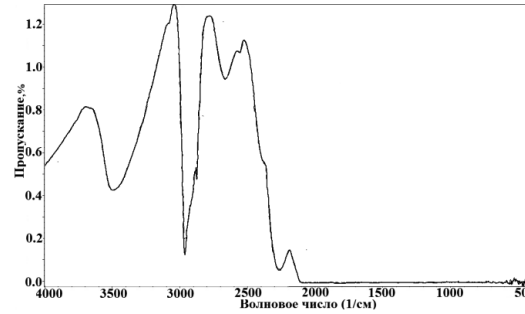


Рис. 2. Направленное пропускание покрытия в ИК области спектра

Проведено исследование сплошности покрытия при увеличении до X500 на инвертированном металлографическом микроскопе Zeiss Axio Observer D1 с использованием системы обработки изображений Thixomet. Эти средства позволяют вести измерения линейных размеров микрорельефа твердотельных структур, обнаруживать поры и трещины [28]. Соответствующий анализ изображений выявил высокую степень однородности покрытий и отсутствие на них дефектов.

По методике JISB 0601-1994 [29] исследована микрошероховатость поверхности покрытия. Измерения проводились в трех точках на каждой поверхности образца. Среднее арифметическое абсолютных значений отклонения профиля от средней линии в пределах базовой длины оценки 0.8 мм составило $R_a = 0.61 \pm 0.05$ мкм. При этом среднее значение от высоты пяти наибольших выступов профиля и глубины пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины оценки 0.8 мм составило $R_z = 4.2 \pm 0.6$ мкм.

С помощью инфракрасного Фурье-спектрометра Nicolet iS50 проведены исследования интегральной излучательной способности покрытия при температурах от 20ºС до 1000ºС в диапазоне длин волн 1…20 мкм. Установлено, что эта характеристика практически постоянна и в указанном диапазоне температур равна 0.92.

Равномерная сплошность и микрошероховатость покрытия, а также стабильность излучательной способности должны благоприятно сказаться на точностных показателях методики определения коэффициента теплопроводности стекла КВ как образцового материала.

Включение нагревателя осуществляется после подачи охлаждающей жидкости в радиатор, а его температура измеряется термопарой. Процесс нагрева образца регистрируется тепловизором, настроенным на значение излучательной способности 0.92 (рис. 3).

Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки

III. Обработка экспериментальных данных

Полученные термоизображения были оцифрованы (рис. 4) и построены временные зависимости значений температуры поверхности образца на расстоянии 15 и 20 мм от нагревателя, которые в дальнейшем использовались в качестве исходных данных при решении коэффициентной ОЗТ.

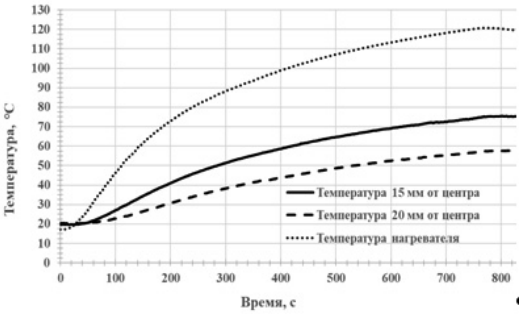
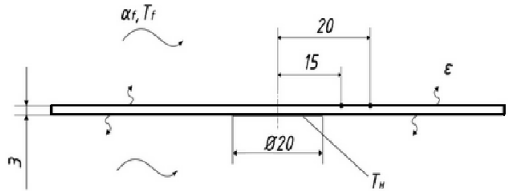


Рис. 4. Экспериментальные термограммы нагревателя и двух точек на поверхности образца

Обработка экспериментальных данных проводилась на основе теплометрической схемы (рис. 5). Считалось, что контакт между втулкой нагревателя и тыльной поверхностью образца идеальный. На поверхности пятна контакта между нагревателем и образцом задавалось граничное условие 1-го рода, при этом использовалось экспериментально измеренное значение температуры нагревателя $T_н$. Принималось, что на остальных частях верхней и нижней поверхности образца развивалась естественная конвекция с коэффициентом теплоотдачи αf и температурой окружающей среды Tf . Также учитывался отвод теплоты излучением с поверхности образца. Постановка ОЗТ предусматривала определение коэффициента теплопроводности материала, доставляющего минимум функционалу невязки экспериментальных (рис. 4) и расчетных значений температур в соответствующих точках образца. Для решения ОЗТ использовался метод сопряженных градиентов, а остановка вычислительного процесса проводилась по «слипанию» последовательных приближений.



α_f – коэффициент теплоотдачи внутри камеры; ε, – излучательная способность поверхности образца; T_f – температура окружающей среды, $T_н$ – температура пятна контакта

Рис. 5. Теплометрическая схема эксперимента:

Исходными данными для расчета служили следующие величины: излучательная способность поверхности образца ε = 0.92; теплоемкость стекла КВ в диапазоне температур от 293 К до 373 К c = 810 Дж/(кг·К), плотность ρ = 2210 кг/м^3. Основная сложность состояла в задании коэффициента теплоотдачи α_f при естественной конвекции в камере спокойного воздуха. При нестационарном эксперименте интенсивность конвективного теплообмена на поверхности образца изменяется во времени и убывает по мере удаления от нагревателя. Исследование пространственного и временного распределения коэффициента теплоотдачи представляет собой достаточно сложную задачу. Обычно для расчетов используется его усредненное значение. Как правило, при подобных условиях эксперимента α_f не превышает величины 1.0 Вт/(м^2·К).

Оценка чувствительности искомого коэффициента теплопроводности образца к неопределенности коэффициента теплоотдачи показала, что при вариации α_f от 0 до 1.0 Вт/(м^2·К) максимальное расхождение со справочными данными стекла КВ (λ = 1.45 Вт/(м·К)) достигается при минимальном значении коэффициента теплоотдачи и не превышает 0.16 Вт/(м·К) (менее 10%) (рис. 6). Данный факт свидетельствует, что в рабочей зоне установки средняя величина коэффициента теплоотдачи на поверхности образца может считаться пренебрежимо малой.

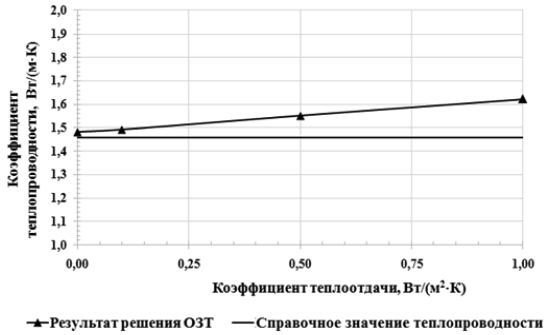


Рис. 6. Чувствительность искомой теплопроводности к неопределенности коэффициента теплоотдачи

IV. Заключение

Проведена аттестация методики определения коэффициента теплопроводности КМ в плоскости армирования с применением бесконтактных средств измерения температуры. Эксперименты с образцовым материалом – оптическим кварцевым стеклом КВ – показали, что максимально ожидаемая погрешность определения коэффициента теплопроводности не превышает 10 % из-за неопределенности исходных данных по коэффициенту теплоотдачи в камере спокойного воздуха.

Список литературы

[1] Михалев А.М., Резник С.В. Определение теплопроводности ортотропных материалов на основе решения двумерной обратной задачи // Тепломассообмен – ММФ: Матер. Минск. междунар. форума. – Минск, 1988. – Секция 8. – С. 33-35.

[2] Михалев А.М., Резник С.В. Метод определения теплофизических свойств ортотропных материалов на основе решения двумерной обратной задачи теплопроводности // ИФЖ. – 1989. – Т.56, № 3. – С. 483-491.

[3] Михалев А.М., Резник С.В. Двумерная обратная задача теплопроводности и методы исследования параметров теплопереноса ортотропных материалов // Идентификация динамических систем и обратные задачи: Матер. 2–й междунар. конф. – С-Пб., 1994. – Т.2. – С. В-19-1-10.

[4] Jarny Y., Ozisik M.N., Bardon J.P. A general optimization method using adjoint equation for solving multidimensional inverse heat conduction // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1991. – Vol. 34, No. 11. – P. 2911-2919.

[5] Березин В.В., Костюрин А.А., Попов Ю.А. Определение теплопроводности анизотропных сред на основе метода сканирования. Теоретическое обоснование метода // ИФЖ. – 1988. – Т. 54, № 2. – С. 273-279.

[6] Березин В.В., Костюрин А.А., Попов Ю.А. Определение теплопроводности анизотропных сред на основе метода сканирования. Теоретические модели и экспериментальная реализация метода // ИФЖ. – 1988.– Т. 54, № 3. – С. 455–462.

[7] Коляно Ю.М. Способ определения теплофизических характеристик ортотропных тел // ИФЖ. – 1988.– Т. 54, № 4. – С. 596-600.

[8] Козлов В.П. Теория, методы и автоматизированные МП–системы организации неразрушающих способов теплофизических измерений для анизотропных и изотропных материалов: Автореф.дис. ... докт. техн. наук. – Ашхабад, 1989. – 45 с.

[9] Бут Е.Н., Любимый К.В. Аналитическое решение двумерной ОЗТ анизотропного материала при локальном нагреве // Аналитические методы расчета процессов тепло– и массопереноса: Матер. Всесоюз. совещ. – Душанбе, 1986. – С. 208-209.

[10] Гончаров И.В., Миков В.Л. Решение обратной задачи по определению трех характеристик волокнистого композита // ИФЖ. – 1990.– Т. 58, № 5.– С. 493-499.

[11] Червяков В.В. Исследование теплофизических свойств углерод-углеродных композиционных материалов в условиях высоких температур: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1993. – 16 с.

[12] Фокин С.И. Высокотемпературный метод и экспериментальная установка для одновременного исследования тепло- и электрофизических свойств композиционных анизотропных материалов: Авторефер. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1994.– 14 с.

[13] Идентификация коэффициента теплопроводности для квазистационарных двумерных уравнений теплопроводности / Ю.М. Мацевитый, С.В. Алехина, В.Т. Борухов, Г.М. Заяц, А.О. Костиков // ИФЖ. – 2017. – Т. 90, № 6. – С. 1364-1370.

[14] Формалев В.Ф., Колесник С. А. Об обратных коэффициентных задачах теплопроводности по восстановлению нелинейных компонентов тензора теплопроводности анизотропных тел // ИФЖ. – 2017. – Т. 90, № 6. – С. 1371-1379.

[15] O.M. Alifanov, Y. Jarny, P.V. Prosuntsov and G.A. Ivanov Complex identification of thermophysical properties of anisotropic composite material // Proceed. of the 5-th Int. Conf. on Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice, Cambridge, UK. – 2005. – 7 p.

[16] Сергеев О.А. Метрологические основы теплофизических измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 156 с.

[17] Теоретические основы определения продольной теплопроводности тонкостенных элементов конструкций из композиционных материалов / С.В. Резник, В.П. Тимошенко, П.В. Просунцов, Л.В. Миаль // ИФЖ. – 2014. – Т. 87, № 4. – С. 838-844.

[18] Расчетно-экспериментальное определение теплопроводности углепластика в плоскости армирования на основе бесконтактного измерения температуры / С.В. Резник, П.В. Просунцов, О.В. Денисов, Н.М. Петров, А.В. Шуляковский, Л.В. Денисова // Тепловые процессы в технике. – 2016. – Т. 8, № 12. – С. 557-563.

[19] Расчетно-экспериментальная методика определения теплопроводности композиционного материала корпуса наноспутника / С.В. Резник, П.В. Просунцов, О.В. Денисов, Н.М. Петров, Ли Вон Хеонг // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2017. – Т. 18, № 3. – С. 345-352.

[20] Резник С.В., Просунцов П.В., Азаров А.В. Моделирование температурного и напряженно-деформированного состояний рефлектора зеркальной космической антенны // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88, № 4. – С. 945-950.

[21] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhailovsky K.V., Shafikova I.R. Material science problems of building space antennas with a transformable reflector 100 m in diameter // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 153, No 1. 012012.– 10 p.DOI: 10.1088/1757-899X/153/1/012001

[22] Prosuntsov P.V., Reznik S.V., Mikhailovsky K.V., Novikov A.D., Zaw Ye Aung Study variants of hard CFRP reflector for intersatellite communication// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 153, No 1. 012012. – 7 p. DOI: 10.1088/1757-899X/153/1/012012

[23] Reznik S.V., Novikov A.D. Comparative analysis of the honeycomb and thin-shell space antenna reflectors // MATEC Web of Conferences 01012 (2017) Thermophysical Basis of Energy Technologies. – 2016. – 5 p. DOI: 10.1051/matecconf/2017920101292

[24] Reznik S.V. Thermal regimes of space composite structures. Part I // MATEC Web of Conferences 194, 01048 (2018) DOI.ORG/10.1051/matecconf/201819401048 HMTTSC-2018

[25] Reznik S.V. Thermal regimes of space composite structures. Part II // MATEC Web of Conferences 194, 01049 (2018) DOI.ORG/10.1051/matecconf/201819401049 HMTTSC-2018

[26] ГОСТ 8.140-82 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). – Режим доступа: http://catalog.vniim.ru/files/raz01-12.pdf

[27] ГОСТ 15130-86 Стекло кварцевое оптическое. Технические условия (с Изменениями N 1, 2). – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/1200023786

[28] Официальный сайт фирмы Thixomet. – Режим доступа: https://thixomet.ru/product/thixomet-pro/

[29] Методика измерения шероховатости поверхностей JISB 0601-1994. – Режим доступа: https://us.misumi-ec.com/pdf/tech/mech/US2010_fa_p3541_3542.pdf

Нелинейная модель с переменной структурой для моделирования плоских колебаний ведущих колес транспортного средства

Решмин С.А.
ИПМех РАН,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия
reshmin@ipmnet.ru

Глазков Т.В.
ИПМех РАН,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия
t.glazkov@bk.ru

***Abstract* — A simplified nonlinear mathematical tire model has been created. The model takes into account the radial and torsional stiffness of the tire, as well as the effect of radial deformation on torsional rigidity and, conversely, the effect of torsional deformation on radial rigidity. A numerical simulation of the controlled motion of the wheel with slippage is carried out. The results will be used to study the conditions for the occurrence of undesirable oscillations of vehicle wheels.**

Ключевые слова — шина, плоские колебания колес, сухое трение, проскальзывание

I. Введение

Процесс интенсивного разгона транспортного средства не всегда устойчивый. Проскальзывание может вызывать колебания колес в вертикальной плоскости, см., например, видео на интернет-портале YouTube [1], где показано развитие таких колебаний у трактора К-701 «Кировец». Из-за того, что колеса большие, их колебания имеют достаточно низкую частоту и большую амплитуду, а следовательно, отчетливо видны. Было проведено два пробных старта и видно, что в обоих случаях колебания устойчиво развиваются. Это говорит о том, что нежелательный резонанс изначально заложен в конструкцию этой машины. При этом возможен отрыв колес от поверхности дороги, так что время контакта намного меньше периода колебаний. Аналогичные колебания с частотой менее 10 Гц могут наблюдаться и у автомобилей. Задача заключается в том, чтобы создать относительно простую математическую модель, которая пригодна для моделирования данного явления при разных режимах движения, например, старта [2, 3, 4].

Отметим, что колесные транспортные средства являются важным классом управляемых технических систем, моделируемых совокупностью твердых тел [5, 6]. В последнее время появились работы, значительно уточняющие модели сил сухого трения и пригодные для расчета движения колесных транспортных средств и анализа нежелательных колебаний колес [7, 8].

II. Плоская модель передней стойки и колеса

Плоские колебания колес хорошо описываются упрощенной двухмассовой моделью передней стойки [9]. Предполагаем, что продольные колебания оси колеса относительно корпуса полностью отсутствуют из-за большой жесткости соответствующих элементов подвески (см. рис. 1).

Работа выполнена в ИПМех РАН при поддержке Российского научного фонда (18-11-00307).

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

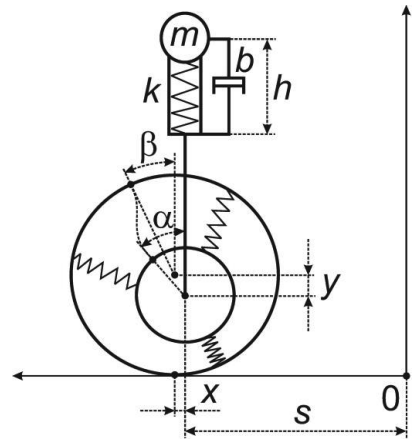


Рис. 1. Плоская модель передней стойки и колеса

Колесо состоит из диска и шины. Шина моделируется внешним невесомым твердым цилиндром, который соединен с диском многочисленными невесомыми пружинами, находящимися в преднатяженном состоянии. Концы пружин могут быть защемлены. Аналогичные допущения о невесомости колес иногда используются при анализе движения автомобилей с учетом трения, например, устойчивости и неустойчивости режимов с прямолинейным движением [10, 11]. Диссипацию внутри шины не учитываем.

Основные переменные: s – координата точки касания дороги и колеса, x , y – отклонения по горизонтали и вертикали центра шины от центра диска, α – угол поворота диска переднего колеса, отсчитываемый от вертикали, β – угол поворота протектора шины переднего колеса, отсчитываемый от вертикали, h – длина пружины передней рессоры.

Дополнительные обозначения: m – приведенная масса корпуса, r_a – радиус диска, r_b – радиус шины, m_a – масса диска, I_a – момент инерции диска, k – коэффициент упругости рессоры, k_r – коэффициент радиальной жесткости шины, k_φ – коэффициент крутильной жесткости шины, M – создаваемый двигателем крутящий момент, h_0 – длина пружины рессоры в свободном состоянии, b – коэффициент

демпфирования амортизатора. Параметры системы m, r_a, r_b, m_a, I_a, k, h_0, b постоянны и заданы.

Со стороны диска на внешний цилиндр шины действует радиальная сила

$$F_r = k_r\sqrt{x^2+y^2}\,, \tag{1}$$

в направлении

$$\left(-\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}, -\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}\right), \tag{2}$$

которое противоположно относительному смещению шины, и крутящий момент

$$M_\varphi = k_\varphi(\alpha-\beta). \tag{3}$$

Так как шина невесомая, то предполагаем, что все силы и моменты сил относительно центра масс, действующие на шину уравновешены в каждый момент времени. Для того чтобы найти силу, с которой цилиндр шины давит на дорогу, спроектируем радиальную силу F_r на горизонтальное и вертикальное направления, умножив (1) на соответствующие компоненты единичного вектора (2). Получим в точке касания

$$F_x = -k_r x, \quad F_y = -k_r y, \quad (y>0). \tag{4}$$

Из равенства моментов сил $-r_b F_x$ и M_φ следует выражение

$$M_\varphi = r_b k_r x, \quad (y>0). \tag{5}$$

Со стороны дороги на шину действует сила с вертикальной составляющей F_N:

$$F_N = \begin{cases} k_r y, & y>0; \\ 0, & y\le 0. \end{cases} \tag{6}$$

Иными словами, $F_N = -F_y$ – нормальная реакция в случае касания переднего колеса и дороги, $F_N = 0$ в случае отрыва колеса. Соответствующая сила тяги F имеет вид:

$$F = \begin{cases} f F_N \operatorname{sign}\left(\dot\beta r_b - \dot s - \dot x\right), & \text{если } \dot\beta r_b - \dot s - \dot x \ne 0; \\ -\min\left(|F_x|, f F_N\right)\operatorname{sign} F_x, & \text{если } \dot\beta r_b - \dot s - \dot x = 0, \end{cases} \tag{7}$$

где f – коэффициент трения скольжения, а выражение для F_x дано в (4).

III. Нелинейность в упругой модели шины

Будем предполагать, что коэффициенты k_r и k_φ (см. (1), (3)) не постоянны, а зависят (в первом приближении) от обобщенных координат следующим образом:

$$k_r = k_r^0 + k_r^\varphi(\alpha-\beta)^2, \tag{8}$$

$$k_\varphi = k_\varphi^0 + k_r^\varphi\left(x^2+y^2\right), \tag{9}$$

где k_r^0, k_r^φ и k_φ^0 – заданные положительные коэффициенты. Из соотношений (8), (9) следует, что коэффициент радиальной жесткости k_r увеличивается при увеличении кручения шины $|\alpha-\beta|$, и наоборот, коэффициент крутильной жесткости k_φ увеличивается при увеличении смещения диска относительно шины $\sqrt{x^2+y^2}$. Такие зависимости соответствуют упругой потенциальной энергии шины, заданной в виде:

$$\Pi_{\text{tire}} = \frac{1}{2}\left[k_r^0\left(x^2+y^2\right) + k_r^\varphi\left(x^2+y^2\right)(\alpha-\beta)^2 + k_\varphi^0(\alpha-\beta)^2\right],$$

причем

$$\frac{\partial\Pi_{\text{tire}}}{\partial x} = k_r x, \quad \frac{\partial\Pi_{\text{tire}}}{\partial y} = k_r y,$$

$$\frac{\partial\Pi_{\text{tire}}}{\partial \alpha} = k_\varphi(\alpha-\beta), \quad \frac{\partial\Pi_{\text{tire}}}{\partial \beta} = -k_\varphi(\alpha-\beta).$$

IV. Уравнения движения

В начальный момент времени $t=0$ момент M отсутствует, диск, шина и корпус неподвижны и находятся в равновесии, так что

$$y(0) = \frac{(m+m_a)g}{k_r^0}, \quad h(0) = h_0 - \frac{mg}{k}, \tag{10}$$

$$\left(g = 9.81\ \text{м/с}^2\right),$$

$$s(0) = \dot s(0) = x(0) = \dot x(0) = \dot y(0) = \dot h(0) =$$

$$= \alpha(0) = \dot\alpha(0) = \beta(0) = \dot\beta(0) = 0.$$

Будем рассматривать движение колеса с проскальзыванием. При $t>0$ управляющий момент задан как функция времени $M(t)$, а положение стойки поддерживается вертикальным. Ради простоты считаем, что положение массы m не изменяется. В этом случае переменные h и s являются вспомогательными, так как h связана с y равенством

$$h - y = h(0) - y(0) = h_0 - G, \quad G = \frac{mg}{k} + \frac{(m+m_a)g}{k_r^0},$$

а $s = \dot{s} = 0$, так что выражение для силы тяги (7) упрощается:

$$F = \begin{cases} f F_N \operatorname{sign} \dot{z}, \text{ если } \dot{z} \neq 0; \\ -\min\left(|F_x|, f F_N\right) \operatorname{sign} F_x, \text{ если } \dot{z} = 0, \end{cases} \quad (11)$$

где введена вспомогательная переменная z, для которой выполнены соотношения

$$z = \beta r_b - x, \quad \dot{z} = \dot{\beta} r_b - \dot{x}. \quad (12)$$

Кинетическая энергия колеса T равна кинетической энергии диска:

$$T = \frac{m_a}{2}\dot{y}^2 + \frac{I_a}{2}\dot{\alpha}^2, \quad I_a = \gamma_a m_a r_a^2, \quad 0 < \gamma_a < 1. \quad (13)$$

Потенциальная энергия всей системы без учета упругой энергии шины имеет вид:

$$\Pi = -m_a g y + \frac{k}{2}(h - h_0)^2 = -m_a g y + \frac{k}{2}(y - G)^2.$$

Подсчитаем частные производные:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} = m_a \dot{y}, \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} = I_a \dot{\alpha},$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y} = -\left(1 + \frac{k}{k_r^0}\right)(m_a + m)g + ky, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \alpha} = 0$$

и составим уравнения Лагранжа, используя в качестве обобщенных координат y, α:

$$\begin{gathered} m_a \ddot{y} + k y + b \dot{y} - \left(1 + \frac{k}{k_r^0}\right)(m_a + m)g = -F_N, \\ I_a \ddot{\alpha} = M - M_\varphi. \end{gathered} \quad (14)$$

Проанализируем полученные уравнения в четырех разных режимах, считая α, x, y основными переменными, описывающими динамику.

Утверждение 1. *В случае отрыва колеса от дороги, когда* $y \le 0$, *имеем* $x = F = F_N = M_\varphi = 0$, $\beta = \alpha$. *Поэтому уравнения движения (14) принимают наиболее простой вид:*

$$\ddot{y} = -\frac{k y + b \dot{y}}{m_a} + \left(1 + \frac{k}{k_r^0}\right)\left(1 + \frac{m}{m_a}\right)g, \quad \ddot{\alpha} = \frac{M}{I_a}.$$

При наличии контакта, когда $y > 0$, ситуация более сложная. Исключая M_φ из равенств (3) и (5), получим:

$$k_\varphi(\alpha - \beta) = r_b k_r x.$$

Подставляя выражение (8) для k_r, получим квадратное уравнение относительно $\alpha - \beta$:

$$r_b k_r^\varphi x(\alpha - \beta)^2 - k_\varphi(\alpha - \beta) + r_b k_r^0 x = 0, \quad (15)$$

решение которого при $x \neq 0$ имеет вид

$$\alpha - \beta = \frac{k_\varphi \pm \sqrt{k_\varphi^2 - 4k_r^\varphi x^2 r_b^2 k_r^0}}{2 r_b k_r^\varphi x}. \quad (16)$$

Дискриминант неотрицателен, если

$$k_\varphi - 2|x| r_b \sqrt{k_r^\varphi k_r^0} \ge 0.$$

Подставляя сюда k_φ из (9), получим квадратное неравенство

$$k_r^\varphi |x|^2 - 2|x| r_b \sqrt{k_r^\varphi k_r^0} + k_\varphi^0 + k_r^\varphi y^2 \ge 0,$$

которое может приводить к ограничению на максимально допустимое значение $|x|$:

$$\begin{gathered} |x| \le \frac{1}{\sqrt{k_r^\varphi}}\left(r_b \sqrt{k_r^0} - \sqrt{r_b^2 k_r^0 - k_\varphi^0 - k_r^\varphi y^2}\right), \\ \text{если} \quad r_b^2 k_r^0 - k_\varphi^0 - k_r^\varphi y^2 > 0. \end{gathered} \quad (17)$$

Зависимость $\alpha - \beta$ от x должна быть непрерывна при $|x| > 0$, а при $|x| \to 0$ должна стремиться к нулю. Поэтому в решении (16) квадратного уравнения (15) следует выбрать знак минус. В результате имеем непрерывную зависимость:

$$\alpha - \beta = \begin{cases} \dfrac{k_\varphi - \sqrt{k_\varphi^2 - 4k_r^\varphi x^2 r_b^2 k_r^0}}{2 r_b k_r^\varphi x}, \text{ если } x \neq 0; \\ 0, \text{ если } x = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Приведем лемму, позволяющую гарантировать выполнение условия (17).

Лемма 1. Пусть параметры системы удовлетворяют ограничению

$$f \le \sqrt{\frac{k_\varphi^0}{r_b^2 k_r^0 - k_\varphi^0}},\ \textit{если}\ \ r_b^2 k_r^0 - k_\varphi^0 > 0\,.$$

Тогда условие (17) выполнено во время движения.

Доказательство. Очевидно, что при законе трения (11) выполнено условие $|F_x| \le f F_N$, а следовательно, $|x| \le f y$. Потребуем, чтобы правая часть этого неравенства не превосходила правую часть ограничения (17). В результате преобразований получим

$$r_b\sqrt{k_r^0} - \sqrt{k_r^\varphi}\, f y \ge \sqrt{r_b^2 k_r^0 - k_\varphi^0 - k_r^\varphi y^2}\,.$$

Возведя обе части неравенства в квадрат, получим квадратное относительно $\sqrt{k_r^\varphi}\, y$ неравенство

$$k_r^\varphi\left(1+f^2\right)y^2 - 2r_b\sqrt{k_r^0 k_r^\varphi}\, f y + k_\varphi^0 \ge 0,$$

которое выполнено при любых $y > 0$, если дискриминант соответствующего квадратного уравнения неположителен:

$$r_b^2 k_r^0 f^2 - \left(1+f^2\right)k_\varphi^0 \le 0\,.$$

Разрешая это соотношение относительно f, получим неравенства из условия леммы.

V. Случай малых горизонтальных отклонений диска

Сначала будем рассматривать движения с малыми x, когда заведомо не нарушается возникшее ограничение (17). Из (18), (9) следует, что при малых x имеют место приближенные формулы:

$$\beta = \alpha - \frac{x r_b k_r^0}{k_\varphi},\quad \text{если}\ \ x \to 0\,, \tag{19}$$

$$k_r = k_r^0 + k_r^\varphi\left(\frac{x r_b k_r^0}{k_\varphi}\right)^2,\quad \text{если}\quad x \to 0\,, \tag{20}$$

где k_φ определено в (9). Таким образом, переменная β также является вспомогательной, так как она связана с α, x, y формулой (19). Подставляя это выражение в (12), получим

$$z = r_b\alpha - \left(\frac{r_b^2 k_r^0}{k_\varphi} + 1\right)x, \tag{21}$$

причем $\dot z$ подсчитывается по формуле

$$\dot z = r_b\dot\alpha - \left(\frac{r_b^2 k_r^0}{k_\varphi} + 1\right)\dot x + \frac{2r_b^2 k_r^0 k_r^\varphi}{k_\varphi^2}\left(x^2\dot x + xy\dot y\right), \tag{22}$$

которая следует из (21) и (9).

В случае режима без проскальзывания $\dot z = 0$, поэтому, приравнивая правую часть (22) к нулю, получаем дополнительное дифференциальное уравнение, которое разрешимо относительно $\dot x$ при малых x:

$$\dot x = \frac{r_b\dot\alpha + 2r_b^2 k_r^0 k_r^\varphi x y\dot y / k_\varphi^2}{1 + r_b^2 k_r^0 / k_\varphi - 2r_b^2 k_r^0 k_r^\varphi x^2 / k_\varphi^2}\,. \tag{23}$$

Систему (14), (23) следует решать совместно с условиями (5), (6), (20), (9).

Утверждение 2. При контакте ($y > 0$) и условии $|x| < f y$ реализуется только режим без проскальзывания. При условии $|x| = f y$ реализуется либо режим без проскальзывания, либо с проскальзыванием. Условие $|x| > f y$ невозможно.

Действительно, если при контакте ($y > 0$) система находится в одном из двух возможных режимов с проскальзыванием ($\dot z > 0$ или $\dot z < 0$), то из уравнений (4), (6), (11) следует, что значение $|x|$ максимально при данном y, причем

$$x = f y \operatorname{sign}\dot z,\quad \left(\dot z \ne 0\right), \tag{24}$$

а коэффициенты k_r и k_φ принимают соответственно значения

$$K_r = k_r^0 + k_r^\varphi\left(\frac{f y r_b k_r^0}{K_\varphi}\right)^2,\ \ K_\varphi = k_\varphi^0 + k_r^\varphi\left(1+f^2\right)y^2\,. \tag{25}$$

Предположим, что $\dot z > 0$. Подставляя

$$x = f y \tag{26}$$

(в соответствии с (24)) в правую часть (22) и требуя ее положительности, получим ограничение

$$r_b\dot\alpha - \gamma f\dot y > 0\,, \tag{27}$$

где введено обозначение

$$\gamma = 1 + \frac{r_b^2 k_r^0}{K_\varphi} - \frac{2r_b^2 k_r^0 k_r^\varphi}{K_\varphi^2}\left(1+f^2\right)y^2 =$$

$$= 1 - \frac{r_b^2 k_r^0}{K_\varphi} + \frac{2 r_b^2 k_r^0 k_\varphi^0}{K_\varphi^2}. \qquad (28)$$

Предположим теперь, что $\dot z < 0$. Подставляя

$$x = -f\, y \qquad (29)$$

(в соответствии с (24)) в правую часть (22) и требуя ее отрицательности, получим другое ограничение

$$r_b \dot\alpha + \gamma f\, \dot y < 0. \qquad (30)$$

Из вышесказанного вытекает следствие, позволяющее выбрать правильный режим.

Следствие 1. *Если при контакте выполнены условия (26) и (27), то реализуется режим с* $\dot z > 0$. *Если при контакте выполнены условия (29) и (30), то реализуется режим с* $\dot z < 0$. *В противном случае реализуется режим без проскальзывания с* $\dot z = 0$.

Если при контакте система находится в одном из двух возможных режимов с проскальзыванием, то из уравнений (5), (6), (24) и $k_r = K_r$ следуют соотношения

$$F_N = K_r y, \quad M_\varphi = f\, r_b K_r y\, \operatorname{sign}\dot z. \qquad (31)$$

Утверждение 3. *В режиме с проскальзыванием соотношения (31) нужно подставить в уравнения движения (14) и использовать их совместно с уравнением (24). Знак* $\dot z$ *определяется неравенствами из следствия 1.*

VI. Общий случай горизонтальных отклонений диска

В общем случае (немалых x) угол β определяется из первого уравнения (18):

$$\beta = \alpha - \frac{k_\varphi}{2 r_b k_r^\varphi x}(1-q),$$
$$q = \sqrt{1 - \left(2 r_b x / k_\varphi\right)^2 k_r^0 k_r^\varphi}.$$

Поэтому формула для коэффициента радиальной жесткости (8) записывается в форме

$$k_r = k_r^0 + \frac{1}{k_r^\varphi}\left(\frac{k_\varphi}{2 r_b x}(1-q)\right)^2. \qquad (32)$$

Выражения (12) для z и $\dot z$ принимают более сложный вид, чем (21) и (22):

$$z = r_b \alpha - \frac{k_\varphi}{2 k_r^\varphi x}(1-q) - x,$$

$$\dot z = r_b \dot\alpha - \left(\dot x + \frac{y\dot y}{x} - \frac{k_\varphi \dot x}{2 k_r^\varphi x^2}\right)\left(1 - q^{-1}\right) - \dot x.$$

Утверждение 2 остается в силе. В случае отсутствия проскальзывания ($\dot z = 0$) получаем дополнительное дифференциальное уравнение

$$\dot x = \frac{r_b \dot\alpha - \frac{y\dot y}{x}\left(1 - q^{-1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{k_\varphi}{2 k_r^\varphi x^2}\right)\left(1 - q^{-1}\right)}. \qquad (33)$$

Систему (14), (33) следует решать совместно с условиями (5), (6), (32), (9).

Замечание 1. *При малых* x *имеет место приближенное равенство*

$$1 - q^{-1} \approx -\left(\frac{2 r_b x}{k_\varphi}\right)^2 k_r^0 k_r^\varphi, \qquad (34)$$

поэтому уравнение (33) в пределе переходит в (23).

При наличии проскальзывания ($\dot z \neq 0$) выполнено равенство (24), а коэффициент k_r принимает значение

$$K_r = k_r^0 + \frac{1}{k_r^\varphi}\left(\frac{K_\varphi}{2 r_b f\, y}(1-Q)\right)^2,$$
$$Q = \sqrt{1 - \left(2 r_b f\, y / K_\varphi\right)^2 k_r^0 k_r^\varphi}. \qquad (35)$$

Здесь K_φ – соответствующее значение коэффициента k_φ, причем такое же, как в (25). Формулировка следствия 1 остается без изменений, но только если γ в соотношениях (27) и (30) переопределить:

$$\gamma = 1 + \left(1 + \frac{1}{f^2} - \frac{K_\varphi}{2 k_r^\varphi f^2 y^2}\right)\left(1 - Q^{-1}\right). \qquad (36)$$

Замечание 2. При малых x имеет место приближенное равенство (34), поэтому уравнение (36) в пределе переходит в (28).

Формулировка утверждения 3 также остается без изменений, но только если K_r переопределено в соответствии с (35).

VII. Результаты численного моделирования

Рассмотрим следующие (более или менее произвольные) параметры модели:

$$r_a = 0.19 \text{ м},\ r_b = 0.304 \text{ м},\ m_a = 17 \text{ кг},\ \gamma_a = 0.5,\ m = 700 \text{ кг},$$
$$k = 30000 \text{ Н/м},\ h_0 = 0.60 \text{ м},\ k_r^0 = 120000 \text{ Н/м},\ b = 100 \text{ Н·с/м},$$

$$k_\varphi^0 = 4800 \text{ Н·м},\ k_r^\varphi = 1200000 \text{ Н/м},\ f = 0.4.$$

Согласно (10) и (13), получим

$$y(0) = 0.0586 \text{ м},\ h(0) = 0.3711 \text{ м},\ I_a = 0.30685 \text{ кг·м}^2.$$

Условия леммы 1 можно свести к неравенству

$$f \le 0.87,$$

которое выполнено. Ради простоты считаем, что управляющий момент является постоянной величиной:

$$M = 1000 \text{ Н·м}.$$

Результаты численного моделирования приведены на рис. 2-4. Как и ожидалось, после приложения к колесу управляющего момента возникают вертикальные колебания.

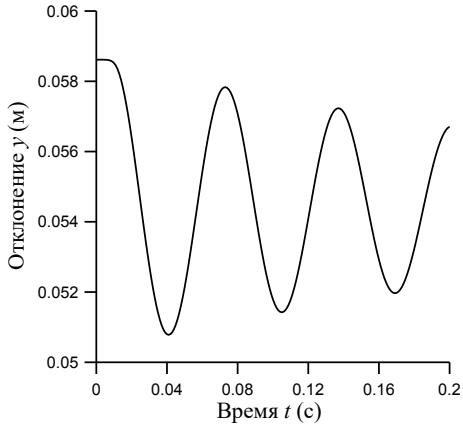


Рис. 2. Вертикальные колебания диска

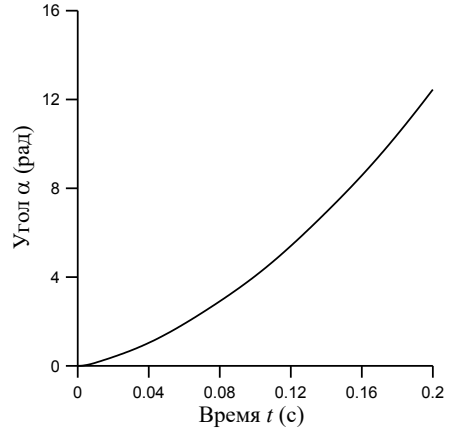


Рис. 3. Вращение диска

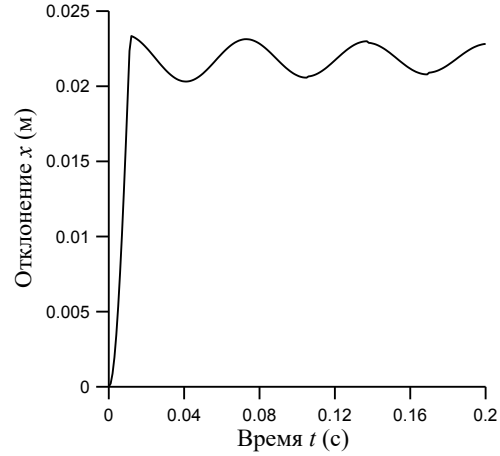


Рис. 4. Горизонтальные колебания диска

VIII. Заключение

Получена нелинейная система с переменной структурой для моделирования движения колеса с проскальзыванием во время старта и возникновением плоских колебаний. Динамика, включая вертикальные колебания, зависит от управляющего момента, приложенного к колесу. В будущем планируется с использованием условий леммы 1 выработать рекомендации по совершенствованию конструктивных параметров, позволяющие избежать развития нежелательных вертикальных колебаний.

Список литературы

[1] URL: https://www.youtube.com/watch?v=_dYmhHOfLW8 (дата обращения: 15.04.2019).

[2] Решмин С.А. Эффект потери тяги при несимметричных колебаниях ведущих колес ТС // Устойчивость и колебания нелинейных систем управления: Материалы XIV Международной научной конференции (30 мая - 1 июня 2018 г., Москва, Россия) / [Ред. В.Н. Тхай]. - М.: ИПУ РАН, 2018. - С. 359-362.

[3] Решмин С.А. Качественный анализ нежелательного эффекта потери силы тяги транспортного средства во время интенсивного старта // ДАН, 2019. Т. 484. № 3. - С. 289-293.

[4] Решмин С.А. Анализ условий потери тяги транспортного средства при интенсивном старте // Изв. РАН. ТиСУ, 2019. № 3. - С. 24-33.

[5] Popp K., Schiehlen W. Ground Vehicle Dynamics. - Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.

[6] Schiehlen W., Eberhard P. Applied Dynamics. - Dordrecht: Springer, 2014.

[7] Журавлев В.Ф. О плоских автоколебаниях колеса на консольной подвеске // Изв. РАН. МТТ, 2012. № 2. - С. 3-8.

[8] Журавлев В.Ф., Климов Д.М., Плотников П.К. Новая модель шимми // Изв. РАН. МТТ, 2013. № 5. - С. 13-23.

[9] Hao D., Zhao C., Huang Y. A reduced-order model for active suppression control of vehicle longitudinal low-frequency vibration // Shock and Vibration, 2018. Article ID 5731347. - P. 1-22.

[10] Журавлев В.Ф., Розенблат Г.М. О колебаниях колесного экипажа при наличии трения // ДАН, 2011. Т. 436. № 5. - С. 627-630.

[11] Журавлев В.Ф., Розенблат Г.М. О неустойчивости экипажа в вертикальной плоскости при прямолинейном движении с учетом сил трения // Изв. РАН. МТТ, 2011. № 4. - С. 3-17.

Разработка средства моделирования угроз и оценки рисков автоматизированных систем газодобывающих предприятий

Римша А.С.
Служба информационно-управляющих систем АО «Ачимгаз»
Новый Уренгой, Россия
RimshaAndrew@gmail.com

Римша К.С.
Кафедра информационной безопасности
Тюменский государственный университет
Тюмень, Россия
RimshaKonstantin@ya.ru

***Abstract* — The article describes the application being developed for threat modeling and risk assessment of the information security of an automated process control system (APCS) for a gas producing enterprise. The proposed solution considers the specific features of typical gas production enterprises belonging to the category of hazardous production facilities. One of the causes of emergency situations may be due to the lack of security of the automated process control system. In this regard, the urgent task is to ensure the correctness of the ongoing risk assessment of existing threats. The analysis of the most popular classes of information security solutions used for industrial networks was carried out, based on which solutions used in the market are considered in the class of threat modeling tools. Identified the specificity of the search for vulnerabilities and risk assessment in the industrial networks of the gas producing enterprise. A generalized mathematical model of information security for an automated process control system of a typical gas producing enterprise, developed by the authors, is described, as well as the application of this model for risk assessment. The basic formulas for calculating the risk assessment are given. The developed solution allows you to automate the process of risk assessment for a given topology of the process control system.**

Ключевые слова — информационная безопасность, газодобывающее предприятие, моделирование угроз, оценка рисков

I. Введение

Промышленные объекты, к которым относятся и объекты газодобывающей отрасли, являются частью критически важной инфраструктуры государства, малейшие аварии на которых, могут привести к существенным экологическим и социальным последствиям и всегда к значительному материальному ущербу. Для автоматизации технологических процессов на подобных объектах используются автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП), построенные на базе промышленных логических контроллеров (ПЛК) [1]. Для передачи данных между датчиками, исполнительными механизмами и ПЛК используются промышленные сети. За пределами промышленных сетей обмен информацией может осуществляться с использованием корпоративных локально-вычислительных сетей, сетей общего доступа, а также по радио-техническим каналам.

Одной из задач корректного функционирования АСУ ТП является обеспечение информационной безопасности (ИБ) этих систем.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

Важно подчеркнуть бытовавшее представление о том, что функционирование АСУ ТП сложно нарушить благодаря следующим обстоятельствам:

- программного обеспечения (ПО) каждой АСУ ТП, как правило, проприетарное и закрытое;
- в локальной сети пользователей на верхнем уровне АСУ ТП проблемы с безопасностью можно решить организацией корректной политики ограничения доступа;
- проникновение в АСУ ТП связано с большими интеллектуальными затратами, а выгода для злоумышленника не очевидна [2].

Отметим, что атакам подвержены не только устройства верхнего уровня, но также устройства среднего и нижнего уровня [3,4]. Все это заставляет по-новому поставить вопросы, связанные с информационной безопасностью предприятий, использующих АСУ ТП.

Большинство решений на рынке для обеспечения ИБ представляют собой как программные, так и аппаратные инструменты, которые для реализации своего функционала требуют интеграции в промышленную сеть. Учитывая, что АСУ ТП газового предприятия представляет собой непрерывный процесс по добыче природного газа, внедрение подобных средств обеспечения ИБ в системах, в которых изначально не было предусмотрено и протестировано их использование, может неблагоприятно повлиять частично или полностью на весь технологический процесс. Такие проблемы могут быть вызваны, как несовместимостью оборудования или ПО, так и встроенным функционалом блокирования этих средств. Исходя из того, что газовое предприятие является опасным промышленным объектом, подобное воздействие может быть причиной отказа оборудования или даже аварии, поэтому при выборе решений для защиты системы необходимо руководствоваться в первую очередь минимальным вмешательством в производственные процессы.

II. Анализ существующих решений

Из предлагаемых на рынке классов решений, оказывающих минимальное воздействие на систему и повышающих ИБ системы, можно выделить следующие [5]:

- средства межсетевого экранирования;
- системы одностороннего межсетевого взаимодействия;
- системы обнаружения вторжений;
- SIEM-системы;
- сканеры уязвимостей;
- средства моделирования угроз.

Если принять во внимание, что из перечисленных классов решений, только последний не требует никаких манипуляций с работающей системой (таких как настройка сетевого оборудования и внедрение дополнительных программных или программно-аппаратных решений в промышленную сеть), то логично полагать, что средства моделирования угроз наиболее безопасный инструмент, который позволяет повысить уровень ИБ системы [6]. Также следует отметить, что подобные инструменты позволяют эффективно спроектировать еще не существующую промышленную сеть, на ранних этапах устраняя потенциальные угрозы.

Для эффективной защиты промышленной сети в первую очередь необходимо провести анализ существующих угроз и уязвимостей, после чего оценить риски и на основе полученных оценок принимать решение о приоритете устранения угроз в системе. К наиболее популярным и поддерживаемым на сегодняшний день относятся следующие решения в области моделирования угроз:

- Attack-Defense Tree Tool;
- Microsoft Threat Modeling Tool 2016;
- OWASP Threat Dragon;
- ThreatModeler.

Большинство решений этого класса ориентированно исключительно на уровень разработки ПО, не предназначенных для корректного моделирования угроз промышленных сетей. Также многие из продуктов не позволяют моделировать угрозы с собственными параметрами и не поддерживают оценку рисков найденных угроз в систему. В связи, с чем разработка средств моделирования угроз и оценки рисков АСУ ТП является актуальной задачей.

III. Метод оценки рисков

При отсутствии адекватной оценки рисков сложно ответить на вопросы о том, с чего следует начинать построение системы защиты информации, какие ресурсы и от каких угроз надо защищать и какие контрмеры являются наиболее приоритетными. Сложно также решать вопрос о необходимости и достаточности того или иного набора контрмер и их адекватности существующим рискам [7]. Таким образом, вопрос оценки рисков, связанных с осуществлением сетевых атак, является первоочередным [8]. Подробное описание метода изложено в работах [9-11]. Далее будут приведены основы разработанного метода оценки риска.

Основным хранилищем, где будет осуществляться поиск уязвимостей, будет база данных общеизвестных уязвимостей ИБ, а именно, Common Vulnerabilities and Exposures (CVE) [12]. Если принять во внимание, что специализированных для АСУ ТП систем оценок уязвимостей на данный момент не существует, то наиболее удобным решением для оценки уязвимостей будет распространенная система оценок Common Vulnerability Scoring System версии 3.0 (CVSS) [13], результат которой принимает значение от 0 до 10.

Достоинством этой метрики, в том числе является возможность самостоятельно оценить уязвимости, используя описанные критерии. Вектор уязвимостей будет выглядеть следующим образом:

$$v = CVSS{:}3.0/AV{:}X/AC{:}X/PR{:}X$$
$$/UI{:}X/S{:}X/C{:}X/I{:}X/A{:}X/E{:}X/RL{:}X/RC{:}X, \quad (1)$$

где X – значения критериев.

Под атакой будем подразумевать реализацию угрозы, при которой нарушается технологический процесс, результатом которого может быть выход из строя компонентов системы или информационных ресурсов [14]. Под ущербом, нанесенным в таком случае, будем понимать совокупность всех уязвимостей конкретной угрозы с учетом потенциального воздействия каждой уязвимости, поэтому для оценки влияния угрозы на компонент системы будем использовать цепочки уязвимостей, которые комбинируют характеристики эксплуатируемости всех уязвимостей (1) компонента. Таким образом, вектор угрозы для каждой характеристики будет принимать максимальный параметр от входящих в него уязвимостей:

$$T=\{v_1,\ldots,v_n\}=CVSS{:}3.0/max(AV)/max(AC)/$$
$$max(PR)/max(UI)/max(S)/max(C)/max(I)/ \quad (2)$$
$$max(A)/max(E)/max(RL)/max(RC)$$

Так как атака может влиять на несколько активов, то ущерб W_i при реализации атаки T_i будем рассчитывать по формуле:

$$W_i = \sum_{j=1}^{n} A_j * w_{ij} \quad (3)$$

где n – количество активов, $w_{ij} \in \{0,\ldots,1\}$ – коэффициент влияния угрозы i на актив j.

После расчета ущерба каждой атаки необходимо оценить этот ущерб, для этого необходимо определить максимальный ущерб $max(W)$, совершаемый при реализации атаки и относительно него оценивать ущерб остальных атак по следующей формуле:

$$E_i = \frac{w_i}{max(W)} * 10, \quad (4)$$

где $E_i \in \{0,\ldots,10\}$ – оценка ущерба угрозы i.

Определим риск, как возможность того, что при реализации определенной угрозы с оценкой T_i произойдет неблагоприятное событие, имеющее оценку ущерба E_i с вероятностью наступления этого события p_i

[15]. Таким образом, общая оценка риска R_i системы будет представлять произведение оценки ущерба E_i, оценки угрозы T_i и вероятности наступления этого события p_i и будет принимать значение от 0 до 100:

$$R_i = E_i \times T_i \times p_i, \quad (5)$$

где $p_i \in \{0,\ldots,1\}$ – вероятность реализации угрозы i.

IV. Описание структуры базы данных

Общая структура базы данных, используемая в разрабатываемом средстве моделирования угроз, представлена на рисунке 1.

Общую схему БД условно можно разделить на шесть участков, в каждом из которых имеются таблицы, связанные между собой.

A. Участок представления устройств и связей

Основными элементами при создании топологии являются устройства и связи, таким образом, необходимо для них создать одноименные таблицы. Таблицы, информация в которых будет фиксированной или пополняться очень редко, например, [Color], [LineType] и другие, будут называться служебными и будут содержать информацию необходимую для работы приложения.

B. Участок конфигурации устройства

Так как комплектующие и ПО на устройстве устанавливаются в нескольких экземплярах [11], то необходимо связать их с основной таблицей устройств при помощи связи «многие-ко-многим». Для удобства использования комплектующих в устройстве необходимо обеспечить разделение на типы и модели.

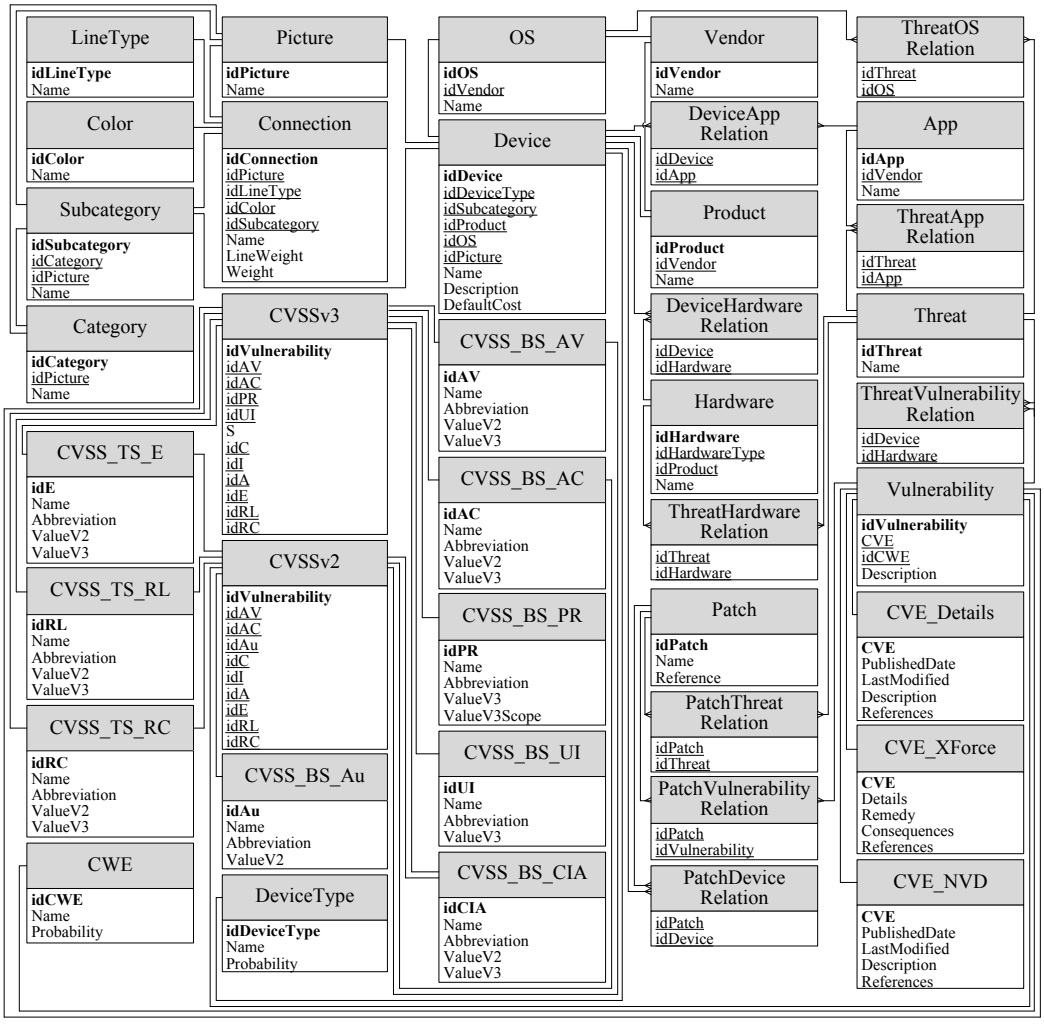


Рис. 1. Общая схема базы данных

C. *Участок связей угроз и атакуемых объектов*

Основной задачей разрабатываемого приложения является анализ рисков ИБ [12], расчет которых в первую очередь основан на оценке угроз. Одна и та же угроза может быть у различных типов указанных объектов, также, как и у одного объекта может быть несколько различных угроз [13], поэтому между всеми объектами используется связь «многие-ко-многим».

D. *Участок для формирования вектора уязвимости*

Для расчета оценки уязвимости при помощи методологий CVSSv2 и CVSSv3 и нормализации формы БД необходимо ввести таблицы, в которых будут храниться постоянные для формирования вектора уязвимости.

E. *Участок связей уязвимостей с угрозами*

Согласно методу [14] угроза состоит из множества уязвимостей, таким образом, необходимо между этими двумя таблицами организовать связь «многие-ко-многим».

F. *Участок устранения угроз и уязвимостей*

Для устранения угроз и уязвимостей у устройства необходимо использовать патчи, которые будут распространяться на угрозы, уязвимости и устройства связями «многие-ко-многим».

V. Описание интерфейса программного продукта

Программный комплекс управления информационными рисками АСУ ТП ГДП «Risk Identification and Management Security Host-based Appliance» (R.I.M.S.H.A.), основанный на методе количественной оценке рисков, описанного раннее, предназначен для идентификации существующих уязвимостей, моделирования угроз и оценки риски ИБ в автоматизированных системах. Программный комплекс R.I.M.S.H.A. позволяет построить топологию АСУ ТП ГДП, связав все компоненты (АРМ операторов и инженеров, сервера ввода-вывода информации, сетевое оборудование, ПЛК и другие) между собой, а также с газодобывающими установками. На основе построенной топологии рассчитывается потенциальный ущерб при реализации угроз на каждый из компонентов. На основе полученных данных рассчитывается риск для каждой из существующих в системе угроз. Программный комплекс R.I.M.S.H.A. также позволяет рассчитывать информационные риски для проектируемых промышленных систем [16]. Источником данных для программного комплекса R.I.M.S.H.A. является разработанная база данных, описанная в предыдущей главе. На рисунке 2 представлен интерфейс главного окна средства моделирования и оценки угроз.

«Панель для проектирования топологии» (область 1 на рис. 1) предназначена для построения топологии АСУ ТП путем перемещения иконок оборудования из панели «Список оборудования» (область 4 на рис. 1).

Панель «Тип оборудования» (область 3 на рис. 1) отображает список объектов множества компонентов, при выборе одного из элементов панели меняется список панели «Вид оборудования», находящейся в той же области. Панель «Вид оборудования» содержит различные виды определенного компонента (например, у сетевых устройств такими могут являться маршрутизаторы, коммутаторы, межсетевые экраны и так далее).

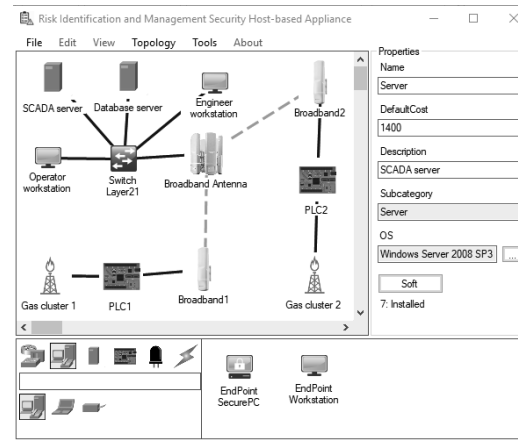


Рис. 2. Интерфейс главного окна программного продукта

На панели «Список оборудования» (область 4 на рис. 1) находится оборудование, при помощи которого создается проект топологии АСУ ТП газового предприятия.

В зависимости от выделенного объекта в панели «Свойства» (область 2 на рис. 1) отображаются его характеристики.

Исходя из указанной топологии и заданных свойств ее компонентов будет выводиться список существующих угроз АСУ ТП. При выборе конкретной угрозы отображаются следующие параметры:

- связанные уязвимости и их оценки (1);
- оценка угрозы (2);
- ущерб при реализации угрозы (3);
- оценка ущерба (4);
- оценка риска при реализации выбранной угрозы (5).

Программное решение также позволяет добавлять индивидуальные уязвимости при помощи параметров CVSS, а затем объединять их в угрозы, автоматически рассчитывая их оценку

VI. Заключение

В результате проведенного анализа существующих решений по обеспечению ИБ АСУ ТП газодобывающего предприятия было решено, что наиболее безопасным с точки зрения потенциального воздействия на технологический процесс является использование средств моделирования угроз. Учитывая, что из предлагаемых на рынке наиболее популярных решений ни одно в полной мере не походит для моделирования угроз АСУ ТП, авторы статьи предложили свой вариант

реализации программного продукта для моделирования угроз и оценки рисков.

Разработанный программный комплекс R.I.M.S.H.A. позволяет:

- спроектировать топологию АСУ ТП газодобывающего предприятия;
- для каждого объекта рассчитывать оценки угроз, ущерба и риска;
- вести учет текущих уязвимостей, угроз и рисков.

Список литературы

[1] Popadko V.E., Barashkin R.L., Zuev S.A., Severenko V.S., Antipov O.D. Simulation Stand for Testing of Oil and Gas Industry Objects Control Algorithm // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russia. – 2015. – Tomsk, Russia, 2015.

[2] Mengazetdinov N., Poletykin A., Promyslov V.G. The information security of digital control systems for nuclear power plants // Journal of Energy and Power Engineering. – 2012. – Vol. 6, No 5.

[3] Zegzhda D.P., Stepanova T.V. Approach to APCS protection from cyber threats // Automatic Control and Computer Sciences. – 2015. – Vol. 49, No 8. – P. 659–664.

[4] Vasiliev Y.S., Zegzhda P.D., Zegzhda D.P. Providing security for automated process control systems at hydropower engineering facilities // Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 63, No 13. – P. 948–956.

[5] Римша А.С. К вопросу об информационной безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами газодобывающего предприятия // Сборник тезисов докладов: Вторая Арктическая совместная науч.–практ. конф., Новый Уренгой. – 2018. – С. 84–85.

[6] Myagmar S., Lee A.J., Yurcik W. Threat modeling as a basis for security requirements // In Symposium on requirements engineering for information security (SREIS). – 2005. – Vol. 2005. – P. 1–8.

[7] Kalashnikov A., Sakrutina E. The Model of Evaluating the Risk Potential for Critical Infrastructure Plants of Nuclear Power Plants // Eleventh International Conference “Management of large–scale system development", Moscow, Russia. – 2018. – P. 1–4.

[8] Singhal A., Ou X. Security risk analysis of enterprise networks using probabilistic attack graphs // In Network Security Metrics, Springer, Cham, Switzerland. – 2017. – P. 53–73.

[9] Rimsha A.S., Iuganson A.N. A Mathematical Model for Information Security of Automated Control Systems for Technical Processes of a Gas Producing Enterprise // MMET NW 2018 – IEEE Northwest Russia Conference on Mathematical Methods in Engineering and Technology, Saint–Petersburg. – 2018. – P. 214–217.

[10] Римша А.С., Югансон А.Н., Римша К.С. Об одном подходе к формированию перечня мер по защите информации в беспроводных сенсорных сетях газодобывающего предприятия // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. – 2018. – № 2(28). – С. 60–70.

[11] Rimsha A.S., Zakharov A.A. Method for Risk Assessment of Industrial Networks’ Information Security of Gas Producing Enterprise // 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, Russia. – 2018.

[12] Paté‐Cornell M.E., Kuypers M., Smith M., Keller P. Cyber Risk management for critical infrastructure: a risk analysis model and three case studies // Risk Analysis. ‐ 2017. ‐ Vol. 38, No 2. ‐ P. 226‐241.

[13] Doynikova E., Chechulin A., Kotenko I. Analytical attack modeling and security assessment based on the common vulnerability scoring system // In 20th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), St. Petersburg, Russia. – 2017. – P. 53–61.

[14] Захаров А.А., Римша А.С., Харченко А.М., Зулькарнеев И.Р. Анализ информационной безопасности автоматизированных систем управления техническими процессами газодобывающего предприятия // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. – 2017. – № 3(25). – С. 24–33.

[15] McCormac A., Zwaans T., Parsons K., Calic D., Butavicius M., Pattinson M. Individual differences and information security awareness // Computers in Human Behavior. – 2017. – Vol. 69. – P. 151–156.

[16] Римша А.С., Римша К.С. Программно–алгоритмическое решение для оценки и учета рисков АСУ ТП газодобывающего предприятия // Безопасность информационного пространства: сборник трудов XVII Всероссийской научно–практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Челябинск. – 2018. – С. 165–175.

3D системы, иммитирующие визуально наблюдаемые объекты для тренировки глазомера человека

Роганов В.Р.
Пензенский государственный технологический университет
Пенза, Россия
vladimir_roganov@mail.ru

Кувшинова О.А.
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Пенза, Россия
oly791702@mail.ru

Есимова Н.
Пензенский государственный технологический университет
Пенза, Россия
nurzipa.esimova@mail.ru

Лавендел Ю.
Рижский технический университет
Рига, Латвия
jurijs.lavendels@.rtu.lv

***Abstract* — The existing hardware and software complexes solving the problems of 3D-images synthesis solve the unified synthesis problems on the plane of the monitor screen of the 2D projection of three-dimensional objects. This method of image synthesis does not take into account the specific requirements of specialized cognitive learning environments. In particular, simulators of the visual environment of simulators should simulate visually observed models of three-dimensional objects with a quality sufficient for professional training of the eye. Such a task is divided into a number of subtasks: the choice of a specific optical-hardware system for simulating a pseudo-volumetric image; selection of synthesis rules on the screen for forming an intermediate image of a two-dimensional projection of a given three-dimensional object or objects; teaching the human visual apparatus to view a video sequence from two-dimensional projections and make a person assume that he sees a three-dimensional object and can at the same time professionally train his eye (visually assess the distance to visible three-dimensional objects). The article discusses the conditions under which the optical-hardware-software complex of the simulator of the visual environment can be used in simulators for training pilots and vehicle drivers to solve the problem of visual orientation in space.**

Ключевые слова —3D визуализация, тренажеры, визуализация, профессиональная тренировка глаза

I. Введение

Быстрое развитие вычислительных систем, расширение их возможностей являются главным фактором все более широкого их внедрения в различные сферы научной и практической деятельности [1]. Особенно быстро развивается направление компьютерного синтеза 3D изображений [2]. В итоге, в настоящее время, сформировалась новая отрасль информатики - визуальное 3D моделирование [3]. Ее можно определить, как науку о математическом моделировании с помощью оптико-аппаратно-программных систем геометрических фигур, раскрашенных в соответствии с положением источников освещения, с заданным расположением полигонов, с выбранным разработчиком вариантом окраса полигонов (монохромным или текстурированным) и учётом особенностей прозрачности среды визуализации [4]. Интерес к синтезу изображений объясняется их высокой информативностью при использовании в различных обучающих комплексах, как например авиационные тренажёры, автотренажёры, тренажёры операторов-наводчиков, медицинские тренажёры [5]. Такие тренажёры разработаны для формирования профессиональных навыков у обучаемого [6]. При этом, как показывают результаты исследований, до 90% всей информации человек получает через зрительный аппарат [7].

Используемые аппаратно-программные системы математического моделирования в трехмерной графике созданы для передачи обучаемому ощущению глубины пространства, пространственной формы и структуры объекта [8]. В зависимости от поставленной задачи это может быть или обучение врача постановке диагноза при визуальном обследовании больного (при этом допускается масштабирование рассматриваемого органа) или профессиональная тренировка глазомера в тренажёрах подготовки лётчиков и водителей транспортных средств [9]. Во всех случаях сначала синтезируется на экране формирования промежуточного изображения двухмерная проекция заданной части трёхмерного виртуального пространства [10], затем полученный видеоряд с помощью оптики через глаз воздействует на зрительный аппарат человека, создавая у него ощущение, что он видит реальный 3D-объект [11].

II. Основная часть

В настоящем времени образовательные технологии предполагает широкое использование информационно-обучающих систем [12] и тренажёров, например, для подготовки водителей транспортных средств, летательных аппаратов [13]. Особенностью таких тренажёров является «погружение» наблюдателя в искусственно сформированную когнитивную визуальную среду с элементами дополненной реальности, позволяющее в реальном масштабе времени с циклом смены очередного кадра менее 120 мсек, наблюдать трёхмерные модели, обеспечивая, в частности, тренировку глазомера [14]. Последнее особенно важно для точного определения времени движения модели транспортного средства в моделируемом пространстве, а также расстояния до видимых моделей трёхмерных объектов [15] когнитивной моделирующей среды.

В оптико-аппаратно-программных системах синтеза 3Dмоделей, ориентированных на воздействие на определённые составляющие зрительного аппарата человека с целью создания у него уверенности, что он рассматривает реальный 3D объект выделим 3 основных узла:

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

- Экран формирования промежуточных изображений [16]. В процессе синтеза визуально наблюдаемого 3Dизображения это первый шаг, ориентированный на способности зрительного аппарата человека различать объекты обрабатывая световые волны частот видимого спектра. Эти волны испускают пикселы выбранного экрана формирования промежуточного изображения на котором формируется двухмерная проекция выбранной реальной или виртаульной камерой наблюдения часть трёхмерной виртуальной сцены. На самом деле формируется прямоугольный массив из рядов и столбцов, плотно прилегающих друг к другу пикселей, каждый из которых светится своим цветом. Плотность расположения пикселей настолько велика, что в сочетании с их количеством зрительный аппарат человека (дискретно считывающий информацию) заставляется человека считать, что он видит целостные предметы, а не дискретный набор светящихся точек.

- Оптика [17]. Существует два типа оптических преобразователей используемых при 3Dмоделировании в рассматриваемых нами случаях. На последнем этапе визуальная информация в зрительный аппарат человека поступает через глаз человека. Глаз человека это сложная оптическая система**,** главными компонентами которой являются роговица, хрусталик и стекловидное тело. Лучи света попавшие в глаз человека, преломляясь на границе воздух–роговица, проходят далее через хрусталик (линзу с изменяющейся оптической силой) и создают изображение на сетчатке. Особенность глаза как оптического инструмента состоит в способности рефлекторно изменять оптическую силу глазной оптики в зависимости от удаления рассматриваемого предмета. Такое приспособление глаза к изменению положения наблюдаемого предмета называется *аккомодацией* [2]. Однако, для получения обеспечения возможности профессионально оценивать расстояние доя видимых 3Dмоделей, так же как человек определяет расстояние до видимых реальных объектов, в тренажёростроении используют два метода. Наиболее известный метод использования диспаратных очков, когда сформированное для каждого глаза сформированное по определённым правилам одно из двух изображений с помощью промежуточной оптики с экрана формирования промежуточного изображения доставляют в соответствующий глаз человека. Воздействуя на диспарантность зрения человека можно создать иллюзию появления перед человеком 3Dмодели имея всего два изображения. Вторым методом является воздействие на аккомодацию и конвергенцию зрительного аппарат человека, когда на экране формирования промежуточного изображения синтезируется видеоряд, как правило, за счёт наличия подвижного наблюдателя. На практике, в авиационных тренажёрах, используются два типа безочковых комплексов визуального моделирования 3Dмоделей, с воздействием на аккомодацию и конвергенцию, в них между экраном формирования промежуточного изображения и глазом человека ставится специальная оптика. Один из двух видов коллиматоров: соосный зеркальный (для формирования области откуда можно комфортно один человек может видеть 3Dмодель) или система названная WIDE (для формирования области откуда можно комфортно несколько человек может видеть 3Dмодель).

- Зрительный аппарат подготовленного человека. Как показали исследования, не всегда человек может увидеть 3Dизображение. В частности при использовании диспаратных очков, был зафиксирован интервал обучения конкретного человека видеть 3Dмодель равны шести месяцам. Испытуемый в диспаратных очках видел четкое изображение, рассматривая изображения на экране формирования промежуточного изображения, но не мог профессионально оценивать расстояние до выбранных моделей (при этом он прошёл тест на достаточно точное визуальное определение расстояний до выбранных объектов на реальной местности). При использовании безочковых систем 3Dмоделирования, был зафиксирован один такой случай (при этом испытуемый не прошёл тест на возможность с помощью глазомер оценивать расстояние до выбранных объектов на реальной местности) и это был в его практике первый случай работы с оптико-аппаратно-программными комплексами синтеза 3Dизображения для авиационных тренажёров. Во всех случаях цикл смены очередного кадра на экране формирования промежуточного изображения был выбран в 80 мсек. Таким образом исследования 3Dсистем визуального моделирования трёхмерного изображения местности являлись продолжением исследований начатых в советское время группой разработчиков обучающих систем и имитаторов визуальной обстановки авиационных тренажёров. Результатом этих исследования явилась необходимость считать, что все системы 3Dмоделирования, позволяющие профессионально тренировать обучаемому глазомер являются псевдообъёмными (процесс моделирования 3Dизображения заданного качества ориентирован на особенности и обученность зрительного аппарата конкретного человека видеть 3Dизображения и визуально оценивать расстояние до них). Интервал обучаемости зрительного аппарата человека оценивается по времени от одного сеанса длительностью менее минуты до 100 сеансов длительностью в полчаса каждый.

В ряде случаев, двухмерная проекция трёхмерного объекта создаёт у наблюдателя уверенность, что он видит 3Dобъект. Однако, если человек будет пытаться определить расстояние до этого объекта он всегда оценит это расстояние как дистанцию между глазом человека и плакатом с рассматриваемым изображением (Рис.1), или дистанцией между глазом человека и экраном формирования промежуточного изображения.

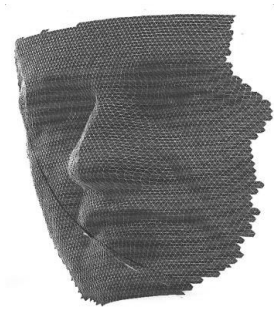
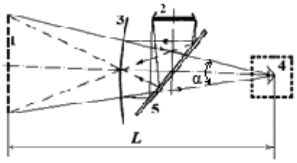


Рис. 1. Пример «неплоского» изображения, напечатанного на листе бумаги

В авиационном тренажёростроении с конца XX века используются 3Dсистемы моделирования трёхмерного визуально наблюдаемого изображения, называемых имитаторы визуальной обстановки (ИВО) позволяющие тренировать лётчиков визуальной посадке на модель ВПП, или обучать профессиональным навыкам дозаправке летательного аппарат в воздухе. Отличительной особенностью таких систем от наиболее известных применяемых в киноиндустрии и в развлекательных системах – необходимость профессионально тренировать свой глазомер в заданных учебных ситуациях.

Наиболее часто в авиационных тренажёрах применяются безочковые 3D-индикаторы, когда используется оптическая система с передачей изображения с экрана формирования промежуточного изображения в зрительный аппарат человека через глаз с помощью коллиматора, настраивающего взгляд человека на «взор в бесконечность» (Рис.2) [13]. α



1– мнимое изображение, 2–экран формирования промежуточного изображения, 3–сферическое зеркало, 4–область наблюдения 3Dизображения, 5–светоделительная пластина, *L* –расстояние до ближайшей 3Dмодели, α– вертикальный угол камеры наблюдения.

Рис. 2. Схема безочкового 3Dиндикатора

Обязательным условием, при использовании безочковых 3Dиндикаторов является наличие или подвижного наблюдателя, или наличие в камере наблюдения постоянно присутствующей подвижной модели трёхмерного объекта. Это условие позволяет воздействовать на зрительный аппарат наблюдателя синтезируя на экране формирование промежуточного изображения видеоряд (время смены очередного кадра, в настоящее время выбрано 80 мсек, максимальный интервал смены кадра может быть 120 мсек.). При совпадении телесных углов передающей камеры и камеры наблюдения 3D изображение рассматривается в масштабе 1:1. При несовпадении по вертикали, или по горизонтали наблюдаются искажения. В частности если коэффициент искажения по горизонтали и по вертикали одинаков – возникает эффект «бинокля». Если мы смотрим в бинокль с одной стороны – мы видим увеличенное изображение, если смотрим с другой стороны – видим уменьшенное изображение (в нашем случае и увеличение и уменьшение кратно коэффициенту искажения). Ещё одной особенностью безочковых 3Dиндикаторов является «мёртвая зона» L. Это расстояние между зоной в которой должен находиться хотя бы один глаз наблюдателя и самым близкой видимой 3Dмоделью. В индикаторах, выпускаемых в советское время авиа тренажёростроительными предприятиями это расстояние оценивалось в 60 метров. В настоящее время его удалось уменьшит до 5 метров. Использование таких 3Dиндикаторов позволило решить не только задачу обучения визуальной посадке на модель искусственной ВПП аэродрома (обычно длинной не менее 3 км), но и задачу обучения визуальной осадке на укороченную ВПП авианесущего крейсера.

При использовании двухканального ИВО с диспаратными очками (Рис.3), доставляющие каждому глазу человека синтезированное для него изображение, высвеченное, как и в первом случае, на экране формирования промежуточного изображения, мёртвой зоны нет, что позволяет при необходимости работать обучаемому с визуально наблюдаемой трёхмерной моделью, находящейся на расстоянии менее 5 метров он наблюдателя. При этом для каждого газа должна формироваться своя камера наблюдения с телесными углами равными углам реальных или виртуальных передающим камер.

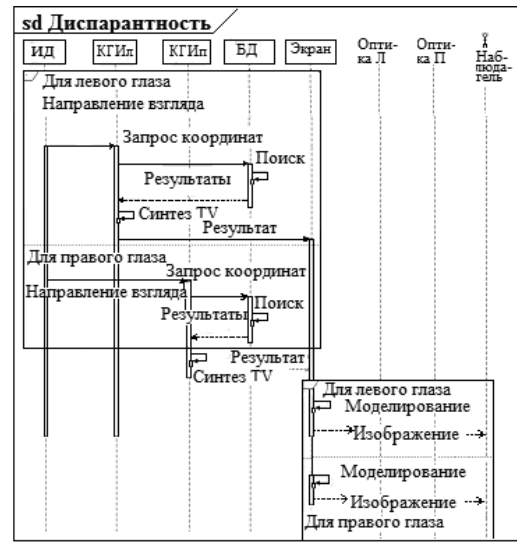


Рис. 3. UML диаграмма развёртки процесса моделирования трёхмерного изображения в псевдообъёмной системе с диспарантными очками

Так как в ИВО, при использовании псевдообъёмных устройств индикации зрительный аппарат человека получает информацию о двухмерной центральной проекции, высвеченной на двухмерной плоскости, а за счёт значительного числа кадров видеоряда с постоянно

заменяемым ракурсом наблюдения отдельных трёхмерных моделей (при использовании безочковых 3D-индикаторов), или за счёт двух кадров синтезированных для каждого глаза человека, то это означает, что реальной визуально наблюдаемой 3Dмодели нет. Она получается за счёт обработки информации, доставленной с помощью оптики, в глаза человека (которые выполняют роль датчиков) и затем за счёт облученности зрительного аппарата человека (который выполняет роль счётно-решающего и анализирующего устройства). И человек считает, что видит 3Dмодель. Все мы разные. Следовательно, зрительный аппарат одного человека отличается от зрительного аппарата другого человека. Тогда имеется вероятность, что найдётся человек, который не сможет увидеть 3Dмодель. Исследования показали, что такие люди имеются. Но во всех случаях, после ряда обучающих тестов они смогли увидеть 3Dмодель с качеством достаточным для тренировки глазомера (за исключением двух человек, которые поучили настолько негативные впечатления от просмотра 3Dмодели с использование двухканальных устройств индикации и диспарантых очков, что они отказались от дальнейших экспериментов над своим зрительным аппаратом).

Исследования также показали, что в тренажёрных комплексах качество визуальной 3Dмодели, позволяющей человеку оценить расстояние от его места нахождения до расположения этой модели в пространстве, зависит не только от выбранной псевдо объёмной системы но и от насыщенности рассматриваемого изображения различимыми раскрашенными полигонами и огнями

III. Заключение

При выборе системы синтеза 3Dизображения в тренажёрных комплексах, необходимо учитывать, что используются псевдообъёмные системы моделирования, ориентированные на воздействие на определённые составляющие зрительного аппарата конкретного человека.

Качество синтеза 3Dизображения зависит как от обученности зрительного аппарата человека видеть 3Dмодель, так и от технических характеристик оптико-аппаратно-программной системы 3Dмоделирования.

Список литературы

[1] Жашкова Т.В., Михеев М.Ю., Роганов В.Р. Интеллектуальные системы и технологии//Учебно-методическое пособие / Пенза, 2015. Том Часть 1. – 65 С.

[2] Найниш В.А., Моисеев В.Б. Моделирование оптимальной обучающей технологии // Научно-методическое пособие для преподавателей технического вуза. РОСОБРАЗОВАНИЕ, ПензГТУ, Пенза, 2010. – 210 с.

[3] Морозов Б.Б., Долговесов Б.С., Мазурок Б.С., Городилов М.А. Построение распределённой мультимедийной виртуальной среды с многоканальной виртуальной среды с многоканальной визуализацией медиаданных на графических акселераторах./ Программирование 2014. Т. 40. № 4. – С. 55-63.

[4] Vyatkin S.I., Dolgovesov B.S., Ovechkin V.V., Chizhik S.E. “Photorealistic imaging of digital terrains, freeforms and thematic textures in realtime visualization system voxel-volumes” in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Modeling, Simulation and Visualization of Sensory Response for Defense Applications. sponsors: SPIE; editors: N.L. Faust, J.D. Illgen. Orlando, FL, 1997. pp. 30-36.

[5] Овечкис Ю.Н. Методы и средства формирования объемных изображений в обучающих системах// диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений. Москва, 2006

[6] Roganov V.R., Asmolova E.A., Seredkin A.N., Chetvergova M.V., Andreeva N.B., Filippenko V.O. “Problem of virtual space modelling in aviation simulators” in Life Science Journal. 2014. Т. 11. № 12. p. 1097.

[7] Роганов В.Р. Постановка задачи совершенствования эргатического-оптико-аппартно-программного комплекса моделирования визуально наблюдаемой части виртуального пространства для авиационного тренажёра//В сборнике: Методы и средства измерений в системах контроля и управления. Сборник статей международной конференции. Под редакцией Жашковой Т.В.. 2016. С. 126-138.

[8] Елхов В.А., Кондратьев Н.В., Овечкис Ю.Н., Паутова Л.В. Особенности формирования объёмного изображения в цифровом стереоскопическом кинематографе//Мир техники кино. 2011. № 20. С. 4-8.

[9] Роганов В.Р., Михеев М.Ю. К задаче разработки киберфизической системы имтаторов тренажёра, моделирующих пространство за остеклением кабины/Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2017. Т. 2. С. 339-342.

[10] Асмолова Е.А., Роганов В.Р. Моделирование визуально наблюдаемой трёхмерной модели окружающего пространства вокруг кабины авиационного тренажёра//В сборнике: Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажёров. Сборник статей международной научно-практической конференции. 2016. С. 16-28.

[11] Елхов В.А., Овечкис Ю.Н., Паутова Л.В., Паутов А.А. Исследование и оптимизация параметров, влияющих на качество стереокомпьютерного изображения/Техника кино и телевидения. 2003. № 5. С. 37

[12] Вяткин С.И., Долговесов Б.С., Есин А.В. Геометрическое моделирование и визулизация функционально заданных объектов./ Автометрия. 1999. № 6. –С. 84.

[13] Роганов В.Р., Сёмочкин А.В., Филиппенко В.О., Асмолова Е.А., Михеев А.М. К вопросу о расчетах основных параметров оптико-аппаратного устройства индикации, позволяющего реализовать безочковый 3D индикатор/XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2015. № 4 (26). С. 182-199.

[14] Vyatkin S.I., Dolgovesov B.S., Kaipov N.R. Texture mapping of plane and curvilinear surfaces, free shapes and volumes/ Автометрия. 2002. № 1. –pp. 17-24

[15] O. Kuvshinova, L. Nainish, E. Roganova, E. Meshcheryakova. Some evaluations of efficiency of machine synthesis of terrain images affecting learning process using simulators for vehicle drivers. Education and Humanities Research, Volume 289, (CSIS 2018) pp.133-137

[16] Вяткин С.И., Долговесов Б.С., Корсун А.С. Определение столкновений функционально заданных объектов в задачах компьютерной графики / Автометрия. 2003. Т. 39. № 6. – С. 119-126.

[17] Елхов В.А., Кондратьев Н.В., Овечкис Ю.Н., Паутова Л.В. Безочковая система показа объемных многоракурсных киноизображений/Мир техники кино. 2009. № 11. С. 2.

Использование статистических моделей для совершенствования управления производственными циклами погружного электрооборудования нефтедобычи

Романов В.С.
ФГБОУ ВО Тольяттинский государственный университет
Тольятти, Россия
Romanov_v.s@mail.ru

Гольдштейн В.Г.
ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
vgg41@yandex.ru

Васильева Н.С.
ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
nata.vasileva@yandex.ru

***Abstract* — The problems of using statistical models of accidents of electrical oil production complexes with submersible electric motors (ECSEM) to improve the management of production cycles of submersible electrical equipment (SEE) are considered. For this, in particular, an analysis of operational physical effects (OPE) is carried out, as the main cause of aging and wear of the ECSEM and its elements and the formation of an information database (ID), which collects information about 8760 accidental failures in oil production enterprises (OPE) of the Volga region for the period 2014 ÷ 2017 years, as well as the determination of the probability distributions of failures of SEE according to the ID. These statistical models make it possible to predict the boundary states of typical sets and specific SEE electrical installations and, at a given operating time, determine the prerequisites, the main patterns of occurrence and the mean time to failure of elements and the ECSEM in general. The obtained results were used to substantiate a set of recommendations for improving the efficiency of operation of the ECSEM.**

Ключевые слова —погружное электрооборудование, погружные электродвигатели, нефтедобыча, надежность, статистика отказов, технологические нарушения, электротехнические комплексы нефтедобычи с погружными электродвигателями, наработка на отказ.

I. Введение

Анализ работы и создание условий для безотказного функционирования оборудования стратегически важных отраслей промышленности является одной из важнейших частей стратегии по обеспечению стабильности и независимости любого государства, в том числе и Российской Федерации. В первую очередь данное утверждение справедливо для главной составляющей предприятий нефтедобычи (ПН) – электрооборудования добывающих скважин, а именно – электротехнических комплексов нефтедобычи с погружными электродвигателями (ЭКПЭД), наиболее ответственным элементом которых являются погружные электродвигатели (ПЭД). Для обеспечения эффективной эксплуатации электрооборудования ЭКПЭД необходимо решение целого комплекса научных, технических, экономических и организационных задач [1]. Одним из приоритетных направлений повышения эффективности работы ЭКПЭД, прежде всего, ПЭД, является полномасштабный анализ условий их эксплуатации, позволяющий выявить существующие резервы для повышения эксплуатационной эффективности ЭКПЭД и ПЭД.

Можно констатировать, что моральный и физический износ оборудования ЭКПЭД в нефтяной отрасли России приводит к стремительному росту оборудования, отработавшего свой нормативный ресурс. В среднем эти показатели составляют ≈ 2 ÷ 5% в год от общего числа оборудования ЭКПЭД [2]. Поддержание изношенного оборудования ЭКПЭД в работоспособном состояние требует все более возрастающих средств на организацию ремонтов, что в целом по отрасли приводит к увеличению оборудования с преждевременными отказами, уменьшению величины наработки на отказ и, как следствие, межремонтного периода основных производственных средств. В сложившихся условиях эксплуатации ЭКПЭД удельные затраты на ремонты в нефтяной отрасли почти в 2 раза выше, чем в смежных отраслях [3].

II. Теория. Основная часть исследования

При эксплуатации ЭКПЭД нефтедобычи объективно происходит непрерывное снижение, либо полная потеря заложенных при проектировании (в целом и по отдельным составляющим) свойств, характеристик и, как следствие, работоспособности [4]. Это происходит под воздействием и влиянием энергии ЭФВ: электромагнитных, термических, механических, гидродинамических и др. Они определяются стационарными и переходными эксплуатационными процессами. Рассмотрим классификацию основных ЭФВ.

Электромагнитные ЭФВ (ЭЭФВ). Как показывает анализ, это - важнейший кластер ЭФВ, как в количественном отношении, так и по влиянию в целом на техническое состояние и работу ЭКПЭД. В переходных режимах ЭКПЭД они чаще всего возникают при внешних (грозовых) и внутренних (в основном коммутационных) перенапряжений. [5, 6]. Не менее важной причиной ЭЭФВ являются значительные токи в пусковых режимах ПЭД. В тяжелых условиях работы ПЭД (большая высота напора, забит впускной фильтр, отложения солей и парафина, износ узлов электроцентробежного насоса (ЭЦН) и т.д.) величина и продолжительность пусковых токов значительно превышают расчетные значения (в 7 ÷ 9 раз) [7].

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

Повышенные значения пусковых токов приводят к значительным нагрузкам на все элементы ЭКПЭД. Значительные ЭЭФВ возникают в режимах перегрузок и коротких замыканий в питающей части ЭКПЭД, а именно: в трансформаторах, системе управления и наиболее уязвимой с этой точки зрения подземной части – в погружном кабеле и, собственно, ПЭД. Кроме этого, необходимо учитывать и нарушения работы ЭКПЭД в статических режимах от постоянного развивающегося процесса старения изоляции всех составляющих ЭКПЭД.

Термические ЭФВ (ТЭФВ). Опыт и данные эксплуатации установок ЭЦН (УЭЦН) определяют ТЭФВ как важнейший в составе воздействующих факторов, который в сочетании с интенсивными ЭЭФВ, температурой, давлением и др. обуславливает быстрое старение изоляции электрической части УЭЦН [4]. Абсолютные значения температуры и давления влияют в меньшей степени, чем их перепады в динамике. Учет этих величин также особенно важен, если УЭЦН работает в периодическом режиме.

Утверждается [8], что температура, являясь значительным действующим фактором разрушения изоляции УЭЦН, определяется, с одной стороны, как физическая характеристика пласта в рабочей зоне УЭЦН (пластовая температура), а с другой – тепловыделением этой электроустановки в зависимости от текущего режима. В составе факторов эксплуатации, обусловленных месторождениями и, собственно, скважинами, температура присутствует как внешнее воздействие, поскольку непосредственно зависит от глубины спуска насоса [7]. Абсолютные значения температуры и давления влияют в меньшей степени, чем их перепады в динамике. Учет этих величин также особенно важен, если УЭЦН работает в периодическом режиме [9]. Особый механизм старения изоляции создают пиковые ТЭФВ, возникающие в режимах торможения ПЭД, и, прежде всего, при пусках, когда токи превосходят номинальные в 7 ÷ 9 раз.

Механические ЭФВ (МЭФВ) в основном связаны с нарушениями регламента спускоподъемных операций и некачественной работой бригад подземного ремонта, в частности, по монтажу ЭЦН, плохой промывке скважин, негерметичности НКТ, что приводит к срывам подачи, которые представляют собой аварийные ситуации, в процессе которых развиваемый установкой напор становится меньше гидростатического давления столба жидкости в колонне НКТ [10, 11].

Гидродинамические ЭФВ (ГЭФВ) чаще всего возникают в периодических режимах работы скважин. В них необходимо учитывать специфику откачиваемого потока, представляющего собой многофазную динамическую смесь жидкости и газа. В отличие от однофазной среды, где возможны два режима – ламинарный и турбулентный, в многофазной газожидкостной – возможны 4 структуры потока: пузырьковая, пробковая, эмульсионная и кольцевая [12].

Величина энергии и характер конкретных ЭФВ определяет фактические результаты процессов или частичного, или полного разрушения элементов ЭКПЭД, или накопления в нем повреждений, приводящих к необратимым последствиям. В работах авторов [7, 13] выполнено математическое моделирование износа и накопления повреждений в ЭКПЭД, разработан математический аппарат и описаны законы износа и накопления повреждений в ЭКПЭД, а именно: линейное суммирование повреждений, нелинейный процесс накопления повреждений, закона нелинейного суммирования повреждений, многостадийная модель накопления повреждений и пр. Рассмотренные модели накопления повреждений дают адекватные показатели накопления повреждений только при достаточном количестве проведенных экспериментов и полученных при этом значениях ЭФВ [14]. В результате сделан вывод, что адекватная аналитическая математическая модель может быть сформирована только с существенными допущениями и упрощениями. Поэтому практическим инструментом анализа работоспособности ЭКПЭД может служить статистическая модель, фактической базой которой является обобщенная статистическая информация об аварийности ЭКПЭД на определенном интервале эксплуатации и возможность дифференцированного разделения этой информации по элементам ЭКПЭД.

Сбор, обработка статистических данных по отказам оборудования с последующим анализом причин, вызвавших данное нарушение, является категорически необходимой и экономически обоснованной мерой, направленной на комплексное повышение качества уровня эксплуатации оборудования и как следствие повышение эксплуатационной эффективности всей отрасли нефтедобычи в целом [15].

СамГТУ и АО «Самаранефтегаз» совместно сформирована и верифицирована информационная база актуальных (2013 ÷ 2017 г.г.) статистических данных по аварийности в эксплуатации ЭКПЭД в Поволжском регионе. На ее основе, как обобщения и уточнения накопленного ранее и в настоящий момент опыта эксплуатации с помощью интеллектуального анализа и вероятностного моделирования произведены систематизация и оценка текущего состояния парка ПЭД, а также определены и ранжированы факторы, приводящие к технологическим нарушениям. Это позволило сформулировать комплекс технических и организационных мероприятий для их минимизации.

В данной работе произведена выборка технологических нарушений по группам, в зависимости от отказавшего узла элементов конструкции ЭКПЭД. По ее результатам анализируется выход из строя основных узлов ЭКПЭД на нефтяных месторождениях ПН Поволжья за период наблюдений 2013 ÷ 2017 г.г. и, в частности, построена диаграмма количества отказов с распределением по элементам конструкции ЭКПЭД (рис. 1).

На этой диаграмме дано процентное соотношение отказов основных конструктивных элементов ЭКПЭД. Наибольшее количество отказов приходится на электрическую часть ЭКПЭД – более 50%. Данная статистика подтверждает информацию из технических литературных источников [3, 4, 8], а также исследований авторов [7, 15, 16]. Наибольшее количество отказов в комплексе ЭКПЭД диагностировано в узле «кабель-ПЭД», то есть наименее надежными элементами являются ПЭД (22,7% отказов) и погружная кабельная линия (34,3% отказов).

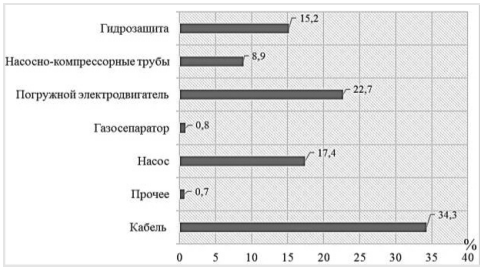


Рис. 1. Диаграмма количества отказов с распределением по элементам конструкции ЭКПЭД (все значения в %)

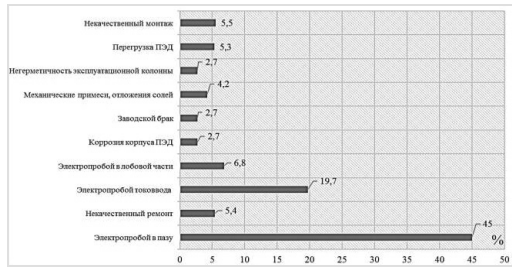


Рис. 2. Диаграмма характера повреждений погружных электродвигателей

Описанные диаграммы позволяют связать временные характеристики отказов с детализацией характера повреждения и вызвавших его факторов, полученных по информационной базе, с типом, причинами и обстоятельствами возникновения отказов для каждого из элементов ЭКПЭД [17].

Из-за большого объема фактического материала в данной работе представлены отказы, связанные с ПЭД, поскольку именно названный узел формально является определяющим общее техническое состояние ЭКПЭД [18]. Отказы и нарушения ПЭД можно разделить на статистически наиболее значимые группы по следующим характерным эксплуатационным условиям и причинам.

1) Ухудшение технического состояния, которое приближенно можно оценивать показателями эксплуатационных ресурсов.

2) Некорректное выполнение, а в ряде случаев грубое неисполнение правил обслуживания ПЭД, что объясняется снижением уровня организации рабочего процесса и квалификации персонала.

3) Опасные ЭФВ.

На рис. 2 представлена диаграмма характера повреждений ПЭД. Причинами и сопутствующими обстоятельствами выделенных технологических нарушений ПЭД являлись:

- сложные условия эксплуатации при наличие разнородных осложняющих факторов – неоднородный состав и свойства пластовой жидкости в сочетание с разнообразными примесями, кривизна ствола, солеотложения [3, 9] и т.п., которые приводят к засорению УЭЦН, перегрузке ПЭД и отказу;
- значительные размеры конструкции в сочетание с малым поперечным сечением, что приводит к снижению ее жесткости [19];
- большая глубина спуска УЭЦН по вертикали, высокая температура пластовой жидкости (более 90º С), работа ПЭД с нагрузками близкими или превышающими номинальные [20] приводят к перегреву и отказу;
- нарушение герметичности системы «кабель-ПЭД-гидрозащита»;
- коррозия составных элементов УЭЦН и ПЭД [11, 12];
- недостаточный приток по причине заведомого спуска ЭПУ большего типоразмера, чем производительность скважины [1, 15];
- несоответствие параметров ПЭД и насоса [17].

Среди множества самых разнообразных причин аварий и отказов ПЭД можно выделить наиболее характерные - электропробой обмотки в пазу статора – 45%, электропробой токоввода - 19,7%. Невозможно не отметить тот факт, что на долю некачественного ремонта (5,4%) и некачественного монтажа (5,5%) ПЭД приходится ~ 11% от общего количества повреждений. Все это приводит к множеству параметрических отказов с общим отрицательным результатом, которым является снижение дебита конкретной скважины и месторождения в целом.

В предыдущих исследованиях [13, 16, 17] детально рассмотрены методы и средства повышения эффективности эксплуатации ЭКПЭД и, прежде всего, ПЭД. Они были использованы для поиска и регрессионного определения функциональных зависимостей для оценки вероятностей аварийных отказов [21, 22, 23] на основе соответствующих локальных наборов данных по группам ПЭД. В таблице I представлены вероятностные функции плотности распределений отказов для выборок условных групп ПЭД по данным описанной выше статистической базы данных отказов ПЭД. Объединение ПЭД в условные группы при статистическом анализе их отказов производилось по мощности ПЭД без учета диаметра. В результате были получены четыре условные группы ПЭД с разбросом по мощности ±7%: ПЭД-32, ПЭД-45, ПЭД-56, ПЭД-63.

ТАБЛИЦА I. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАРАБОТКИ НА ОТКАЗ ПЭД

Закон распределения	**Группы ПЭД**	**Функция плотности *f(t)***	**Значимость *(p)* по критериям**	
			λ–критерий	***χ^2–критерий***
Вейбулла	ПЭД-56	$f(t)=0{,}02117\cdot t^{-0{,}3915}\cdot e^{-0{,}0348t^{0{,}6085}}$	0.97	0,81
Экспоненциальный	ПЭД-63	$f(t)=0{,}02877\cdot e^{-0{,}02877\cdot t}$	0,90	0,32
Логнормальный	ПЭД-32	$f(t)=0{,}149\cdot e^{-0{,}693\cdot k}\cdot t^{-1}$	0,62	0,41
	ПЭД-45	$f(t)=0{,}2249\cdot e^{-0{,}635\cdot k}\cdot t^{-1}$	0,96	0,95

Для проверки гипотез о близости эмпирического и теоретического законов распределения использовались λ – критерий Колмогорова и критерий согласия χ^2 – Пирсона [24, 25].

III. Обсуждение результатов

С помощью многофакторного анализа статистики отказов и режимов работы ЭКПЭД на основе статистических моделей, представленных в таблице I, были сформулированы и обоснованы направления и мероприятия по уменьшению числа отказов оборудования и повышению надежности, как самих ЭКПЭД, так и составных элементов комплекса, в частности ПЭД:

- применение современных средств защиты от наиболее опасных ЭФВ – перенапряжений, а именно: усовершенствованных оксидно-цинковых нелинейных ограничителей перенапряжений, эффективных вакуумных и элегазовых выключателей и др.;
- применение деталей и узлов ПЭД с оптимальным (равномерным) распределением нагрузок (тепловой, механической и электрической);
- композитных материалов, обладающих повышенной прочностью с улучшенными свойствами;
- защита от коррозии и применение коррозионностойких материалов, антикоррозийных покрытий в элементах конструкции ПЭД, использование ингибиторов коррозии и материалов с низкой электропроводностью;
- применение для ПЭД, как специфичных электрических машин, улучшенной изоляции для обмоточных проводов, способной выдерживать при компактных размерах значительный нагрев при допустимых перегрузках оборудования;
- использование достижений в кардинальном инновационном направлении применения эффекта высокотемпературной сверхпроводимости, что позволит получить совершенно новые свойства оборудования в комплексе с компактными размерами;
- инновационные изменения конструкции ПЭД: использование вентильного привода, повышение частоты вращения до 3000 ÷ 6000 об/мин и номинального напряжения, схемные и параметрические изменения конструкций и др. Все они стратегически направлены на повышение энергоэффективности, энергосбережения и увеличения межремонтных промежутков.

IV. Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы и заключения.

1) Комплексное использование статистических распределений эксплуатационных показателей является эффективным средством управления и планирования безопасной, надежной и эффективной эксплуатации ЭКПЭД.
2) Установленные законы распределения наработки на отказ для условных групп ПЭД дают возможность существенно скорректировать управление производственными циклами и организацию эксплуатации, в результате повысить эффективность эксплуатации на основе пересмотра существующего порядка технического обслуживания и ремонтов парка ЭКПЭД и ПЭД.
3) Статистические модели, сформированные в таблице I, позволяют принимать стратегические решения в управлении производственными циклами и, в частности, о продолжении дальнейшей эксплуатации, работающих ЭКПЭД, модернизации или замене исключительно по результатам оценки состояния текущих ресурсов и технико-экономического сопоставления вариантов на основе статистической информации об аварийности.

Список литературы

[1] Мамедов О.Г. Научные основы повышения эксплуатационной надежности погружных электродвигателей: Монография. – Баку: изд-во «Элм», 2010 - 183 с.

[2] Таджибаев А.И. Научные основы систем оценки технического состояния электрооборудования электротехнических комплексов: Дис. докт. техн. наук: 05.09.03. – Самара, 2006 - 373 с.

[3] Алекперов В.Ю. Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти / В.Ю. Алекперов, В.Я. Кершенбаум, - М.: Наука и техника, 1998. – 611 с.

[4] Замиховский Л.М. Техническая диагностика погружных электроустановок для добычи / Л.М. Замиховский, В.П. Калявин – Снятын: Прут Принт, 1999. – 234 с.

[5] Альбокринов В.С. Перенапряжения и защита от них в электроустановках нефтяной промышленности / В.С. Альбокринов. В.Г. Гольдштейн, Ф.Х. Халилов. – Самара: СамГТУ, 1997. – 324 с.

[6] Халилов Ф.Х. Повышение надежности работы электрооборудования и линий 0,4 – 110 кВ нефтяной промышленности при воздействиях перенапряжений / Ф.Х. Халилов, В.Г. Гольдштейн, А.Н. Гордиенко, А.А. Пухальский – М.: Энергоатомиздат, 2006. - 356 с.

[7] Романов В.С. Статистический анализ технологических нарушений в эксплуатации погружных электродвигателей нефтедобычи / В.С. Романов, В.Г. Гольдштейн // «Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика». - 2018. – Выпуск 16. - С. 114-122.

[8] Кожин А. Г., Соловьев И. Г. Анализ факторов, влияющих на износ погружного электрооборудования // Вестн. кибернетики. – Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2006. – № 5. –С. 3–9.

[9] Швецкова Л. В. Повышение энергоэффективности электротехнического комплекса добывающей скважины с высоковязкой нефтью: дисс. канд. техн. наук: 05.09.03. – Самара, 2016. – 153 с.

[10] Нурбосынов Д.Н., Табачникова Т.В., Швецкова Л.В. Повышение эксплуатационно-энергетических характеристик электротехнического комплекса добывающей скважины при добыче вязкой и высоковязкой нефти // Промышленная энергетика. – 2015. – No8. – С.18 – 22.

[11] Алиев И.М. Диагностирование работы нефтяных скважин, эксплуатируемых погружными центробежными насосами; Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.15.06. – Москва: ВНИИ им. акад. А.П.Крылова, 1988. – 25 с.

[12] Гирфанов А.А. Анализ эксплуатационной надежности ЭПУ / А.А. Гирфанов, В.Г. Гольдштейн, Д.Н. Дадонов // Сбор. докл. IX Росс. научн.-техн. конф. по электромагнитной совместимости

технических средств и электромагнитной безопасности ЭМС-2006. – С.-Петербург, 2006. – С. 173 - 176.

[13] Романов В.С. Методология интеллектуального анализа и оценки остаточного ресурса погружных электродвигателей нефтедобычи / Романов В.С., Гольдштейн В.Г. // Интеллектуальная Электротехника. – 2018. – №2(2). – С.15-26.

[14] Гольдштейн В.Г. Техническая диагностика, повреждаемость и ресурсы силовых и измерительных трансформаторов и реакторов / В.Г. Гольдштейн, А.Ю. Хренников – М.: Энергоатомиздат. 2007. - 320 с.

[15] Romanov V.S. The dynamic improvement methods of energy efficiency and reliability of oil production submersible electric motors / V.S. Romanov, V.G. Goldstein : IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. - Volume 944, №012099, conference 1, 2018.

[16] Романов В.С. Повышение надежности электротехнического комплекса электрооборудования нефтедобычи на основе анализа его аварийности / Романов В.С., Гольдштейн В.Г. // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – 3(40). – С.7-12.

[17] Романов В.С. Методы динамического совершенствования повышения энергоэффективности и надежности погружных электродвигателей нефтедобычи / В.С. Романов, В.Г. Гольдштейн // Журнал «Динамика систем, механизмов и машин». Динамика электротехнических комплексов и систем. 2017. – Том 5. – № 3. – С. 96 - 100.

[18] Sukhachev I.S. An algorithm of the loss risk assessment in the oil production in case of electric submersible motor failure / I.S. Sukhachev, T.D. Gladkikh, V.V. Sushkov // IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. - Omsk, 2016. - №7819089. DOI:10.1109/Dynamics. 2016.7819089.

[19] Смирнов Н.И. Исследование влияния износа на ресурс УЭЦН / Сборник трудов международной научно — технической конференции «Актуальные проблемы трибологии». 2007. – Том 1. – С. 410 - 416.

[20] Brinner T.R. Lighting protection for submergible oilwell pumps / T.R. Brinner, R. Bulmer, J. Kellg // 32-nd Annu. Petrol. and Chem. Ind. Conf., Houston tex., sept. 9 – 11, 1985. Rec. Conf. Pap. New York. 1985.

[21] Портнягин А.Л. Модель оценки остаточного ресурса погружного оборудования / А.Л. Портнягин, И.Г. Соловьев // Вестн. кибернетики. – 2002. – № 1. – С. 103–108.

[22] Сушков В.В., Тимошкин В.В., Сухачев И.С., Сидоров С.В. Оценка остаточного ресурса изоляции погружного электродвигателя установок электрических центробежных насосов добычи нефти при воздействиях импульсных перенапряжений. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 10. 74–80.

[23] Бабаев С.Г. Основы теории надежности нефтепромыслового оборудования / С.Г.Бабаев, И.А.Габибов, Р.Х.Меликов – Баку: АГНА, 2015.– 400 с.

[24] Байков И.Р. Анализ временных рядов как метод прогнозирования и диагностики в нефтедобыче / И.Р. Байков, Е.А. Смородов, В.Г. Дееев // Нефтяное хозяйство. – 2002. – №2. – С. 71-74.

[25] Перельман О.М. Методики определения надежности погружного оборудования и опыт ее применения / О.М.Перельман, С.Н.Пещеренко, А.И. Рабинович, С.Д. Слепченко // Технологии ТЭК. – 2005. – №3. – С. 66– 73.

Иерархическое кодирование при обработке сигналов аналитических приборов

Сайфуллин Р.Т.
каф. Информационно-измерительная техника
СамГТУ
Самара, Россия

Бочкарев А.В.
каф. Информационно-измерительная техника
СамГТУ
Самара, Россия
bochkarevpubliciit@gmail.com

***Abstract* — The paper deals with a development of an analytical device's signal processing algorithms based on decomposition signals into the coefficients of the basis of orthogonal functions. The Chebyshev-Hermite functions are used as decomposition basis. Two different algorithms for decomposition analytical device's signal are described. The first named traditional and the second named hierarchical. The traditional one is to obtain coefficients of decomposition of the analytical device's signal in chosen basis with selected number of basis functions. The hierarchical one is to obtain decomposition coefficient first with only zero-order basis function, then compute the difference between signal and its copy reconstructed by just obtained decomposition coefficient. Further, the described procedure is repeated for computed earlier difference with first-order basis function and so on, until the difference is below the selected value. The main purpose of the current paper is to compare the hierarchical approach with the traditional one in terms of accuracy and computation time.**

Ключевые слова — кодирование, аналитический прибор, обработка сигналов, функции Чебышева-Эрмита, разложение сигнала, иерархический алгоритм, остаточная дисперсия, время вычисления

I. Введение

Аналитическое приборостроение является интенсивно развивающейся областью измерительной техники, предназначенной для исследования состава и свойств веществ. Развитие этого направления идет по пути улучшения характеристик аналитических приборов и внедрения новых методов анализа результатов измерений. Среди задач аналитического приборостроения следует выделить функциональное преобразование, фильтрацию, детектирование и разделение наложенных аналитических сигналов, устранение искажающего действия аппаратной функции прибора и т.д. [1].

Совершенствование вычислительных технологий обработки измерительной информации для сигналов сложной формы связано с развитием прикладных математических методов, лежащих в основе данных технологий, с внедрением новых программно-алгоритмических средств обработки данных [2]. Таким образом, актуальной проблемой является разработка теоретических и прикладных подходов, которые позволяют синтезировать компактные и быстрые вычислительные алгоритмы оценки полезного сигнала, направленные на реализацию всех потенциальных возможностей аналитических приборов.

В этой связи, для математического описания сигнала $f(x)$ предлагается использовать проекционную схему кодирования-декодирования данных, основанную на разложении сигнала в ряд по функциям Чебышева-Эрмита [3-6]. Эти функции находят обширное применение в проектировании банков фильтров, распознавании объектов и других областях [7-12]. Одновременная локализация этих функций как в частотном, так и во временном пространстве делает метод достаточно устойчивым к инструментальным погрешностям [13-16]. Помимо этого, кодирование-декодирование в базисе функций Чебышева-Эрмита обладает сглаживающим свойством [12].

В данной работе рассматривается алгоритм иерархического кодирования-декодирования сигнала с использованием базиса Чебышева-Эрмита, выявляются отличия данного алгоритма от традиционного проекционного подхода, при котором сигнал раскладывается в ряд Фурье по используемым базисным функциям. При этом, важным критерием сравнения этих двух алгоритмов является время вычисления остаточной дисперсии.

II. Традиционный и иерархический алгоритмы кодирования-декодирования сигналов в базисе функций Чебышева-Эрмита

Функции Чебышева-Эрмита определяются следующим образом:

$$\varphi_n(x) = \frac{1}{\alpha_n} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} \cdot H_n(x), \qquad (1)$$

где $\alpha_n = \sqrt{2^n n! \sqrt{\pi}}$ - нормирующая константа;

$H_n(x)$ – стандартизированный многочлен Чебышева-Эрмита степени n:

$$H_n(x) = (-1)^n e^{x^2} \frac{d^n e^{-x^2}}{dx^n}.$$

При $x \to \infty$ функции Чебышева-Эрмита обращаются в нуль.

Пусть $F(\cdot)$ – оператор преобразования Фурье, тогда:

$$F(\varphi_n(x)) = i^n \cdot \varphi_n(x),$$

то есть функции Чебышева-Эрмита являются собственными функциями преобразования Фурье.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

Функции Чебышева-Эрмита образуют на бесконечном интервале $-\infty < x < \infty$ полную ортогональную нормированную с единичным весом систему. Четные и нечетные функции также образуют полную ортогональную нормированную с единичным весом систему на интервале $0 < x < \infty$.

Представление исследуемого сигнала $f(x)$ с помощью N функций разложения (кодирование) заключается в нахождении коэффициентов c_n. В силу локализации функций Чебышева-Эрмита нахождение данных коэффициентов можно свести к формуле:

$$c_n = \int_{-\tau_n}^{\tau_n} f(x) \cdot \varphi_n(x)\, dx, \quad n = 0,1,\ldots,N, \tag{2}$$

где $[-\tau_n, \tau_n]$ – отрезок, на котором локализована функция $\varphi_n(x)$,

N – максимальный номер базисной функции (далее порядок разложения).

Выражение (2) характеризует вклад n-й функции в исследуемый сигнал. Как было сказано ранее, существует как минимум два различных алгоритма реализации кодирования - традиционный и иерархический.

Традиционный подход к реализации проекционного алгоритма подразумевает нахождение коэффициентов (2) для исследуемого сигнала $f(x)$ при последовательном возрастании n и неизменности исследуемого сигнала. Иерархический же отличен тем, что на первой итерации, после расчета c_n вычисляется разностный сигнал:

$$f_0(x) = f(x) - c_0 \cdot \varphi_0(x),$$

который используется на последующих итерациях вместо $f(x)$:

$$c_n = \int_{-\tau_n}^{\tau_n} f_0(x) \cdot \varphi_n(x)\, dx, \quad n = 1,\ldots,N.$$

При этом, на каждой последующей итерации расчет $f_0(x)$ повторяется:

$$f_0(x) \overset{def}{=} f_0(x) - c_n \cdot \varphi_n(x), \quad n = 1,\ldots,N.$$

Таким образом, иерархический алгоритм подразумевает обработку на каждой итерации не исследуемого сигнала, а его разности со всеми предшествующими базисными функциями, умноженными на соответствующие коэффициенты.

Восстановление сигнала из массива подсчитанных N коэффициентов разложения (декодирование) выражается формулой, справедливой для каждого из двух описанных алгоритмов:

$$\hat{f}(x) = \sum_{n=0}^{N} c_n \cdot \varphi_n(x). \tag{3}$$

Стоит отметить, что из рассчитанных коэффициентов (2) можно восстановить не только исходный сигнал по выражению (3), но и различные его преобразования, такие как преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, производные различных порядков и т.д. Для восстановления описанных преобразований необходимо использовать соответствующие базисы перехода: к примеру, в [5] описан базис перехода к непрерывному вейвлет-преобразованию, в [6] – к производным произвольного порядка. Таким образом, представление сигнала в описанном базисе позволяет получить аппарат для быстрого нахождения множества различных преобразований исследуемого сигнала.

Потенциальным преимуществом иерархического алгоритма над традиционным, очевидно, является наличие сведений об остатке разложения при использовании текущего количества коэффициентов. Таким образом, возможно на каждой итерации разложения рассчитывать по f_0 (x) остаточную дисперсию при текущем n. Следовательно, становится возможным определить порядок разложения N непосредственно в процессе работы, основываясь на величине остаточной дисперсии для текущей итерации. Традиционный же алгоритм подразумевает предварительное задание порядка разложения N.

Поскольку, на практике, вместо аналитически заданных сигналов исследуются массивы дискретных отсчетов, для сравнения традиционного и иерархического алгоритмов рассмотрим их схемы (рис. 1) в отношении дискретного сигнала S с заранее предопределенным порядком разложения N и массивом CT для хранения рассчитанных коэффициентов. Стоит отметить, что для дискретных сигналов в (3) вместо $\hat{f}(x)$ необходимо подставить $\hat{S}$.

Очевидно, что иерархический алгоритм подразумевает большее количество операций, за счет чего может требовать больше времени на реализацию.

Указанные отличия алгоритмов приводят к необходимости их сравнения по ряду показателей (время работы, точность декодирования и т.п.).

III. Сравнение традиционного и иерархического алгоритмов кодирования-декодирования сигналов в базисе Чебышева-Эрмита

A. Исследуемый сигнал

В рамках работы алгоритмы тестируются на примере сигнала, который задан следующей суммой двух базисных функций:

$$f(x) = \varphi_0\left(\frac{x}{1.5}\right) + 0.07 \cdot \varphi_5(1.5 \cdot x). \tag{4}$$

Как было сказано ранее, на практике сигналы представлены в дискретном виде, поэтому вместо $f(x)$ в качестве сигнала используем массив S, состоящий из L=201 отсчета, полученных из (4) посредством его дискретизации с равными интервалами dx=0.07.

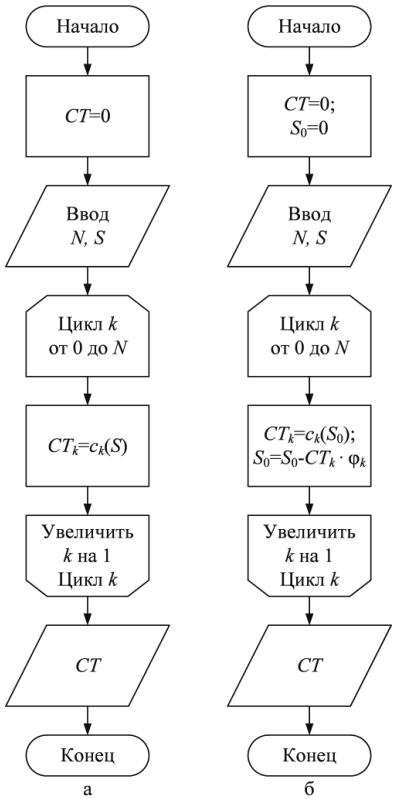


Рис. 1. Схемы традиционного и иерархического алгоритмов: а – традиционный алгоритм, б – иерархический алгоритм

B. Сравнение алгоритмов по точности

Для сравнения точности работы традиционного и иерархического алгоритмов используется остаточная дисперсия, которая для алгоритма традиционного кодирования задается следующим образом:

$$D_P = \frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}\left[S_i - \hat{S}_i\right]^2, \qquad (5)$$

где $\hat{S}$ – восстановленный по (3) массив.

Для алгоритма иерархического кодирования, в силу того, что вычисление разности подразумевается самим алгоритмом, остаточная дисперсия рассчитывается следующим образом:

$$D_H = \frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L} S_{0,i}^2. \qquad (6)$$

Полученные результаты сравнения остаточных дисперсий для некоторых порядков N приведены в табл. I.

ТАБЛИЦА I. ОСТАТОЧНАЯ ДИСПЕРСИЯ АЛГОРИТМОВ

О.Д.[a]	*N*					
	0	***1***	***2***	***5***	***10***	***20***
D_P	0,0084	0,0084	0,0015	0,0003	0,00005	$1.5\cdot10^{-6}$
D_H	0,0084	0,0084	0,0015	0,0003	0,00005	$1.5\cdot10^{-6}$

[a] остаточная дисперсия

Совпадение остаточных дисперсий традиционного и иерархического алгоритмов для одного порядка N наблюдается вплоть до N=40.

C. Сравнение алгоритмов по времени вычислений

При кодировании по любому из алгоритмов важными по временным затратам являются такие факторы, как:

- *TC* - время, затраченное на расчет коэффициентов кодирования при заданном N, кодируемый сигнал (5) и базисные функции (1) заранее рассчитаны, представлены в дискретном виде и хранятся в памяти, временные траты на их вычисление не учитываются;
- *TD* - время расчета остаточной дисперсии при текущем N, при этом считается, что базисные функции, кодируемый сигнал и коэффициенты, полученные при его разложении, рассчитаны заранее и в дискретной форме хранятся в памяти, временные траты на их вычисление не учитываются;
- *TS* – общее время вычислений, *TD* + *TC*.

С учетом схем алгоритмов на рис. 1 и выражений для вычисления дисперсий (5) и (6) получим следующие выражения для расчета указанных выше временных параметров в единицах числа тактов центрального процессора (ЦП):

$$TC_T = W_{sum}(L-1)(N+1) + W_{mul}(L+1)(N+1),$$

$$TC_H = W_{sum}\left[(L-1)(N+1) + L\right] + W_{mul}(2L+1)(N+1),$$

$$TD_T = W_{div} + W_{sum}\left[L(N+3) - 1\right] + W_{mul}L(N+2),$$

$$TD_H = W_{div} + W_{sum}(L-1) + W_{mul}L,$$

где индексы T и H указывают на традиционный и иерархический алгоритм, соответственно;

$W_{sum} \simeq 1 \div 3$ тактов на одну процедуру суммы (разности);

$W_{mul} \simeq 1 \div 7$ тактов на одну процедуру умножения;

$W_{div} \simeq 10 \div 40$ тактов на одну процедуру деления.

Приведенные величины затрат на ту или иную арифметическую процедуру являются табличными данными [17].

Перевод результатов из тактов в секунды возможен через тактовую частоту ЦП, считая, что в вычислениях одним ядром:

$$T_{сек} = \frac{T_{такт}}{f_{такт}},$$

где $T_{такт}$ - временной параметр (*TC*, *TD* или *TS*) в тактах,

$f_{такт} = 2{,}5$ ГГц - тактовая частота ЦП.

Указанное значение $f_{такт}$ взято исходя из сведений о рабочей частоте при обработке данных компьютером на базе процессора среднего уровня (младшие модели серии i5 седьмого поколения и подобные).

В табл. II рассмотрены значения озвученных параметров для традиционного и иерархического алгоритмов при L=201 для тех же N, что и в табл. I. Значения времени указаны в микросекундах.

ТАБЛИЦА II. ВРЕМЕННЫЕ ЗАТРАТЫ АЛГОРИТМОВ

В.П.[a]	**N**					
	0	***1***	***2***	***5***	***10***	***20***
Традиционный алгоритм						
TC_T	0,806	1,611	2,417	4,834	8,862	16,918
TD_T	1,864	2,668	3,472	5,884	9,904	17,944
TS_T	2,670	4,279	5,889	10,718	18,766	34,862
Иерархический алгоритм						
TC_H	1,610	2,978	4,346	8,452	15,294	28,978
TD_H	0,819	0,819	0,819	0,819	0,819	0,819
TS_H	2,428	3,797	5,165	9,270	16,112	29,796

[b.] временные параметры

Иерархический алгоритм значительно уступает по быстродействию традиционному в расчете коэффициентов, но, вместе с тем, вычисление остаточной дисперсии для данного алгоритмы не зависит от порядка разложения, за счет чего суммарное время вычислений двух алгоритмов крайне близко.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе приведенного исследования можно сделать вывод, что алгоритм иерархического кодирования относительно традиционного имеет явное преимущество – он позволяет оценивать точность восстановления исходного сигнала по рассчитанным коэффициентам в процессе разложения сигнала, тогда как традиционный алгоритм подразумевает предварительный расчет коэффициентов разложения по всем заданным функциям. При этом, как показал анализ каждого из алгоритмов, иерархический подход к обработке сигнала в случае расчета заданного количества коэффициентов проигрывает традиционному не более, чем на 50%, что при использовании современной вычислительной техники в абсолютных единицах дает микросекунды задержки для небольших массивов данных. В то же время, возможность оценки точности восстановленного сигнала в процессе обработки исходного позволяет задать предельно допустимое значение остатка, при достижении которого расчет коэффициентов следует остановить, тем самым поддерживая одинаково высокую точность для сигналов различной конфигурации без ручного подбора оптимального числа используемых базисных функций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Гуревич А.Л., Русинов Л.А., Сягаев Н.А. Автоматический хроматографический анализ. – Л.: Химия, 1980. – 192 с.

[2] Y.A. Zolotov, “Some Trends in Modern Analytical Chemistry”, Journal of Chromatography and Separation Techniques, 2017. Vol 8. No. 2

[3] Сайфуллин Р.Т., Бочкарев А.В. Выбор необходимого числа базисных функций в алгоритмах кодирования-декодирования сигналов аналитических приборов. // Информационно-измерительные и управляющие системы: межвуз. сб. науч. статей. Выпуск 1(17). – 2019, с. 35-42

[4] Сайфуллин Р.Т., Бочкарев А.В. Использование функций Чебышева–Эрмита в обработке сигналов аналитических приборов. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки, № 1(61). – 2019, с. 68-81

[5] Сайфуллин Р.Т., Бочкарев А.В. Вычисление непрерывного вейвлет-преобразования сигналов в базисе функций Чебышева-Эрмита. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки, № 2(62). – 2019, с. 113-124

[6] Сайфуллин Р.Т., Бочкарев А.В. Вычисление производных аналитического сигнала в базисе функций Чебышева-Эрмита. // Материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (27-30 мая 2019 г., Самара, Россия) Том 2. - Самара; Самар.гос.техн. ун-т, 2019. - с. 137-139

[7] Нейросетевой анализ и сопоставление частотно-временных векторов на основе краткосрочного спектрального представления и адаптивного преобразования Эрмита. Ю. М. Баяковский, А. О. Жирков, Д. Н. Корчагин, А. С. Крылов, А. С. Лукин. Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2001, 087

[8] Павельева Е.А., Крылов А.С. Поиск и анализ ключевых точек радужной оболочки глаза методом преобразования Эрмита // Информатика и её применения. 2010. № 1 т.4. С. 79-82

[9] Estudillo-Romero A., Escalante-Ramirez B. The Hermite transform: An alternative image representation model for iris recognition // LNCS, 2008. No. 5197. P. 86–93.

[10] Мамаев Н.В. Алгоритм нелокального среднего на основе разложения по функциям Эрмита в задачах компьютерной томографии. // Мамаев Н.В., Лукин А.С., Юрин Д.В., Глазкова М.А., Синицин В.Е. - ГРАФИКОН'2013. Труды конференции, 2013, с. 254-258

[11] Горлов В.А., Паршин Д.С., Разложение функции с экспоненциальным ростом в ряд Фурье по ортогональным полиномам Чебышева-Эрмита. // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 8-3 (19-3). С. 245-248.

[12] Балакин Д.А., Штыков В.В., Построение ортогонального банка фильтров на основе преобразований Эрмита для обработки сигналов. // Журнал радиоэлектроники, №9, 2014, с. 1-15

[13] Martens J. B. The Hermite transform - theory // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990. Vol. 38. No. 9. P. 1595–1606.

[14] Martens J. B. The Hermite transform - applications // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990. Vol. 38. No. 9. P. 1607–1618.

[15] Г. Сеге. Ортогональные многочлены. – М.: Физматгиз, 1962, – 500 с.

[16] П. К. Суетин. Классические ортогональные многочлены, М.: Физматлит, 2005, – 480 с.

[17] Fog A. Instruction tables: lists 0f instruction latencies, throughputs and micro-operation breakdowns for Intel, AMD and VIA CPUs. – Denmark.: Technical University of Denmark, 2018. – 375 p.

Система ликвидации шламонакопителей с использованием группы очистных сооружений крупного промышленного узла

Самарина О.А.
НЦПЭ
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
Самара, Российская Федерация
samarinaoa@yandex.ru

Кондратьев О.И.
НЦПЭ
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
Самара, Российская Федерация
olkondor95@gmail.com

Сухоносова А.Н.
НЦПЭ
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
Самара, Российская Федерация
syhovey@mail.ru

***Abstract* - Many liquid industrial waste storage facilities exist in large urban agglomerations. Their structure and composition are estimated by a significant number of parameters. The types of parameters depend on the source of waste formation, the chemical formula compounds, as well as form of bonds in heterogeneous systems "liquid - solid phase".**

Centralized wastewater treatment facilities are used for the disposal of storage devices. A number of treatment facilities built in the 70's – 80's in the Samara region. industrial objects are combined into groups on departmental, functional and technological accessories.

There are twelve ponds of heterophase waste and four groups of treatment facilities potentially suitable for the treatment of the water layer of objects only within the boundaries of Novokuibyshevskaya industrial zone, on a relatively small floodplain-slope section of the Tatianka river, an area of not more than 20 square kilometers. The choice of operation, equipment and optimization way in the system "storage – treatment facilities", as well as the adaptation of facilities to the conditions of disposal, are associated with the solution of resource and logistics tasks. Solution of the problem is impossible without choise the group of major parameters, which able to control. A criterion assessment was proposed for the following groups of characteristics: resource-hydraulic, chemical, transport and logistics. The proposed system of parameters makes possible to optimize the system by controlling the input and output values for each criterion.

Resource-hydraulic evaluation involves control and management of the parameters of speed, pumping capacity of liquid waste, the disposal time of oil sludge. The duration of the process is limited to the period of activity of treatment facilities between renovations.

The chemical criterion of assessment involves the variable chemical composition and water balance of the neutralized oil sludge or water-emulsion layer in this case. The parameter can vary greatly under the influence of atmospheric precipitation, hydrogeological conditions of the territory, depends on the intensity of pumping of liquid masses to the treatment facilities.

Transport characteristics are related to the type of waste delivery to treatment facilities: pipeline or transportation using special equipment. The second way is characterized by the presence or absence of a developed transport network, as well as places of crossing the route of transportation with such objects as railways, highways etc.

Assessment for each of these criteria is conducted during optimization of liquidation process of wastes. It makes possible to rank them according to importance, and to highlight the limiting stages and control system "ponds – oil sludge – treatment plant" at every stage of the process.

Ключевые слова — геоэкологическая система; комплекс по обработке отходов; накопители нефтеотходов, трехмерное моделирование; станция аэрации.

I. Введение

Деятельность каждого нефтеперабатывающего и нефтехимического производства сопровождается образованием гетерофазных промышленных отходов. Подавляющее большинство отходов представлено шламами. До 90% потока составляют нефтешламы, шламы водоподготовки, избыточные активные илы, а также шламы, содержащие катализаторы.

Только 5% шламового потока рециклируется в продукт. Оставшееся количество направляется на депонирование в специальные земляные выемки – шламонакопители.

Площадь отдельного шламонакопителя достигает нескольких гектар при толщине шламового тела до 10 м.

Шламонакопитель представляет собой одновременно и технологическое сооружение, и объект обращения с отходами, и гидротехническое сооружение (ГТС).

Пребывание отходов в выемке накопителя сопровождается процессами седиментации, флотации, испарения, а также переходом влаги из связанного в свободное состояние и наоборот. При этом за счет биотических и абиотических факторов среды шламовое тело расслаивается на неоднородные фрагменты и структурные слои различной плотности. Седиментирующиеся примеси выпадают в осадок формируя донный шлам. Лёгкие фракции углеводородов всплывают на поверхность в виде флотошлама. Между донным шламом и флотошламом располагается концентрированный водный слой, объем которого занимает до 80% выемки накопителя.

Для наглядности и удобства интерпретации результатов изысканий, и принятия решений, авторами составлялись модели, отражающие текущее состояние шламонакопителя (рис. 1).

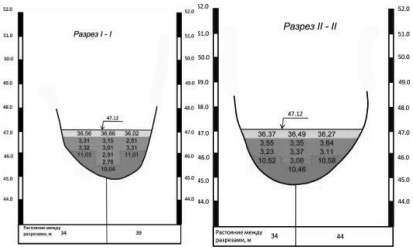


Рис. 1. Цифровая матрица состояния: содержание минеральной и органической части в техногенном образовании [1]

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

II. Проблемы и особенности ликвидации шламонакопителей

Срезка и обработка верхнего слоя (флотошлама) сложности не представляет. Как правило, при ликвидации накопителей, лёгкие фракции, обладающие энергетическим потенциалом, используются в качестве топлива. Донный шлам является носителем материального потенциала. После обезвоживания и биодеструкции он утилизируется в качестве техногенного грунта.

Отдельную проблему создает водный (водоэмульсионный) слой, который затрудняет возможность извлечения и утилизации и флото- и донного шлама.

Типичный состав водного слоя шламонакопителя представлен в таблице I.

Как видно из таблицы, состав водного слоя имеет широкий диапазон концентраций. Для сравнения, в таблице представлены диапазоны значений отдельных показателей в основном потоке сточных вод предприятия, а также ПДК на сброс в водоемы рыбохозяйственного назначения. Можно сделать вывод о том, что при ликвидации накопителей сброс водоэмульсионного слоя в поверхностные водные объекты невозможен и требует создания специализированных комплексов для обработки нефтесодержащих отходов с последующим производством на их основе рекультивационных материалов.

Рассмотрим варианты объектов для обработки высококонцентрированных сточных вод: новые локальные очистные сооружения, мобильные очистные сооружения, модернизированные существующие очистные сооружения, имеющие резервные мощности.

Очистка водного слоя с созданием комплекса локальных сооружений «на берегу» шламонакопителя, является нерентабельной. Подобные очистные сооружения будут иметь временный характер и потребуют, после ликвидации объекта, вывода из эксплуатации с проведением дорогостоящего объектного демонтажа.

Так же затруднительно применение мобильных очистных сооружений в связи с отсутствием отечественного оборудования и невозможности подбора универсальных установок по обработке нефтесодержащих отходов для использования в широком диапазоне концентраций загрязняющих веществ.

Наиболее целесообразным для обезвреживания водного слоя накопителей представляется использование мощностей заводских сооружений биохимической очистки.

Подобные сооружения имеются практически на каждом нефтехимическом предприятии. В связи со спадом производства в 90-е годы, в составе очистных сооружений образовался определенный резерв мощностей, позволяющий обезвреживать и сточные воды предприятия, и дополнительный поток водного слоя.

III. Система оценки сооружений для ликвидации содержимого шламонакопителей

Не каждое очистное сооружение пригодно для совместного приема заводских стоков и водного слоя накопителя. Точно так же, как не каждый накопитель возможно ликвидировать с использованием заводских КОС.

Авторами предлагается система оценки целесообразности приема водоэмульсионного слоя накопителей на КОС по техническим, ресурсным и экономическим критериям.

Технические:

- состав сооружений очистки сточных вод;
- конструктивные особенности сооружений очистки сточных вод
- состояние сооружений очистки сточных вод.

ТАБЛИЦА I. Состав исследования высококонцентрированных сточных вод

Показатель	Накопители нефтяного и нефтехимического комплексов Новокуйбышевского промышленного узла Самарской области					Сток станции аэрации ЗАО «ННК»	ПДК р.х.,
	Шламонакопитель №1-2 ОАО «КНПЗ»	*Буферный пруд БХО ОАО «КНПЗ»*	*ЗАО «ННК»*	*Нефтяной амбар №1 ОАО «Самаранефтегаз»*	*Шламонакопитель ЗАО «Нефтехим»*		
pH	7,4 – 8,3	7,62 – 7,9	7,7 - 9,4	7,3-7,9	7,5-8,1	6,5-7,1	6,5-8,5*
Взвешенные вещества, мг/л	116,0 - 357,6	103,4 - 131,5	6798,8 –8900,6	2761 - 3107	345,3 – 514,5	32,5 - 118,6	Фон+0,75
Сухой остаток, мг/л	590,0 - 960,0	1200,0 – 1250,0	5796,7-8761,2	-//-	-//-	765,4 -1100,0	1000*
ХПК, мг/л	224,8 - 233,6	267,8 -287,8	8700-10800	350-413	656 - 784	150- 316	15*
$БПК_5$, мг/л	-//-	-//-	2748 - 3521	-//-	-//-	120-188	2,1
Нефтепродукты, мг/л	18,3 – 25,4	48,6 - 50,0	1670,1-2400,7	1783,7 – 2345,5	987,6 – 1643,8	1,5 – 3,0	0,05
Фенол, мг/л	4,2 - 5,9	0,9 -1,5	7,44 - 20,30	-//-	10,7 – 40,3	0,3 – 2,7	0,001

Ресурсные:

- соотношение производительности станции аэрации и объема водоэмульсионного слоя накопителя;
- запас производственной мощности станции аэрации в целом и отдельных сооружений в частности;
- резерв свободных территорий и сооружений в границах станции аэрации.

Экономические:

- условия и стоимость транспортировки высококонцентрированных сточных вод накопителей на станцию аэрации;
- затраты на реконструкцию станции аэрации для обработки высококонцентрированных сточных вод накопителей;
- окупаемость технологии обработки высококонцентрированных сточных вод накопителей на базе станции аэрации.

IV. Апробация очистки водоэмульсионного в действующих очистных сооружениях

Очистка водоэмульсионного слоя проводилась на двух стадиях создания системы управления ликвидацией шламонакопителя, а именно: исследование в лабораторных условиях, полупромышленный эксперимент.

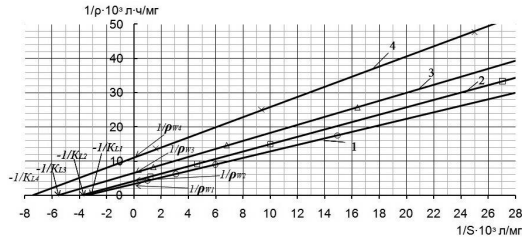
Математическое описание процессов биодеструкции органических загрязнений в лабораторном биореакторе было проведено с использованием методов уравнения кинетики ферментативных реакций Михаэлиса- Ментена

Графики, используемые для анализа кинетики очистки смешанного стока на лабораторной установке при объемных дозах разбавления ВСВ исходным стоком станции аэрации от 0,001 до 0,01, соответствующих диапазону разбавления 1:1000 – 1:100. Эффект очистки при этом составил по $БПК_{полн}$ от 77,9 % до 89,5 % по ХПК от 79,0 % до 86,4 % соответственно. Дальнейшее увеличение дозы приема ВСВ накопителя привело к понижению эффективности очистки по ХПК до 36,0 % и по $БПК_{полн}$ до 49,3 % и превышению установленных нормативов для очищенных вод первой ступени биологической очистки.

$$\rho_w = \rho_{wmax} \frac{S}{S + K_L}, \qquad (1)$$

где ρ_w – скорость реакции при концентрации субстрата S, мг/л·ч; ρ_{wmax} – максимально возможная скорость реакции без лимитирования субстратом, достигаемая при полном насыщении фермента субстратом, мг/л·ч; K_L– константа Михаэлиса, мг/л.

Значения кинетических констант в ячейках биореактора были определены графоаналитическим методом двойных обратных величин, результаты представлены на рисунке 2.



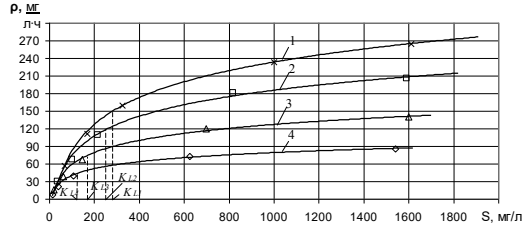
1 – первая ячейка биореактора; 2 – вторая ячейка биореактора; 3 – третья ячейка биореактора; 4 – четвертая ячейка биореактора

Рис. 2. Графики двойных обратных величин зависимостей удельных скоростей окисления органических загрязнений ρw от их концентрации S на выходе из ячеек биореактора

На основании обработки экспериментальных данных графоаналитическим методом определены величины максимальной скорости биохимического окисления и величины констант полунасыщения в ячейках биореактора. Полученные данные показывают, что при прохождении четырех ступеней биологической очистки величина константы полунасыщения K_L снижается. Поскольку константа K_L характеризует селективность ферментов по отношению к субстрату, можно сделать вывод, что селективность фермента на первой ступени биологической очистки существенно меньше, чем на последней, что приводит к увеличению глубины очистки от трудноокисляемых органических загрязнений на последних ступенях.

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о ярко выраженном ингибировании процессов биологической очистки.

Зависимость удельной объемной скорости окисления органических загрязнений ($БПК_{пол}$) в ячейках биореактора от величины концентрации органических загрязнений в сточных водах на выходе из ячейки представлена на рисунке 3.



1 – первая ячейка биореактора; 2 – вторая ячейка биореактора; 3 – третья ячейка биореактора; 4 – четвертая ячейка биореактора

Рис. 3. Зависимость величины удельной объемной скорости окисления органических загрязнений (БПКполн) в ячейках биореактора ρw от концентрации органических загрязнений на выходе из ячейки S

Кинетические константы и показатели процесса биологической деструкции органических загрязнений в биореакторе показали, что секционирование процесса очистки позволяет существенно снизить эффект ингибирования ферментативных реакций токсичными компонентами смешанного стока и тем самым, увеличить эффект последующей очистки в аэротенках.

Кроме того в ходе полупромышленных испытаний были определены показатели контроля процесса совместной обработки высококонцентрированных сточных вод накопителей и стоков, поступающих на станции аэрации. Для обработки высококонцентрированных сточных вод на примере накопителей АО «ННК» на сооружениях станции аэрации предприятия с применением биореактора определены следующие граничные параметры показателей концентрационной кратности разбавления: по взвешенным веществам не менее 1,33 раза; по ХПК не менее 3,57 раза; по БПКполн не менее 3,41 раза; по фенолу не менее 31,85 раза.

V. Результаты использования предложенной системы оценки

При подборе подходящих для обработки водоэмульсионного слоя КОС, было выявлено, что не все объекты накопления нефтесодержащих отходов можно ликвидировать с использованием станций аэрации, также как не все очистные сооружения пригодны в качестве объектов обращения с отходами накопителей. Поэтому авторами была проведена оценка структуры и состава отходов шламонакопителей на предмет выбора направления ликвидационных работ. В результате изысканий, интерпретации полученных данных с использованием цифровых матриц состояния [[1]] были выделены характерные слои накопителей и подобраны целесообразные технологии по их ликвидации.

Для водоэмульсионного слоя, где содержание воды составило более 80 % было предложено извлечение с последующей обработкой на очистных сооружениях с разбавлением принимаемы в настоящее время массами сточных вод [2].

Для обводнённого донного шлама с содержанием воды в пределах 50-80% рекомендована частичная сушка, экскавация, вывоз на очистные сооружения и совместная биотермическая обработка с сырыми осадками, избыточными активными илами и биопленкой [3].

Для загрязненной геологической среды с содержанием воды менее 50% авторами предусмотрена биологическая обработка непосредственно в накопителе без извлечения из выемки.

На основе разработанной критериальной оценки произведен анализ результатов комплексных обследований станций аэрации Самарской области в качестве объектов приема и обработки высококонцентрированных сточных вод и осадков накопителей нефтяного и нефтехимического комплексов.

VI. Заключение

В границах крупных градопромышленных агломераций расположено значительное количество накопителей и станций аэрации. Организацию системы переработки отходов нужно выполнять с учетом индивидуальных особенностей реконструируемых станций аэрации и рекультивируемых накопителей, как элементов геоэкологической системы. Оценку возможности отбора и реконструкции сооружений в качестве комплекса обработки отходов предлагается осуществлять последовательно, с использованием взаимосвязанных групп технических, ресурсных и экологических критериев. Комплекс таких мероприятий позволяет с одной стороны вовлечь техногенные отходы шламонакопителей в систему рециклинга с получением грунтоподобных материалов, а с другой стороны повысить производительность действующих очистных сооружений. Предлагаемый комплексный подход к управлению обращением со шламонакопителями был апробирован в рамках Самарского региона на АО «ННК».

Список литературы

[1] Самарина О.А. Совершенствование технологии обработки высококонцентрированных сточных вод накопителей нефтехимических предприятий : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.23.04 / О.А. Самарина. – Пенза, 2011. – 20 с.

[2] Чертес К.Л. Обработка водоэмульсионного слоя накопителей нефтехимических отходов в условиях действующих станций аэрации / Д.Е. Быков, О.В. Тупицына, О.А. Самарина, В.А. Калинюк, А.М. Штеренберг // Экология и промышленность России. – 2010. – С. 24-27.

[3] Самарина О.А. Интенсивная биотермическая обработка шламовых отходов нефтяного комплекса / К.Л. Чертес, Д.Е. Быков, Н.А. Уварова и др. // Экология и промышленность России. – 2010 – С. 36–39.

Математическое моделирование процесса нагрева системы приводов искусственных космических объектов

Смирнова Л.Н.
Самарский государственный технический университет
г.Самара, Россия
smirnovamilan@mail.ru

***Abstract* - The drives system of artificial space objects is considered the Problem of objects heating in the place of contact. The mathematical model of heating of semi-limited cylindrical bodies the mutually perpendicular to each other is constructed. The problem is solved by analytical methods. The system consist of two cylindrical bodies: one limited cylinder B and unlimited cylinder A. Mathematical model of heating process of the specified system is the heat conductivity equation for cylinders with the mixed boundary conditions. For a cylinder A and boundary conditions of the second sort are considered. The origin for a limited cylinder B is selected in one of edge surfaces. Heat exchange happens on a side surface of one cylinder and an edge surface of another with environment under the Newton law. The problem is solved by analytical methods. The final Hankel's transformation and Laplace's transformation is used. Calculation results of distribution of temperatures in cylinders A, B are presented, programs of calculation of extreme temperatures on surfaces of one cylinder and temperature distribution on cylinder radius are made.**

Ключевые слова —излучение, привод, космический объект, температурное распределение, граничные условия, разложение Хевисайда, преобразование Ханкеля, операторХанкеля, закон Ньютона, преобразование Лапласа, удельный тепловой поток, критерий Фурье, критерий Био, характеристическое уравнение, функция Бесселя, коэффициент, теплопроводности.коэффициент температуропроводности, коэффициент теплообмена

I. Введение

Основными факторами воздействия космического пространства на космические объекты, влияющими на их работу, являются:

- космическая плазма,
- тепловое излучение,
- космический вакуум,
- микрометеориты,
- невесомость,
- ионизирующее излучение космического пространства.

При оптимизации производственных процессов или производстве изделий необходимо точное математическое моделирование тепловых режимов еще на стадии проектирования. Моделирование предполагает не толькоточное математическое описание объекта, но и определение достаточно точно исходных данных[1].

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

В современных условиях предъявляются высокие требования к производству и эксплуатации космических аппаратов. Под воздействием космического излучения происходит нагрев приводов искусственных космических объектов, что нарушает их работу. В этой связи проблема исследования управления процессом нагрева является особенно актуальной. Неравномерный нагрев конструкций космических аппаратов под воздействием излучения Солнца, а также попадания в теневую зону других объектов приводит к циклическим изменениям температуры космических аппаратов.

Возникает задача исследования и оптимизации процесса нагрева. Обеспечение оптимальных температурных условий положительно влияет на надежность работы искусственных космических аппаратов.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Первоначальной задачей является построение математической модели объекта. Объектом исследования являются корпуса привода искусственных космических объектов, представляющие собой цилиндры. Ставится задача нахождения аналитического решения для определения предельно допустимых температур и последующего их ограничения. Аналитические исследования процессов под воздействием космического излучения позволили построить математическую модель. Для большинства процессов нагрева нельзя пренебречь распределенностью температур, поэтому, приходится иметь дело с уравнениями в частных производных, как правило, с нелинейными граничными условиями.

Привода искусственных космических объектов имеют форму цилиндров и рассматриваются как система цилиндрических тел.

Нагрев производится равномерно на боковую поверхность одного цилиндра А и торцевую поверхность другого цилиндра В постоянным тепловым потоком. С практической точки зрения, важно определение предельных температур под воздействием максимально возможного теплового потока.

Рассматривается задача нагрева двух цилиндрических тел: один ограниченный цилиндр В, а другой неограниченный цилиндр А.

В качестве математической модели процесса нагрева приводов искусственных космических объектов (системы двух цилиндрических тел) рассматриваются уравнения теплопроводности для цилиндров сразличными граничными условиями.

Для неограниченного цилиндра А математическая модель представляет собой уравнение теплопроводности в частных производных:

$$\frac{\partial T_{\text{А}}}{\partial \tau} = a_{\text{А}}\left(\frac{\partial^2 T_{\text{А}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T_{\text{А}}}{\partial r}\right),\ r \in (0, R_{\text{А}}),\ \tau > 0. \quad (1)$$

с начальными условиями:

$$T_{\text{А}}(r, 0) = T_0. \quad (2)$$

и граничными условиями:

$$\lambda_{\text{А}}\frac{\partial T_{\text{А}}(R_{\text{А}}, \tau)}{\partial r} = q;\ \frac{\partial T_{\text{А}}(0, \tau)}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

$$T_{\text{А}}(0, \tau) < \infty,$$

где $T_{\text{А}}$ - температурное распределение в цилиндреА;

$a_{\text{А}}$ -коэффициент температуропроводности цилиндра А;

τ -время;

q -удельный тепловой поток;

r - текущий радиус;

$R_{\text{А}}$ -радиус цилиндра А;

$\lambda_{\text{А}}$ -коэффициент теплопроводностицилиндра А.

Для неограниченного цилиндра решение задачи теплопроводности (1) при граничных условиях второго рода(3), т.е. нагревание постоянным тепловым потоком происходит равномерно по всей поверхности цилиндра (симметричная задача) и начальных условиях (2), известно,получено с помощью преобразования Ханкеля в виде[2]:

$$T_{\text{А}}(r, \tau) = T_0 + q\frac{R_{\text{А}}}{\lambda_{\text{А}}}\left[2Fo - \frac{1}{4}\left(1 - 2\frac{r^2}{R^2}\right) - \sum_{n=1}^{\infty}\frac{2}{\mu_n^2 J(\mu_n)} J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right)\exp\left(-\mu_n^2 Fo\right)\right], \quad (4)$$

где $Fo = \frac{a_{\text{А}} r}{R^2}$ - критерий Фурье,

$J_0(\mu_n)$ - функция Бесселя,

μ_n - корни характеристического уравнения функции Бесселя первого рода нулевого порядка.

Для построения математической модели ограниченного цилиндраВ радиуса $R_{\text{В}}$ и длиной L (ассиметричная задача) начало координат выбирается на торцевой поверхности цилиндра:

$$-R < r < R;\qquad 0 < x < L.$$

При постановке задачи для ограниченного цилиндра В считается, что первоначально он находится в тепловом равновесии с окружающей средой, т.е. начальная температура принимается равной T_0.

Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T_{\text{В}}}{\partial \tau} = a_{\text{В}}\left(\frac{\partial^2 T_{\text{В}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T_{\text{В}}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{\text{В}}}{\partial x^2}\right),\ r \in (0, R_{\text{В}}), \quad (5)$$

$$x \in (0, L),\ \tau > 0,$$

начальные условия:

$$T_{\text{В}}(r, x, 0) = T_0, \quad (6)$$

граничные условия:

$$\frac{\partial T_B(r,0,\tau)}{\partial x} = \frac{\partial T_B(0,x,\tau)}{\partial r} = 0, T_B(0, x, \tau) < \infty, \quad (7)$$

$$\lambda_B \frac{\partial T_B(R_B,x,\tau)}{\partial r} = 0, \lambda_B \frac{\partial T_B(r,L,\tau)}{\partial x} = q, \quad (8)$$

где $T_{\text{В}}$ - температурноераспределение в цилиндре В;

$R_{\text{В}}$ – радиус цилиндра В;

r –текущий радиус;

x – координата;

τ - время;

L - высота цилиндра В;

$\lambda_{\text{В}}$ – коэффициент теплопроводности цилиндра В;

$a_{\text{В}}$ – коэффициент температуропроводности цилиндра В.

В начальный момент времени для неограниченного цилиндра поверхность $X = 0$ мгновенно принимает температуру среды $T_{\text{с}} \neq T_0$. На боковой поверхности цилиндра $r = R$ происходит теплообмен со средой, имеющей температуру T_0. По закону Ньютона. На другой торцевой поверхности $X = L$,также происходит теплообмен со средой по закону Ньютона. Граничные условия IIрода (8) трансформируются в граничные условия III рода.

$$\frac{\partial T_{\text{В}}(r, L, \tau)}{\partial x} = \frac{\alpha_1}{\lambda_{\text{В}}}\left[T_{\text{В}}(r, L, \tau) - T_{\text{с}}\right], \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_{\text{В}}(R, x, \tau)}{\partial r} = \frac{\alpha_2}{\lambda_{\text{В}}}\left[T_{\text{В}}(R, L, \tau) - T_{\text{с}}\right], \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_{\text{В}}(r, 0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial T_{\text{В}}(0, x, \tau)}{\partial r} = 0. \quad (11)$$

где α_1, α_2 - коэффициенты теплообмена на торцевой и боковой поверхностях цилиндра В.

III. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Классические линейные задачи теплопроводности для тел простой формы с неподвижными границами и стандартными краевыми условиями эффективно решаются с помощью разработанных аналитических методов[2]. Введение дополнительных усложняющих методов, приводит к необходимости разработки специальных математических приемов [3]. В работе[4] предложена схема построения функции Грина обобщенной краевой задачи нестационарной теплопроводности для цилиндра конечных размеров. С помощью функции Грина получено интегральное решение поставленной задачи. Это решение может быть использовано для анализа теплового состояния изделий цилиндрической формы[5]. Однако в рассматриваемых условиях, необходимо получить аналитическое решение контактной задачи для взаимно перпендикулярных цилиндров А и В.

Для неограниченного цилиндра А аналитическое решение задачи теплопроводности пригранычных условиях второго рода, нагревание постоянным тепловым потоком происходит равномерно по всей поверхности цилиндра(симметричная задача), (1) – (3) известнополучено с помощью преобразования Ханкеля [2], и имеет вид

$$T_{\text{А}}(r,\tau)=T_0+q\frac{R_{\text{А}}}{\lambda_{\text{А}}}\left[2Fo-\frac{1}{4}\left(1-2\frac{r^2}{R^2}\right)-\right.$$
$$\left.-\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2}{\mu_n^2 J(\mu_n)}J_0\left(\mu_n\frac{r}{R}\right)\exp\left(-\mu_n^2 Fo\right)\right], \quad (12)$$

где $Fo=\frac{a_{\text{А}}r}{R^2}$ - критерий Фурье, Ki $\frac{qR_A}{\lambda_A(T_c-T_0)_-}$ критерий Кирпичёва, $J_0(\mu_n)$ - функция Бесселя, μ_n - корни характеристического уравнения функции Бесселя первого рода, $J_1(\mu_n)=0$.

Для решения задачи (5)для ограниченного цилиндра В с граничными условиями (9)-(11) перейдем в уравнении (5) и граничных условиях (9)-(11) к новой относительной переменной

$$\Theta_{\text{н}}(r,x,\tau)=\frac{T_B(r,x,\tau)-T_0}{T_{\text{с}}-T_0}.$$

Применяем последовательно к уравнению (5) и граничным условиям(9)-(11) конечное преобразование Ханкеля

$$\Theta_{\text{н}}(p,x,\tau)=\int_0^{R_B} r J_0(pr)\Theta(r,x,\tau)dr \quad (13)$$

и преобразование Лапласа [2],

$$\bar{\Theta}_{\text{н}}(p,x,s)=\int_0^{\infty}\Theta_{\text{н}}(p,x,\tau)d\tau \quad (14)$$

В результате получимматематическую модель задачи (5), (9)-(11) для изображения: $\bar{\Theta}_{\text{н}}(p,x,s)$.

Уравнение теплопроводности (5)для изображении принимает вид:

$$\frac{\partial^2\bar{\Theta}_{\text{н}}(p,x,s)}{\partial x^2}-\left(p^2+\frac{s}{a}\right)\bar{\Theta}_{\text{н}}(p,x,s)=0. \quad (15)$$

Граничные условия для изображения записываются в виде:

$$\bar{\Theta}_{\text{н}}(p,0,s)=\frac{R_{\text{В}}}{ps}J_1(pR_{\text{В}}), \quad (16)$$

$$\frac{\partial\bar{\Theta}_{\text{н}}(p,L,s)}{\partial x}=\frac{\alpha_1}{\lambda_{\text{В}}}\bar{\Theta}_{\text{н}}(p,L,s). \quad (17)$$

где

$$\bar{\Theta}_{\text{н}}(p,L,s)=\int_0^{\infty}e^{-st}\left(\int_0^{R_{\text{А}}}\Theta(r,x,\tau)rJ_0(pr)dr\right)d\tau. \quad (18)$$

Здесь p –оператор Ханкеля, s – оператор Лапласа.

Для решения уравнения (15) с граничными условиями (16)-(17) произведены последовательно все необходимые математические преобразования [5], получено решение уравнения для изображения в виде:

$$\bar{\Theta}_{\text{н}}(p,x,s)=\frac{R_{\text{В}}}{ps}J_1(pR_{\text{В}})\frac{\lambda_{\text{В}}\operatorname{ch}\gamma(L-x)+\alpha_1\operatorname{sh}\gamma(L-x)}{\lambda_{\text{В}}\gamma\operatorname{ch}\gamma L+\alpha_1\operatorname{sh}\gamma L}, \quad (19)$$

где $\gamma=\sqrt{p^2+\frac{s}{a}}$.

Для перехода от изображения (19) к оригиналу использовались обратные преобразования (последовательно: теоремы разложения Хевисайда и формулы обращения Ханкеля) [6,7].

Получено температурное распределение для ограниченного цилиндра В в аналитическом виде:

$$\bar{\Theta}_{\text{н}}=\frac{T_{\text{В}}(r,x,s)-T_0}{T_{\text{с}}-T_0}1-\sum_{n=1}^{\infty}\frac{A_nJ_0\left(\mu_n\frac{r}{R_{\text{В}}}\right)}{\mu_n\operatorname{ch}\frac{\mu_n}{R_{\text{В}}}+Bi_R\operatorname{sh}\frac{\mu_n}{R_{\text{В}}}}\times$$
$$\times\left[\mu_n\operatorname{ch}\frac{\mu_n}{R_{\text{В}}}\cdot\frac{L-x}{L}+Bi_R\operatorname{sh}\frac{\mu_n}{R_{\text{В}}}\cdot\frac{L-x}{L}\right]+$$
$$+2\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\left\{A_nJ_0\left(\mu_n\frac{r}{R_{\text{В}}}\right)\cdot\left[\gamma_n\cos\gamma_m\cdot\frac{L-x}{L}+\right.\right. \quad (20)$$
$$\left.\left.+Bi_R\sin\gamma_m\frac{\mu_n}{R_{\text{В}}}\cdot\frac{L-x}{L}\right]\right\}\cdot$$
$$\cdot\frac{\exp\left(-\left(\frac{\mu_{\text{В}}^2}{R_{\text{В}}^2}+\gamma_m^2\right)\frac{a_{\text{В}}\tau}{L^2}\right)}{A_nJ_0\left(\frac{\mu_{\text{В}}^2}{R_{\text{В}}^2}+\gamma_m^2\right)\cdot\left(\gamma_n\sin\gamma_m-\left(1+Bi_L\right)\cos\gamma_m\right)},$$

где $\gamma_m = i\sqrt{p^2 + \frac{s_m L}{a_\text{в}}}$, $Bi_R = \frac{\alpha_1 L}{\lambda}$ - критерий Био, $s_m = -\left(p^2 + \frac{\gamma_m^2}{L^2}\right)\alpha_1$, $A_n = \frac{2J_0(\mu_n)}{\mu_n\left[J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)\right]}$, μ_n - корни характеристического уравнения $\frac{J_0(\mu_n)}{J_1(\mu_n)} = \frac{\mu_n}{Bi_R}$.

IV. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Аналитические решения для неограниченного цилиндра А (8) и ограниченного цилиндра В (20) системы приводов искусственных космических объектов позволяют использовать их при проектировании приводов, а также при решении задач оптимального управления процессом нагрева.

При $Bi_R \to \infty$ из решения (20) получено решение для ограниченного цилиндра В для нестационарной задачинагрева.Математическая модель процесса нагрева несколько упрощается, так как предполагается,что боковая поверхность ограниченного цилиндра ($r = R_\text{в}$) по всей длине имеет постоянную температуру, равную начальной T_0.

Температурное распределение для ограниченного цилиндра Впри указанных условиях принимает вид:

$$\bar{\Theta}_\text{в} = 1 - 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\mu_n \frac{r}{R_\text{в}}\right)\text{sh}\frac{\mu_n}{R_\text{в}}\cdot\frac{L-x}{L}}{\mu_n J_1\left(\mu_n \frac{r}{R_\text{в}}\right)\text{h}\frac{\mu_n}{R_\text{в}}} +$$

$$+4\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\left\{\gamma_m J_0\left(\mu_n \frac{r}{R_\text{в}}\right)\cdot\left[\lambda_m \cos\gamma_m \cdot \frac{L-x}{L} + \right.\right. \qquad (21)$$

$$\left.\left. + Bi_L \sin\gamma_m \cdot \frac{L-x}{L}\right]\right\}\cdot$$

$$\cdot\frac{\exp\left[-\left(\frac{\mu_\text{в}^2}{R_\text{в}^2} + \gamma_m^2\right)\frac{a_\text{в}\tau}{L^2}\right]}{\mu_n J_1(\mu_n) J_0\left(\frac{\mu_\text{в}^2}{R_\text{в}^2} + \gamma_m^2\right)\cdot\left(\gamma_n \sin\gamma_m + (1 + Bi_L)\cos\gamma_m\right)}.$$

Для аналитически полученных решений (8) и (21) составлены программы, позволяющие определять предельные температуры, достигаемые на цилиндрах А и В для различных вариантов исходных параметров..

Произведены расчеты температурных распределений для цилиндров А и В, результаты представлены на рисунке 1

Результаты проведенных вычислительных исследований (рис.1) распределения температур для различного времени показали значительное превышение температур неограниченного цилиндра А по сравнению с температурами ограниченного цилиндра В.

Полученное аналитическое решение позволяет определять температурные распределения по радиусу цилиндра, варьировать исходные параметры процесса нагрева.

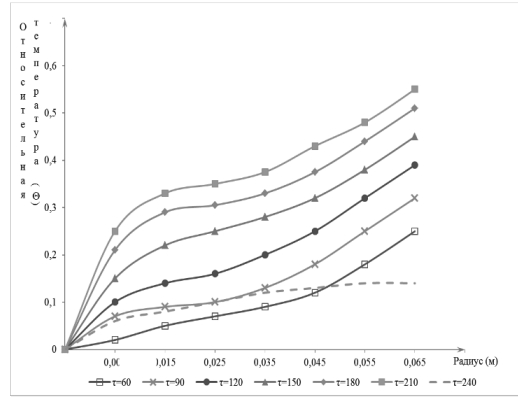


Рис. 1. Температурные распределения приводов искусственных космических объектов (цилиндров А и В)

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученная математическая модель процесса нагрева приводов искусственных космических аппаратов дает возможность контролировать тепловой режим. Подобные модели рассматриваются при исследовании температурных полей приводов под воздействием космического излучения с целью определения предельно допустимых температур и их ограничения. Полученное аналитическое решение и разработанная программа расчета позволяет не только производить расчеты температурных полей, нои использовать для расчетов приводов на стадии проектирования объектов идля анализа тепловых процессов в процессе функционирования. Полученное решение позволяет использовать его в задачах оптимального управления процессом нагрева цилиндрических тел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Коздоба Л.А. Оптимальтное управление теплопроводностью. Труды второй Российской национальной конференции по теплообмену . в 8 томах.Т.7. Теплопроводность и теплоизоляция. М.: Издательство МЭИ. 1198.258с.

[2] Лыков А.В.Теория теплопроводности.М.:.Высшая школа, 1967. Москва.599с.

[3] Карташев Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел.М.: Высшая школа, 1985. 480 с.

[4] Т.Е.Власова, Л.Н.Смирнова. В.В.Стулин. Решение обобщенной краевой задачи теплопроводности для ограниченного цилиндра методом функции Грина.

[5] К.В.Беликов,Т.Е.Власова, Л.Н.Смирнова, А.В.Родионов. Решение задач нагрева системы двух тел с источниками тепла в местах контакта. Математическое моделирование теплообмена в технологических процессах и установках: С науч.трудов.Куйбышев: КПтИ,1987.147с.

[6] Бейтмен Г Эрдейн А. Таблицы интегральных преобразований. М.: т.2 Наука 1970

[7] Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы, сумм.интегралов, рядов и произведений. М.: Наука,1971.1108с.

Численное моделирование динамики участка энергоблока Назаровской ГРЭС полиномами Вольтерра

Солодуша С.В.
ИСЭМ СО РАН
Иркутск, Россия
solodusha@isem.irk.ru

Спиряев В.А.
ИСЭМ СО РАН
Иркутск, Россия
eldin@mail.ru

Таиров Э.А.
ИСЭМ СО РАН
Иркутск, Россия
tairov@isem.irk.ru

***Abstract* — The paper discusses the approach of identifying Volterra polynomials. It based on a generalization of the product integration method. An algorithm for the numerical identification of a quadratic scalar Volterra polynomial is proposed. The algorithm based on the application of test signals in the form of a combination of Heaviside functions with a deviating argument. The suggested approach was used for modeling the dynamics of pressure in the condenser in the part of the power unit of Nazarovo power station. The results of the calculations showed sufficient accuracy of modeling for practical application.**

Ключевые слова — полиномы Вольтерра, моделирование нелинейных динамических систем, метод интегрирования произведения.

I. Введение

Одно из актуальных направлений исследования динамики энергетических объектов и систем связано с разработкой математических моделей для дальнейшего развития систем управления. В современных условиях, когда осуществляется реструктуризация энергетики, развитие методов управления режимами локальных энергетических объектов является важной производственной задачей. Проблема восстановления входных технических показателей (сигналов) для регулирования энергетического объекта делает актуальными задачи построения новых математических моделей. Существенную роль в задачах математического моделирования динамических систем играют интегральные уравнения Вольтерра I рода. Это объясняется их универсальностью, а также удобством описания таких динамических процессов, применение к которым аппарата дифференциальных уравнений затруднено или вообще невозможно [1], например, в процессе эксплуатации энергетических объектов и систем. Обширный обзор современного состояния исследований в области применения интегральных уравнений приведен в монографии [2]. Дополнительный импульс в изучении интегральных уравнений Вольтерра и их практического применения для моделирования нелинейных динамических систем был связан с введением понятия интегро-степенного ряда Вольтерра [3]

$$y(t) = \sum_{m=1}^{\infty} \int_0^t \ldots \int_0^t K_m(s_1,\ldots,s_m) \prod_{k=1}^{m} x(t-s_k)\,ds_k,\ t \in [0,T]. \quad (1)$$

Здесь t – время, $x(t)$ – входной сигнал, $y(t)$ – выходной сигнал. Ядра Вольтерра K_m симметричны по всем переменным s_k, $k = \overline{1,m}$, и не зависят от t. В этом случае свойства динамической системы, описываемой (1), не изменяются с течением времени.

Вопросам построения и применения конечных отрезков (полиномов) Вольтерра при описании технических (энергетических) систем, мониторинге технологических процессов, моделировании адаптивных систем автоматического управления посвящены, например, работы [4-7]. Одна из основных трудностей практического применения методов математического моделирования на основе полиномов Вольтерра во временной области связана с двумя обратными задачами: задачей идентификации переходных характеристик объекта (ядер Вольтерра) и задачей восстановления входного сигнала. Решению первой задачи применительно к моделированию отдельного участка теплообменной системы энергоблока Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт посвящена данная работа.

II. Об идентификации полиномов Вольтерра

При разработке любой математической модели, адекватно описывающей реальный объект или процесс, необходим этап «настройки» этой модели на исследуемый объект, под которой понимается идентификация входящих в математическое описание модели тех или иных параметров по соответствующей информации об объекте или процессе. Задачи идентификации модели относятся к обратным задачам и являются, как правило, некорректно поставленными. Для устойчивого приближенного решения таких задач приходится применять весь спектр методов регуляризации некорректных задач [8]. Вместе с тем, существует класс слабо некорректных (слабо неустойчивых) задач [9], для которых имеется принципиальная возможность построения особо эффективных вычислительных процедур за счет использования в качестве «естественных» параметров регуляризации шага сетки в конечно-разностных методах [10]. В частности, в этот класс входят интегральные уравнения Вольтерра I рода, играющие первостепенную роль при построении (идентификации) математической модели нелинейной динамической системы. В силу универсальности данного математического аппарата методам идентификации ядер Вольтерра посвящено много работ. Один из известных подходов базируется на применении функции Хевисайда

Работа выполнена в рамках научных проектов III.17.3.2 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310442-8, и III.17.1.3 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310443-5.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

$$e(t)=\begin{cases}0,\ t\le 0,\\ 1,\ t>0.\end{cases}$$

В частности, в статье [11] рассмотрена методика, основанная на аппроксимации сигнала с постоянным периодом T дискретно заданным сигналом ступенчатого вида с постоянным шагом квантования. В работе [12] данная методика развита для тестовых (обучающих) сигналов в виде комбинаций функции Хевисайда с отклоняющимся аргументом

$$x_{\omega_1,\dots,\omega_m}(t)=\sum_{j=1}^{m}C_{\omega_j}\alpha e(t-\omega_j),\ \omega_j\ge 0,\ \sum_{j=1}^{m}\omega_j\le t\le T,$$

где α – амплитуда (высота) сигнала, логическая переменная $C_{\omega_j}=0$ при $\omega_j=0$. В работах [13, 14] был предложен подход, основанный на применении сигналов

$$\begin{aligned}x_{\omega_1,\dots,\omega_{m-1}}(t)=\alpha\Bigg(e(t)+2\sum_{k=1}^{m-2}(-1)^k e\Bigg(t-\sum_{i=1}^{k}\omega_i\Bigg)+\\ +(-1)^{m-1}e\Bigg(t-\sum_{i=1}^{m-1}\omega_i\Bigg),\ 0\le t,\omega_i\le T,\ m\ge 2,\end{aligned}\qquad(2)$$

позволяющий свести задачу идентификации функций $K_i(s_1,\dots,s_i),\quad i=\overline{1,m},$ к решению неклассических линейных многомерных уравнений Вольтерра I рода, допускающих явные формулы обращения. Как показано в [9], применение данной методики ограничено жесткими условиями разрешимости интегральных уравнений в нужном классе функций. Вообще говоря, задача моделирования отклика нелинейной динамической системы на произвольное входное возмущение полиномами Вольтерра знания непосредственно самих ядер $K_i(s_1,\dots,s_i)$ не требует. Поэтому ее можно трактовать как задачу поиска интегралов от ядер Вольтерра. Тогда задача решения многомерных интегральных уравнений может быть сведена к решению соответствующих систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Это позволит избежать проблемы обеспечения условий разрешимости соответствующих интегральных уравнений относительно искомых ядер, а также неустойчивых операций численного дифференцирования в случае реальных данных, отягощенных погрешностями измерений. Рассмотрим далее реализацию данного подхода с помощью метода «интегрирования произведения» (ИП) [15], согласно которому при выбранном шаге h равномерной сетки $t_i=ih,\quad nh=T,$ $i=\overline{1,n},$ имеем

$$\int_0^{ih}K(s)x\big(ih-s\big)ds\approx\sum_{j=1}^{i}x_{i-j+\frac12}\int_{(j-1)h}^{jh}K(s)ds.\qquad(3)$$

Согласно [16], численный метод ИП обладает квадратичной сходимостью по шагу сетки h. Метод более эффективен, чем классические квадратурные методы того же порядка (см. [17]), если $K(s)$ в (3) – сильно осциллирующая функция.

III. К построению полиномов Вольтерра с помощью метода интегрирования произведения

Применимость (3) для идентификации полинома Вольтерра

$$y(t)=\sum_{m=1}^{N}\int_0^t\dots\int_0^t K_m(s_1,\dots,s_m)\prod_{k=1}^{m}x(t-s_k)ds_k,\ t\in[0,T],\quad(4)$$

при $N=2,3$ показана в [18], где предполагалось, что $K_m(s_1,\dots,s_m)=\varphi(s_1)\varphi(s_2)\dots\varphi(s_m),\quad \varphi(t)\in C_{[0,T]}.$ Тогда сеточный аналог (4), построенный с помощью (3), имеет вид

$$y^h(t_i)\approx\sum_{m=1}^{N}\Bigg(\sum_{j=1}^{i}l_j x_{i-i_k+\frac12}\Bigg)^m,\ l_j=\int_{(j-1)h}^{jh}\varphi(s)ds.\quad(5)$$

При идентификации l_j из (5) в [18] использовались отклики на входные воздействия (2), в которых точки разрывов были согласованы с узлами равномерной сетки. Обобщая метод ИП для случая многомерных сверток, перепишем (4) в виде

$$y^h(t_i)=\sum_{m=1}^{N}\Bigg[\sum_{i_1=1}^{i}\dots\sum_{i_m=1}^{i}\Bigg(I_{i_1,\dots,i_m}\prod_{k=1}^{m}x\Big(\big(i-i_k+\tfrac12\big)h\Big)\Bigg)\Bigg],\quad(6)$$

$$I_{i_1,\dots,i_m}=\int_{(i_1-1)h}^{i_1h}\dots\int_{(i_m-1)h}^{i_mh}K_m\big(s_1,\dots,s_m\big)ds_1\dots ds_m,$$

$i=\overline{1,n}.$ Выпишем из (6) при N=2 квадратичный полином Вольтерра:

$$\begin{aligned}&y_{sq}\big(t_i\big)=\\ &=\sum_{\mu=1}^{i}m_\mu x_{i-\mu+\frac12}+\sum_{\mu=1}^{i}\sum_{\nu=1}^{i}p_{\mu,\nu}x_{i-\mu+\frac12}x_{i-\nu+\frac12},\ i=\overline{1,n},\\ &m_\mu=\int_{(\mu-1)h}^{\mu h}K_1\big(s\big)ds,\ p_{\mu,\nu}=\int_{(\mu-1)h}^{\mu h}\int_{(\nu-1)h}^{\nu h}K_1\big(s\big)ds_1ds_2.\end{aligned}\qquad(7)$$

Тогда задача идентификации для (7) состоит в поиске массивов m_μ и $p_{\mu,\nu}$. Обозначив $\omega_1=\omega$, воспользуемся однопараметрическим семейством тестовых сигналов вида (2) при $m=2$:

$$\begin{aligned}x^{\alpha}_{\omega_j}(t)&=\alpha\big(e(t)-e(t-\omega_j)\big),\\ x^{\beta}_{\omega_1}(t)&=\beta\big(e(t)-e(t-\omega_1)\big),\ t,\omega_j\in[0,T],\end{aligned}\qquad(8)$$

где $j=\overline{1,n},\ \omega_j=jh,\ nh=T,\ \ \alpha\ne\beta\ne 0.$

Подстановка сигналов (8) в (7) приводит к СЛАУ относительно m_μ и $p_{\mu,\nu}$:

$$y^{\alpha}_{sq\,i,j} = \alpha \sum_{\mu=i-j+1}^{i} m_\mu + \alpha^2 \sum_{\mu=i-j+1}^{i} \sum_{\nu=i-j+1}^{i} p_{\mu,\nu}, \qquad (9)$$

$$y^{\beta}_{sq\,i,1} = \beta m_i + \beta^2 p_{i,i},\ 1 \le j \le i \le n. \qquad (10)$$

Система (9), (10) является замкнутой и невырожденной. Действительно, в силу скалярности входного сигнала, ядро $K_2(s_1, s_2)$ является симметричной функцией, так что $p_{\mu,\nu} = p_{\nu,\mu}$, и, следовательно, число уравнений в (9), (10) $n + \frac{n(n+1)}{2}$ равно числу неизвестных. Невырожденность следует из того, что определитель матрицы коэффициентов у неизвестных СЛАУ равен $2^{\frac{n(n-1)}{2}} \alpha^{n^2} \beta^n (\alpha - \beta)^n \neq 0$ при $\alpha \neq \beta \neq 0$ [19]. Решение системы (9), (10) представимо в следующем виде:

$$m_i = \frac{\alpha^2 y^{\beta}_{i,1} - \beta^2 y^{\alpha}_{i,1}}{\alpha^2\beta - \beta^2\alpha};\ p_{i,i} = \frac{\beta y^{\alpha}_{i,1} - \alpha y^{\beta}_{i,1}}{\alpha^2\beta - \beta^2\alpha},\ 1 \le j \le i \le n;$$

$$p_{i,j} = \frac{y^{\alpha}_{i,i-j+1} - y^{\alpha}_{i-1,i-j} - y^{\alpha}_{i,i-j} + y^{\alpha}_{i-1,i-j-1}}{2\alpha^2},\ p_{i,j} = p_{j,i}.$$

Таким образом, задача идентификации полинома (7) решена. Далее применим разработанный алгоритм для моделирования нелинейной динамики давления в конденсаторе и температуры воды на выходе из регенеративного подогревателя энергоблока Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт.

IV. Описание предметной области

Имитационная модель энергоблока реализована в ИСЭМ СО РАН в виде программно-вычислительного комплекса «Р150», представляющего развитие модели энергоблока Иркутской ТЭЦ-10 [20]. Для проведения вычислительных экспериментов был выбран участок теплообменной системы, включающий конденсатор (К) типа 80-КЦС-1 и подогреватель низкого давления (ПНД-1). Структурная схема представлена на рис. 1.

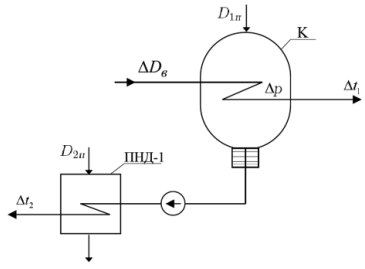


Рис. 1. Структурная схема участка

На вход конденсатора поступает охлаждающая вода с начальной температурой $t_{0_{in}} = 14.5°C$. В качестве входного сигнала выбрано изменение расхода воды $\Delta D_в(t)$, проходящей через конденсатор. В качестве выходных сигналов рассматриваются отклонение давления Δp в конденсаторе и отклонения температур воды Δt_1, Δt_2 на выходе из соответствующих теплообменных устройств при начальных значениях $p_0 = 4359$ Па и $D_{в_0} = 11562.2$ кг/с.

В предположении, что расходы пара, поступающие на конденсатор и ПНД-1, являются константами $D_{1П} = 51.46$ кг/с, $D_{2П} = 2.03$ кг/с, реализовано построение квадратичных полиномов Вольтерра на базе ИП-метода, описанного выше, и с помощью методики идентификации ядер Вольтерра из [9]. Идентификация полиномов выполнена на основе откликов, полученных с помощью ПВК «Р150», на тестовые сигналы вида (9) с амплитудами $\alpha = 30\% D_{в_0}$, $\beta = -30\% D_{в_0}$.

V. Результаты вычислительного эксперимента

Сравнительный анализ результатов, выполненный для данных, полученных при изменении расхода воды произвольного вида в диапазоне $25\% \div 40\%$ от начального значения, показал достаточную для практических целей точность вычислений. В текущем разделе с точностью $\delta = 10^{-6}$ приведены результаты тестирования, выполненные для $\Delta p(t)$, $t \in [0,120]$. В качестве допустимых возмущающих воздействий рассмотрим сигналы, не участвовавшие в задаче идентификации, следующего вида

$$x^{\gamma}_{\omega}(t) = \gamma\left(e(t) - 2e(t-\omega) + e(t-T)\right),$$

где $0 \le \omega \le t \le T$, $\gamma = 35\% D_{в_0}$. Сравним точность моделирования откликов y_{et}, полученных с помощью имитационной модели, с откликом $y^{(1)}_{sq}$ полинома (7) и реакцией $y^{(2)}_{sq}$ сеточного аналога (4) при $N = 2$, ядра Вольтерра в котором восстановлены с помощью методики [9] на базе метода средних прямоугольников. Расчеты проводились на равномерной сетке с шагом $h = 8$, $\omega = jh$, $t = ih$, где $1 \le j \le i \le 15$. Оценка точности моделей выполнялась на основе нескольких критериев: максимума модуля отклонений в узловых точках отклика имитационной модели от отклика интегральной модели и модуля отклонений в конце временного интервала $T = 120$ с. Соответствующие невязки обозначим через

$$\varepsilon^{(1)}_1 = \max_{t\in[0,120]} |\, y_{et}(t) - y^{(1)}_{sq}(t)\,|,$$

$$\varepsilon^{(2)}_1 = \max_{t\in[0,120]} |\, y_{et}(t) - y^{(2)}_{sq}(t)\,|,$$

$$\varepsilon^{(1)}_2 = |\, y_{et}(T) - y^{(1)}_{sq}(T)\,|,\ \varepsilon^{(2)}_2 = |\, y_{et}(T) - y^{(2)}_{sq}(T)\,|.$$

Результаты приведены в таблицах I и II.

ТАБЛИЦА I. ЗНАЧЕНИЯ АБСОЛЮТНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ε_1

ω	$\varepsilon_1^{(1)}$	$\varepsilon_1^{(2)}$	$\varepsilon_1^{(2)} - \varepsilon_1^{(1)}$
8	14.258096	14.243930	-0.014165
16	13.800639	13.775585	-0.025054
24	13.308979	13.288886	-0.020094
32	12.790370	12.756674	-0.033696
40	12.256400	12.182921	-0.073479
48	11.714314	11.616293	-0.098020
56	11.170670	11.051051	-0.119615
64	10.609851	11.067729	0.457877
72	9.968965	11.120983	1.152018
80	9.062503	11.167414	2.104911
88	7.446412	11.214804	3.768393
96	4.474953	11.270842	6.795889
104	4.417784	11.311155	6.893371
112	4.363355	11.353757	6.990402

ТАБЛИЦА II. ЗНАЧЕНИЯ АБСОЛЮТНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ε_2

ω	$\varepsilon_2^{(1)}$	$\varepsilon_2^{(2)}$	$\varepsilon_2^{(2)} - \varepsilon_2^{(1)}$
8	14.258096	14.243930	-0.014165
16	13.800640	13.775585	-0.025054
24	13.308980	13.288886	-0.020094
32	12.790370	12.756674	-0.033696
40	12.256400	12.182921	-0.073479
48	11.714314	11.616293	-0.098020
56	11.170667	11.051051	-0.119615
64	10.609851	10.493276	-0.116575
72	9.968965	9.976920	0.007955
80	9.062503	9.459784	0.397281
88	7.446412	8.978847	1.532435
96	4.301364	8.836092	4.534728
104	0.873169	9.874041	9.000871
112	4.363355	11.353757	6.990403

Из таблиц видно, что область преимущественного использования рассматриваемых подходов к построению полиномов Вольтерра зависит от длительности возмущающего воздействия ω.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, задача построения квадратичного полинома Вольтерра с помощью метода интегрирования произведения сведена к задаче решения некоторой СЛАУ. Данный подход применен для моделирования динамики теплоэнергетического оборудования энергоблока Назаровской ГРЭС. Вычислительный эксперимент показал приемлемый для практического использования результат, при котором максимальная относительная погрешность составила 0.3% от p_0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. – Киев: Наукова думка, 1986. – 543 с.

[2] Brunner H. Volterra integral equations: an introduction to theory and applications. – Cambridge: Cambridge University Press, 2017. – 387 p.

[3] Вольтерра В. Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений. – М.: Наука, 1982. – 302 с.

[4] Апарцин А.С., Таиров Э.А., Солодуша С.В., Худяков Д.В. Применение интегро-степенных рядов Вольтерра к моделированию динамики теплообменников // Изв. РАН. Энергетика, 1994. № 3. – С. 28-42.

[5] Веников В.А., Суханов О.А. Кибернетические модели электрических систем. – М.: Энергоиздат, 1982. – 327 с.

[6] Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов. – М.: Энергия, 1979. – 240 с.

[7] Павленко В.Д. Информационная технология косвенного контроля и диагностики динамических объектов на основе моделей Вольтерра // Труды Одесск. политехн. ун-та, 2008. № 2(30). – С. 194-199.

[8] Тихонов А.Н. О решении некорректно поставленных задач и методе регуляризации // Докл. АН СССР, 1963. Т. 151. № 3. – С. 501-504.

[9] Апарцин А.С. Неклассические уравнения Вольтерра I рода: теория и численные методы – Новосибирск: Наука, 1999. – 193 с.

[10] Апарцин А.С., Бакушинский А.Б. Приближенное решение интегральных уравнений Вольтерра I рода методом квадратурных сумм // Дифференциальные и интегральные уравнения. – Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 1972. Вып. I. – С. 248-258.

[11] Fujii K., Nakao K. Identification of nonlinear dynamic systems without self–regulation using Volterra functional series // Transaction of the Society Instrument and Control Engineers (Japan), 1971. Vol. 7. № 2. – P. 129-136.

[12] Павленко В.Д. Компенсационный метод идентификации нелинейных динамических систем в виде ядер Вольтерра // Труды Одесск. политехн. ун-та, 2009. № 2. – С. 121-129.

[13] Apartsyn A.S. Mathematical modeling the dynamic systems and objects with the help of the Volterra integral series // EPRI-SEI Joint seminar of methods for solving the problems on energy power systems development and control. – China, 1991. – P. 117-132.

[14] Апарцин А.С. О решении многомерных уравнений Вольтерра I рода, возникающих в задаче идентификации нелинейных динамических систем // Методы оптимизации и их приложения. – Иркутск: СЭИ СО РАН, 1992. – С. 219-222.

[15] Young A. Approximate product integration // Proc. Roy. Soc. London (A) 224, 1954. – P. 552-561.

[16] Linz P. Product Integration Method for Volterra Integral Equations of the First Kind // BIT, 1971. Vol. 11. – P. 314-421.

[17] Бахвалов Н.С. Численные методы (анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения). – М.: Наука, 1973. – 632 с.

[18] Апарцин А.С., Спиряев В.А. Об одном подходе к идентификации полиномов Вольтерра // Оптимизация, управление, интеллект, 2005. № 2. – С. 109-117.

[19] Спиряев В.А. Обоснование product integration method для идентификации квадратичного и кубичного полиномов Вольтерра в случае скалярного входа // Аналитическая механика, устойчивость и управление. Труды IX Междунар. Четаевской конф. – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2007. Т. 5. – С. 210-217.

[20] Таиров Э.А., Логинов А.А., Чистяков Э.А. Математическая модель, численные методы и программное обеспечение тренажера для энергоблока Иркутской ТЭЦ-10. – Иркутск: СЭИ СО РАН, 1999. Препринт № 11. – 43 с.

Задача нахождения маршрутов для совокупности агентов среди объектов двух типов

Сорокина А.М.
Факультет прикладной математики, информатики и механики
Воронежский государственный университет
г. Воронеж, Россия
nasty.sor19@gmail.com

Медведев С.Н.
Факультет прикладной математики, информатики и механики
Воронежский государственный университет
г. Воронеж, Россия
s_n_medvedev@mail.ru

Медведева О.А.
Факультет прикладной математики, информатики и механики
Воронежский государственный университет
г. Воронеж, Россия
medvedeva@amm.vsu.ru

***Abstract* - The vehicle routing problem for several agents among the objects of two types is proposed. It is necessary to move all objects of the first type to objects of the second type. That is, it is necessary to create routes for agents so that all objects of the first type are visited, objects of different types alternate in the route and the total cost of moving is minimal. The mathematical model of the problem in the form of a mathematical programming problem is proposed. The article describes the developed "greedy" and genetic solution algorithms. Special crossover and mutation operators have been developed for this problem to implement the genetic algorithm. On the basis of the developed software, a computational experiment was conducted. Its results are presented at the end of the article.**

Ключевые слова — задача маршрутизации транспорта, задача математического программирования, генетический алгоритм, «жадный алгоритм», оператор скрещивания, оператор мутации

I. Введение

В современном мире стремительно развивается промышленность, в том числе и сельскохозяйственная промышленность. Вследствие этого поднимаются задачи оптимизации, связанные с уменьшением затрат или получением максимальной прибыли. Это порождает потребность в составлении математических моделей для принятия оптимальных решений.

Рассмотрим следующую задачу. Пусть имеется m ($i = \overline{1,m}$) объектов первого типа и n ($j = \overline{1,n}$) объектов второго типа. Известны расстояния c_{ij} между объектами первого и второго типов. Для перемещения объектов первого типа к объектам второго типа выделено K ($k = \overline{1,K}$) агентов. Характеристики агента позволяют ему за один раз переместить только один объект. Все агенты изначально находятся в некоторой фиксированной точке. По окончанию работы агенты должны собраться в той же точке. От неё известны расстояния до всех объектов первого и второго типов. Необходимо построить маршруты агентов таким образом, чтобы было пройдено минимальное суммарное расстояние и при этом все объекты первого типа были перемещены к объектам второго типа.

Существует ряд разновидностей задачи маршрутизации транспорта (ЗМТ) с различными дополнительными условиями и различными подходами к решению [1-7]. В [1] предложены динамический граф для ЗМТ и методика решения, основанная на генетическом поиске [1]. В [2] – матричный подход к решению ЗМТ. В [3] представлены ЗМТ с различной грузоподъемностью и двухфазный алгоритм решения. В [4] – модификация двухфазного алгоритма решения, использующая на этапе кластеризации алгоритм сбалансированного дихотомического деления вершин на группы. В [5] рассмотрена ЗМТ с ограниченной грузоподъемностью, модель которой представлена с помощью графа, в котором клиенты (объекты) моделируются как ребра, а не как вершины. В [5] предложен последовательный алгоритм route-first-cluster-second (RFCS), основанный на создании гигантского маршрута, разбитого на маленькие маршруты. В [6] рассмотрено решение ЗМТ с ограниченной грузоподъемностью с использованием подхода обучения с подкреплением. В [7] вводится постановка с двумя типами маршрутов, для которой строится смешанная целочисленная модель, и предлагается решение методом ветвей и границ.

Много работ посвящено моделированию различных многоиндексных задач [8-11]. В них учитываются различные дополнительные условия [8-9], различный тип информации [10], а также рассматриваются различные подходы к решению [11].

Исходя из приведенного обзора, можно сделать вывод, что задачам с чередованием объектов практически не уделено внимание, хотя они имеют практическую значимость. Например, такая задача может возникнуть при уборке стогов сена с поля в грузовые машины. Здесь в качестве агентов будут выступать трактора, в качестве объектов первого типа – стога и в качестве объектов второго типа – грузовые машины.

II. Математическая модель

Составим математическую модель рассматриваемой задачи в виде задачи математического программирования. Для этого введём следующие переменные:

$$x_{ijl}^{k} = \begin{cases} 1, \textit{если } k-\textit{й трактор отъезжает от } i-\textit{го стога} \\ \quad \textit{к } j-\textit{й машине и от неё едет к } l-\textit{му стогу} \\ 0, \textit{иначе}, \end{cases}$$

где $i,l = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,n}$, $k = \overline{1,K}$.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

То есть будем говорить о том, что переменные отвечают за мини-маршрут «стог-машина-стог» для каждого трактора.

В данной постановке отметим важный момент: все тракторы начинают и заканчивают свой маршрут в единой точке сбора (базе). Чтобы отразить этот факт в математической модели, введём фиктивный 0-й стог, который будет обозначать базу, т.е. точку начала маршрута. Таким образом, трактор начинает движение от 0-го стога. Следуя практической логике, от места сбора трактор должен поехать к стогу. Но это противоречит тому, как были введены переменные: от стога трактор должен двигаться к машине, а затем к другому стогу. Тогда для разрешения этой проблемы необходимо ввести и фиктивную 0-ю машину. Все тракторы из 0-го стога должны подъехать к 0-й машине, а потом уже к другим стогам. Расстояние между 0-м стогом и 0-й машиной будем считать равным нулю. Так же стоит отметить тот факт, что к 0-й машине тракторы не возвращаются.

В соответствии с тем, как были введены переменные, пересчитаем расстояния: $c_{ijl} = c_{ij} + c_{lj}$ – «расстояние от i-го стога до j-й машины» + «расстояние от j-й машины до l-го стога».

Перейдём непосредственно к построению математической модели.

Целевая функция нашей задачи будет выглядеть следующим образом:

$$L(X) = \sum_{k=1}^{K}\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n}\sum_{l=0}^{m} c_{ijl}x_{ijl}^{k} \to min. \qquad (1)$$

Опишем ограничения задачи.

От каждого стога, кроме 0-го, отъезжает только один трактор:

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=0}^{n}\sum_{l=0}^{m} x_{ijl}^{k} = 1,\ i = \overline{1,m}. \qquad (2)$$

Ко всем машинам необходимо подъехать хотя бы один раз:

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=0}^{m}\sum_{l=0}^{m} x_{ijl}^{k} \geq 1,\ j = \overline{0,n}. \qquad (3)$$

К каждому стогу, кроме 0-го, подъезжает только один трактор:

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n} x_{ijl}^{k} = 1,\ l = \overline{1,m}. \qquad (4)$$

Все тракторы из 0-го стога едут только к 0-й машине.

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=0}^{m} x_{0jl}^{k} = 0,\ j = \overline{1,n}. \qquad (5)$$

К 0-й машине тракторы приезжают только из 0-го стога:

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=0}^{m} x_{i0l}^{k} = 0,\ i = \overline{1,m}. \qquad (6)$$

Все тракторы должны вернуться в 0-й стог:

$$\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=1}^{n} x_{ij0}^{k} = 1,\ k = \overline{1,K}. \qquad (7)$$

Все перечисленные выше ограничения не гарантируют отсутствие подциклов для каждого трактора. Поэтому следует добавить условие, аналогичное условию отсутствия подциклов в задаче коммивояжера [12]. Пусть J^k – множество индексов стогов, которые посетил k-й трактор; $N^k = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{m} x_{ijl}^{k} + 1$ – количество стогов, которые посетил k-й трактор, т.е. $\left|J^k\right| = N^k,\ \forall k = \overline{1,K}$. Пусть $\tilde{J}^k$ – множество, полученное из множества J^k удалением любого индекса. Тогда необходимое ограничение будет иметь следующий вид:

$$u_i - u_l + N^k\left(\sum_{j=1}^{m} x_{ijl}^{k}\right) = N^k - 1,$$

$$\forall i, l \in \tilde{J}^k, i \neq l, \forall k = \overline{1,K}. \qquad (8)$$

Здесь u_i , u_l – порядковые номера стогов в маршруте k-го трактора.

Итак, получена математическая модель (1)-(8).

III. Жадный алгорим

В данной статье для решения поставленной задачи предлагаются два алгоритма: «жадный» и генетический. «Жадные» алгоритмы формируют решение, используя локальный оптимальный выбор на каждом шаге [10]. Такой подход позволяет быстро получить допустимое субоптимальное решение, которое чаще всего хуже оптимального решения и заметно уступает решениям, полученным с помощью других приближённых алгоритмов.

Идея генетических алгоритмов заключается в математической имитации жизни биологической популяции и опирается на законы естественного отбора.

Идея «жадного» алгоритма для решения данной задачи состоит в выборе минимального мини-маршрута «стог-машина-стог». Это можно записать в виде следующей схемы:

1) Определить, к какому стогу поедет каждый трактор от 0-й машины. Для этого по очереди для каждого трактора выбрать ближайший стог из еще несобранных стогов.

2) Для каждого трактора по очереди выбрать машину, к которой повезём стог, у которого сейчас находимся, и стог из еще не выбранных, к которому поедем следующим. При этом суммарное расстояние от текущего стога до машины и от машины до следующего стога должно быть минимальным.

3) Пункт 2 повторить, пока все стога не будут собраны.

4) Когда все стога будут собраны, все тракторы должны вернуться к 0-му стогу.

Таким образом, предлагается следующий алгоритм, где j – номер машины, i – номер стога, L – множество несобранных стогов, J – множество непосещенных машин.

Алгоритм 1. Жадный алгоритм

1) Задать $j = 0, i = 0, L = \{1, \ldots, m\}, J = \{1, \ldots, m\}$.
2) Задать $k = 1$.
3) Вычислить $\min_{l \in L} \{c_{ijl}\} = c_{ijl^k}$, зафиксировать соответствующее значение $x^k_{ijl^k} = 1$.
4) Изменить множество $L = L \setminus \{l^k\}$.
5) Проверить: $k = K$?
   Если **нет**, то задать $k = k + 1$ и перейти к шагу 3.
   Если **да**, то перейти к шагу 6.
6) Проверить $L = \varnothing$?
   Если **нет**, то перейти к шагу 7.
   Если **да**, то перейти к шагу 13.
7) Задать $k = 1$.
8) Задать $i = l^k$.
9) Вычислить $\min_{l \in L,\, j = \overline{1,n}} \{c_{ijl}\} = c_{ij^k l^k}$, зафиксировать соответствующее значение $x^k_{ij^k l^k} = 1$.
10) Изменить множества $L = L \setminus \{l^k\}, J = J \setminus \{j^k\}$.
11) Проверить $L = \varnothing$?
    Если **нет**, то перейти к шагу 12.
    Если **да**, то перейти к шагу 13.
12) Проверить: $k = K$?
    Если **нет**, то задать $k = k + 1$ и перейти к шагу 8.
    Если **да**, то перейти к шагу 13.
13) Задать $k = 1, l = 0$.
14) Задать $i = l^k$.
15) Проверить $J = \emptyset$?
    Если **да**, то перейти к шагу 17.
    Если **нет**, то перейти к шагу 16.
16) Вычислить $\min_{j \in J} \{c_{ijl}\} = c_{ij^k l}$, зафиксировать соответствующее значение $x^k_{ij^k l} = 1$.
    Задать $k = k + 1$ и перейти к шагу 14.
17) Вычислить $\min_{j = \overline{1,n}} \{c_{ijl}\} = c_{ij^k l}$, зафиксировать соответствующее значение $x^k_{ij^k l} = 1$.
18) Проверить: $k = K$?
    Если **нет**, то задать $k = k + 1$ и перейти к шагу 14.
    Если **да**, то ОСТАНОВ.

Стоит отметить, что данная алгоритмическая схема предполагает, что количество тракторов больше количества машин, $K > n$.

Возможны модификации предложенного «жадного» алгоритма:

- модификация с варьированием приоритетности тракторов: давать каким-нибудь тракторам выбирать стог и машину не один, а два (три) раза подряд;
- модификация с перестановкой тракторов.

«Жадные» алгоритмы работают быстро, и решения, полученные с их помощью, можно использовать, например, в качестве начальной популяции для генетического алгоритма.

IV. Генетический алгоритм

Общая схема генетического алгоритма выглядит следующим образом [13]:

1) Формирование начальной популяции.
2) Оценка особей популяции.
3) Отбор (селекция).
4) Скрещивание.
5) Мутация.
6) Формирование новой популяции (поколения).
7) Если не выполнен критерий останова, то переходим к пункту 2, иначе алгоритм заканчивает свою работу.

Чтобы решить любую задачу с помощью генетического алгоритма, необходимо ответить на несколько вопросов:

1) Как кодировать решение?
2) Как составить оператор скрещивания?
3) Как составить оператор мутации?

Остальные этапы (выбор родителей, обновление популяции, останов алгоритма) являются общими и не зависят от структуры задачи. Перед тем, как ответить на поставленные вопросы, опишем эти этапы.

Формирование начальной популяции

Используя различные модификации «жадного» алгоритма, описанные в статье ранее, можно сформировать начальную популяцию.

Оценка особей популяции

Для решения задачи с помощью генетического алгоритма необходимо задать функцию приспособленности. Так как целевая функция поставленной задачи минимизируется, то в качестве функции приспособленности можно взять обратную функцию:

$$f(x) = \frac{1}{L(x)}.$$

Отбор (селекция)

Для решения поставленной задачи будем использовать пропорциональную селекцию. Её идея заключается в том, что вероятность выбрать решение x^i одним из родителей задаётся следующей формулой:

$$P\left(x^i\right) = \frac{f\left(x^i\right)}{\sum_{x^j \in I} f\left(x^j\right)},$$

где I – полная популяция.

Чем выше приспособленность особи, тем выше вероятность её выбора.

Формирование новой популяции

Формирование новой популяции будет производится путём выбора двух лучших особей из четырёх (2 родителя и 2 потомка) с точки зрения функции приспособленности.

Останов

Лучше использовать несколько критериев останова: ограничение по числу итераций, малая разница значений функции приспособленности между худшим и лучшим решениями, длительное отсутствие прогресса и т.д.

Теперь перейдём к ответу на поставленные в начале пункта вопросы.

1. Кодирование решения

Для кодирования решения будем использовать путевое представление, то есть запись маршрута в явном виде. Хромосома будет представлять собой набор маршрутов для всех тракторов. Маршрут каждого трактора – участок хромосомы, состоящий из элементов (генов), которые представляют собой пару стог-машина. Исключение составляет последний элемент (0-й стог), у него пары нет. Этот элемент лишь показывает, что все тракторы возвращаются к 0-му стогу.

Есть маршруты для двух тракторов (рис. 1).

Рис. 1. Путевое представление решения

Это решение в закодированной форме представлено на рис. 2:

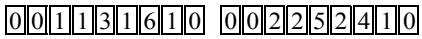


Рис. 2. Строковое представление решения

Такое строковое представление закодированного решения не удобно для восприятия, поэтому будем представлять хромосому в следующем виде:

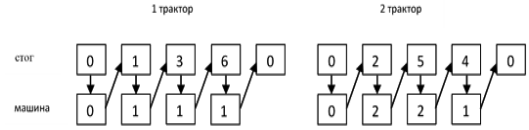


Рис. 3. Пример закодированного решения

Данное представление задаёт маршрут в явном виде. В верхней ячейке находится стог, а в нижней машина. Стрелкой обозначается направление движения. Маршрут для каждого трактора начинается элементом 0-0 (из 0-го стога в 0-ю машину) и заканчивается элементом 0 (все тракторы возвращаются в 0-й стог). Таким образом, на рис. 3 можно увидеть закодированное решение для двух тракторов.

Важной особенностью является то, что количество генов для отдельного участка хромосомы не фиксировано. То есть не для всех тракторов количество ген в маршруте будет одинаковым. Тракторам, которые «осуществляют выбор» стога и машины не в первую очередь, может «не хватить» стогов.

2. Скрещивание

Для скрещивания особей разработаем кроссовер альтернативных рёбер. Опишем и рассмотрим его на примере. Пусть есть две особи (рис. 4):

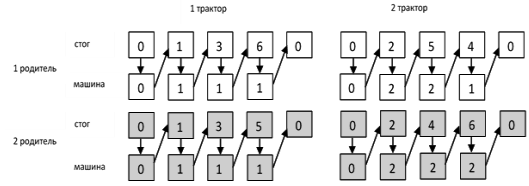


Рис. 4. Особи для скрещивания

При скрещивании по очереди выбираем элемент (связка «стог-машина») у каждого родителя. При этом запоминаем стога, которые уже выбрали. Если при скрещивании попадается стог, который уже выбран, то берем элемент от второго родителя. Если и этот стог уже выбран, то выбираем случайный стог из ещё не выбранных. Машину ставим к этому стогу ту, которая была изначально у первого родителя.

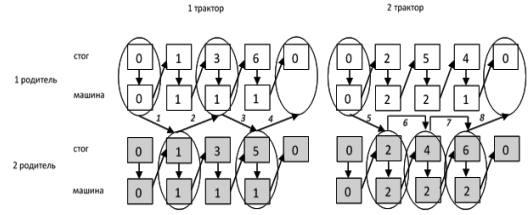


Рис. 5. Скрещивание, начинающееся с 1-го родителя

При скрещивании, которое показано на рис. 5, получается следующий потомок (рис. 6):

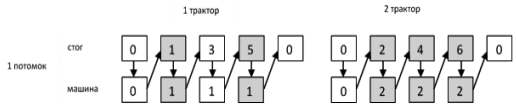


Рис. 6. 1-й потомок

Рассмотрим подробнее скрещивание для получения 2-го потомка:

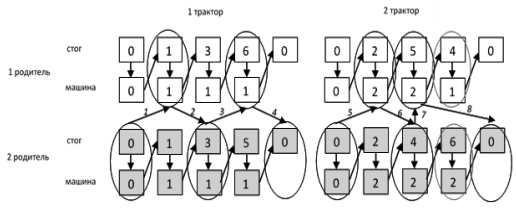


Рис. 7. Скрещивание, начинающееся со 2-го родителя

Этапы скрещивания обозначены пронумерованными стрелочками. Здесь при скрещивании во второй цепочке должен быть выбран элемент «4-1», но 4-й стог уже был выбран, тогда, согласно алгоритму, должен быть выбран элемент «6-2», но и 6-й стог тоже уже был выбран. Тогда выбираем случайный стог из еще не выбранных стогов. Пусть невыбранный стог – 5-й. Теперь необходимо выбрать машину для 5-го стога. Согласно алгоритму, выбираем машину, которая была назначена 5-му стогу у первого родителя. Таким образом, следующий элемент в цепочке получается «5-2».

Потомок, получившийся в результате скрещивания, представленного на рис. 7, представлен на рис. 8:

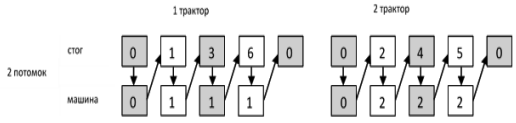


Рис. 8. 2-й потомок

Рассмотрим теперь другой пример, когда количество элементов в цепочках различных особей не одинаково. Принцип скрещивания тот же, что и описывался выше. При этом, если возникает ситуация, когда элементы цепочки закончились, но еще остались невыбранные элементы (см. рис. 10), то невыбранный элемент помещается в конец последней цепочки потомка.

Получение потомка представлено на рис. 9:

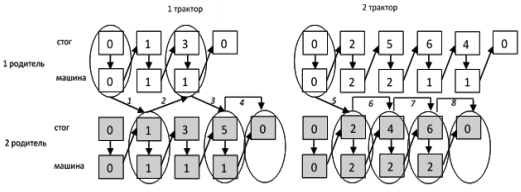


Рис. 9. Скрещивание, начинающееся с 1-го родителя

Рассмотрим подробнее скрещивание, начинающееся с 2-го родителя (рис. 10). В начале гены берутся поочерёдно от каждого родителя, пока не дойдём до элемента «0». Для второго трактора так же гены берутся поочерёдно у каждого родителя. Перед тем как завершить маршрут, добавив элемент «0», необходимо проверить все ли стога собраны. 5-й стог не вошёл ни в маршрут 1-го трактора, ни в маршрут 2-го. Тогда 5-й стог добавляется в конец маршрута последнего трактора. И машину для 5-го стога, назначаем ту, которая была у 1-го родителя. Таким образом, следующий элемент в цепочке получается «5-2». В конце завершаем маршрут элементом «0».

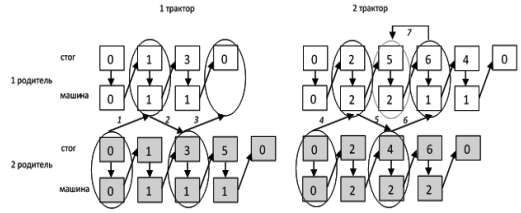


Рис. 10. Скрещивание, начинающееся с 2-го родителя

Полученные потомки представлены на рис. 11.

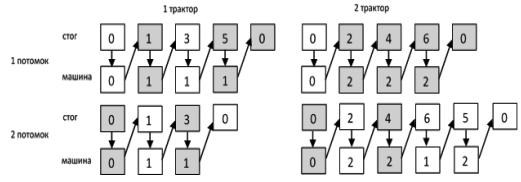


Рис. 11. Потомки

Заметим, что выполнение требования чередования обеспечивается благодаря тому, что в скрещивании всегда участвуют пары «стог-машина» как единый элемент. Ограничение (2) единственного посещения стога обуславливается логикой работы алгоритма и необходимыми проверками, представленными ранее в примерах. Ограничение (3), вообще говоря, может быть нарушено. Тогда к такому потомку обязательно применяется второй вариант оператора мутации.

3. Мутация

Мутацию можно осуществлять одним из следующих способов:

- перенос какого-либо участка хромосомы в другой сегмент этой же хромосомы: два случайно выбранных элемента меняются местами (транслокация);
- для случайного элемента меняем номер машины на другой.

Рассмотрим пример мутации первым способом (рис. 12). Выбираются два случайных гена и меняются местами.

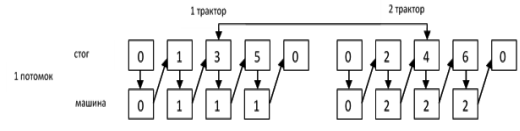


Рис. 12. Мутация «транслокация генов»

Результат мутации представлен на рис. 13.

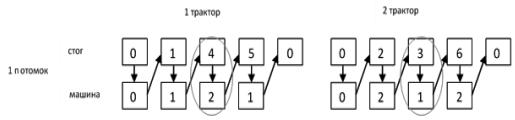


Рис. 13. Результат мутации

Теперь рассмотрим пример мутации вторым способом (рис. 14). Выбирается один случайный ген, и у него меняется номер машины на любой случайно выбранный.

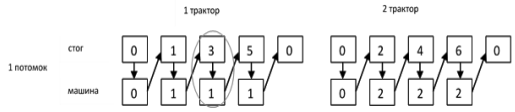


Рис. 14. Мутация «замена машины»

Результат мутации представлен на рис. 15.

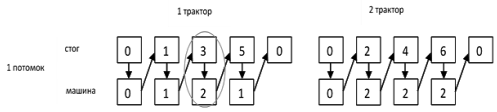


Рис. 15. Результат мутации

Заметим, что операторы мутации могут нарушить ограничение (3). В этом случае необходимо отменить текущую мутацию и применить оператор к хромосоме заново.

V. Вычислительный эксперимент

Для настройки параметров генетического алгоритма был проведен вычислительный эксперимент на основе реализованного на языке Java программного комплекса.

1. Для определения способа формирования начальной популяции был проведен эксперимент, где на вход алгоритма подавались 4 трактора, 100 стогов и 3 машины, при количестве особей равном 100. В таблице I зафиксированы средние значения для 100 решенных задач.

ТАБЛИЦА I. Способы формирования популяции

Способ формирования популяции	**Среднее количество итераций, за которое получено лучшее решение**	**Результат**
Решения «жадных» алгоритмов	5800	5039
Случайно сгенерированные решения	9700	6363
Смешанная популяция	6600	4908

Как видно из таблицы I, в качестве начальной популяции лучше взять смешанную популяцию, то есть состоящую из решений, полученных с помощью «жадных» алгоритмов, и решений, сгенерированных случайным образом.

2. Помимо ограничения на максимальное количество итераций в качестве дополнительного критерия останова разумно выбрать длительное отсутствие прогресса: K_1 итераций подряд не меняется лучшее решение. Результаты экспериментов по определению этого числа K_1 показаны в таблице II. В ней приведены усредненные значения K_1 для 100 решенных задач.

В дальнейших экспериментах K_1 будет рассчитываться по формуле:

$$K_1 = m \cdot n \cdot K \cdot populationCount \cdot 0.1,$$

где *populationCount* – число особей в популяции, m – количество стогов, n – количество машин, K – количество тракторов.

ТАБЛИЦА II. Определения числа K_1

Размерность входных данных (стога×машины×тракторы)	**Количество особей**	**Число K_1**
10×3×4	100	500
10×3×4	500	2000
10×3×4	1000	2000
50×3×4	100	3000
50×3×4	500	6000
50×3×4	1000	7000
100×3×4	100	3000
100×3×4	500	6000
100×3×4	1000	7000
50×6×4	100	6000
50×6×4	500	6000
50×6×4	1000	9000
50×3×10	100	3000
50×3×10	500	5000
50×3×10	1000	6000

3. Результаты эксперимента для различных размерностей входных данных и разного числа особей приведены в таблице III. Здесь также зафиксированы средние значения для 100 решенных задач.

ТАБЛИЦА III. Эксперимент 3

Размерность входных данных	**Кол-во особей**	**Кол-во итераций**	**Генетический алгоритм**	**Жадный алгоритм**
10×3×4	100	918	630,34	717,71
10×3×4	500	3364	711,48	717,71
10×3×4	1000	3363	671,03	717,71
50×3×4	100	3702	2547,71	2649,69
50×3×4	500	7629	2585,81	2649,69
50×3×4	1000	6786	2577,84	2649,69
100×3×4	100	7944	4790,03	5074,71
100×3×4	500	8481	4842,20	5074,71
100×3×4	1000	9288	5344,80	5074,71
50×6×4	100	7162	1475,79	1618,84
50×6×4	500	8208	1534,60	1618,84
50×6×4	1000	9515	1631,21	1618,84
50×3×10	100	6465	2709,94	2803,78
50×3×10	500	8381	2574,69	2803,78
50×3×10	1000	8206	2773,04	2803,78

Генетический алгоритм, находит решение, которое лучше, чем решение, найденное с помощью «жадного» алгоритма, в среднем на 100 единиц. Заметим, что увеличение количества особей более 100 не всегда приводит к улучшению результата, особенно при малых размерностях задачи. К сожалению, вывести

эвристическую формулу подсчета количества особей в зависимости от размерности задачи вывести не удалось.

4. Так как результат работы генетического алгоритма зависит от таких параметров, как вероятность скрещивания и вероятность мутации, то были проведены вычислительные эксперименты для различных значений этих параметров. Результаты этих экспериментов представлены в таблице IV, где на вход алгоритма подавались 50 стогов, 3 машины, 4 трактора, при количестве особей равном 1000.

ТАБЛИЦА IV. ВЕРОЯТНОСТИ СКРЕЩИВАНИЯ И МУТАЦИИ

Вероятность скрещивания	**Вероятность мутации**	**Количество итераций**	**Результат**
0,7	0,05	8622	2599,85
0,8	0,05	8319	2576,31
0,9	0,05	9224	2564,27
0,7	0,1	7118	2580,49
0,8	0,1	6786	2577,84
0,9	0,1	9001	2574,24
0,7	0,2	7097	2551,62
0,8	0,2	9042	2495,09
0,9	0,2	9765	2641,14

Как видно из таблицы IV, лучшее решение получено при вероятности скрещивания 0,8 и вероятности мутации 0,2. А наименьшее количество итераций было получено при вероятности скрещивания 0,8 и вероятности мутации 0,1.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены следующие результаты:

1. Предложена математическая модель задачи нахождения маршрутов для совокупности агентов сред объектов двух типов.

2. Разработан «жадный» алгоритм решения поставленной задачи.

3. Разработан генетический алгоритм решения поставленной задачи.

3.1. Предложено кодирование в виде путевого представления.

3.2. Предложен оператор скрещивания.

3.3. Предложены операторы мутации.

4. Представлены результаты вычислительных экспериментов для анализа и настройки параметров алгоритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Григорьев В.П., Киселев К.А. Маршрутизация доставки розничной продукции в городской дорожной сети на основе генетического алгоритма / В. П. Григорьев, К. А. Киселев // Известия Томского политехнического университета. - 2007. - Т. 310, N 2. - С. 195-199 : ил. - Библиогр.: с. 199

[2] Ишков С.А., Ишкова Е.С. Матричный подход в решении задачи маршрутизации с несколькими транспортными средствами // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. №4-1. С. 189-194

[3] Головцов Д. Л. Задача маршрутизации судов с различной грузоподъемностью морского транспортного комплекса Арктической зоны России/ Дмитрий Львович Головцов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2015. - №6(34). - С. 85-92.

[4] Пожидаев М. С. Алгоритмы решения задачи маршрутизации транспорта : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.13.18. - Томск : [б. и.], 2010

[5] Amberg, A., Domschke, W., Voß, S., 1999. Multiple center capacitated arc routing problems: A tabu search algorithm using capacitated trees, European Journal of Operational Research 124 (2000) 360-376.

[6] Ibrahim, A.A, Lo, N., Abdulaziz, R.O. and Ishaya, J.A. Capacitated vehicle routing problem, International Journal of Research – Granthaalayah 7(3) (2019) 310-327.

[7] Domínguez-Martín, B., Rodríguez-Martín, I. Salazar-González, J.-J. The driver and vehicle routing problem Computers & Operations Research, Volume 92, 2018, Pages 56-64.

[8] Афраймович, Л. Г. Многоиндексные транспортные задачи с декомпозиционной структурой / Л. Г. Афраймович // Автоматика и телемеханика. – 2012. – № 1. – С. 130–147.

[9] Малюгина, О. А. Задача комплектования штатов / О. А. Малюгина, С. Н. Медведев, Г. Д. Чернышова // Системное моделирование социально-экономических процессов : труды 31-й Международной научной школы-семинара, Воронеж, 1–5 октября 2008 г. : в 3 ч. – Воронеж : ИПЦ Воронеж. гос. ун-т., 2008. – Ч. III. – С. 265–272.

[10] Crama, Y. Approximation algorithms for three-dimensional assignment problems with triangle inequalities / Y. Crama, F.C.R. Spieksma // European J. Oper. Res. – 1992. – Vol. 60. – P. 273– 279.

[11] Трегубов, А. Г. Вероятностный подход к решению трехиндексной аксиальной задачи о назначениях / А. Г. Трегубов, С. Н. Медведев // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2015. – № 4. – 12 с.

[12] Корбут А. А. Дискретное программирование / А. А. Корбут, Ю. Ю. Финкельштейн [под ред. Д. Б. Юдина] . – М. : Наука , 1969. – 368 с.

[13] Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Генетические алгоритмы / Под ред. В. М. Курейчика. – 2-е изд., испр. и доп. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 320 с.

Комбинированное управление аппаратом воздушного охлаждения масла

Стариков А.В.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
star58@mail.ru

Овсянников В.Н.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
ovsyannikov0512@mail.ru

Колесников И.П.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
igorkoles.nu@gmail.com

***Abstract*—The air-cooling units of oil are widely used in the oil systems of gas compressors. They are designed to maintain at their outlet a certain temperature of the oil pumped through hydrostatic bearings of superchargers and powerful synchronous motors. The air-cooling unit includes fans driven by asynchronous motors. In order to save electric power, air-cooling units are supplied with frequency converters and control systems closed by the oil temperature sensor. A feature of functioning feature of the air-cooling unit is a wide range of variation of the ambient air temperatures. Therefore, most of the known control systems for such devices require changing the settings of the controllers depending on the season, which is produced by the operating personnel of the compressor station. The purpose of this study is to synthesize a combined control system for an air-cooling unit of oil. To achieve this goal, a single-loop control system, closed by an oil temperature sensor, is equipped with an air temperature sensor, which directly affects the output signal of the temperature controller. The transfer functions of all elements of the control system of the air-cooling units of oil are given, and the main constant times and the range of their changes in dependence of the cooling air temperature are determined. A proportional-differential link was used to compensate for the inertia of the oil temperature sensor in the feedback circuit. To give the control system the properties of astaticity, it was proposed to use a proportional-integral controller in a straight circuit. Analytical expressions are found that allow you to correctly select the settings of the temperature controller, which remain unchanged in all modes of operation of the device. To ensure exceptional simplicity, it was proposed to carry out a technical implementation of the control system of the air-cooling unit of oil on a frequency converter that incorporates free functional blocks and that use the so-called BICO programming technology. A computer simulation of the control system of the air-cooling unit of oil was carried out at two boundary values of the ambient temperature. It is shown that the time of the step response varies slightly from the average value with a significant variation in the parameters of the control object.**

Ключевые слова — аппарат воздушного охлаждения масла, система управления, структурная схема, передаточная функция, пропорционально-интеградьный регулятор

I. Введение

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) масла находят широкое применение на компрессорных станциях магистральных газопроводов. Они предназначены для поддержания на своем выходе определенной температуры масла, прокачиваемого через гидростатические подшипники нагнетателей и мощных электродвигателей. В процессе работы газоперекачивающих агрегатов масло нагревается и поступает в теплообменник АВО, который обдувается с помощью вентиляторов охлаждающим воздухом. За счет этого температура масла снижается до необходимого уровня. Вентиляторы, как правило, приводятся во вращение асинхронными двигателями. Раньше управление вентиляторами осуществлялось релейно. В настоящее время с целью экономии электрической энергии АВО снабжают частотными преобразователями и замкнутыми по датчику температуры масла системами управления [1 – 5].

Отличительной особенностью работы АВО является широкий диапазон изменения температур окружающего воздуха, с помощью которого осуществляется охлаждение масла. Поэтому большинство известных систем управления такими аппаратами требуют изменения настроек регуляторов в зависимости от времени года, который производит обслуживающий персонал компрессорной станции.

Целью настоящего исследования является синтез системы комбинированного управления АВО масла, не требующей вмешательства в настройку регуляторов во всем возможном диапазоне температур окружающего воздуха.

II. Функциональная схема системы комбинированного управления аппаратом воздушного охлаждения масла

Для достижения поставленной цели предложена одноконтурная система управления, замкнутая по датчику температуры масла и снабженная датчиком температуры воздуха, который непосредственно влияет на выходной сигнал регулятора температуры (рис. 1) [6]. Выбор такой конфигурации функциональной схемы не случаен. Как показывает анализ, одним из инерционных элементов системы является датчик температуры масла, поэтому для компенсации его постоянной времени служит пропорционально-дифференциальное (ПД) звено. Регулятор температуры, включенный в прямую цепь системы, выбран пропорционально-интегральным (ПИ) для компенсации наибольшей постоянной времени объекта управления, а именно, теплообменника, и обеспечения свойств астатичности замкнутой системы.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

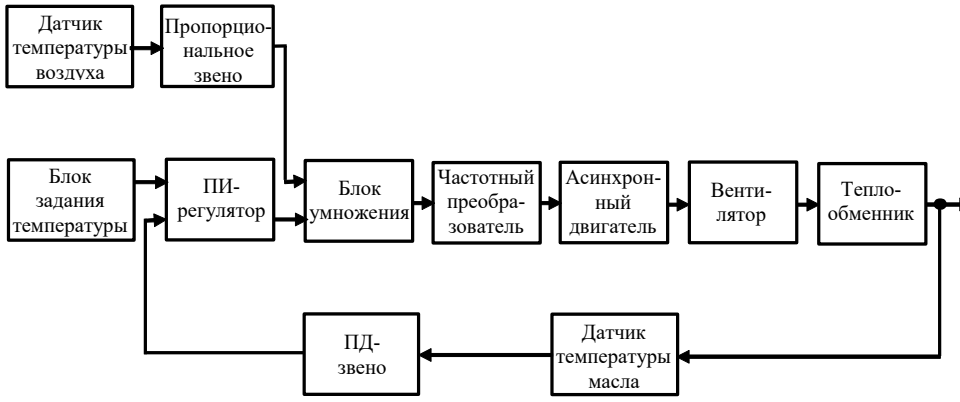


Рис. 1. Функциональная схема системы комбинированного управления АВО масла

Поскольку с увеличением температуры окружающего воздуха обобщенный коэффициент передачи АВО масла уменьшается в систему управления введено пропорциональной звено и блок умножения, которые позволяют скомпенсировать это явление в функции сигнала соответствующего датчика. В результате происходит автоматическая адаптация АВО к условиям окружающей среды.

Следует отметить, что рассматриваемая система комбинированного управления может быть реализована простейшими средствами, а именно, на частотном преобразователе, имеющем в своем составе свободные функциональные блоки, с помощью BICO-технологии программирования. Примером может служить инвертор Sinamics G120, обладающий этими компонентами и необходимой периферией (двумя аналого-цифровыми преобразователями для введения сигналов датчиков температуры). В этом частотном преобразователе имеется множительное звено среди свободных функциональных блоков и технологический ПИД-регулятор, пропорционально-дифференциальную часть которого можно переключать в цепь обратной связи. Таким образом, для технической реализации адаптивной системы управления АВО масла даже не нужен внешний программируемый контроллер, поскольку все необходимые составляющие находятся в частотном преобразователе.

III. Параметрический синтез регуляторов системы комбинированного управления аппаратом воздушного охлаждения масла

Для корректного синтеза параметров ПИ-регулятора и коэффициента передачи пропорционального звена рассмотрим структурную схему системы комбинированного управления АВО масла (рис. 2) и передаточные функции всех ее элементов.

Пропорционально-интегральный регулятор имеет передаточную функцию

$$W_{PI}(s) = -\left(k_P + \frac{1}{T_I s}\right) = -\frac{k_P T_I s + 1}{T_I s} \qquad (1)$$

где k_P и T_I – коэффициент передачи и постоянная времени пропорционально-интегрального регулятора, соответственно; s – комплексная переменная.

Знак минус в передаточной функции регулятора учитывает тот факт, что увеличение его сигнала приводит к уменьшению выходной величины системы управления.

Датчики температуры масла и воздуха представлены апериодическими звеньями

$$W_{ots}(s) = \frac{k_{ots}}{T_{ots} s + 1}; \qquad (2)$$

$$W_{ats}(s) = \frac{k_{ats}}{T_{ats} s + 1}, \qquad (3)$$

где k_{ots} и T_{ots} – коэффициент передачи и постоянная времени датчика температуры масла; k_{ats} и T_{ats} – коэффициент передачи и постоянная времени датчика температуры воздуха.

Передаточная функция ПД-звена имеет вид:

$$W_{PD}(s) = T_{PD} s + 1, \qquad (4)$$

где постоянная времени выбирается равной

$$T_{PD} = T_{ots}. \qquad (5)$$

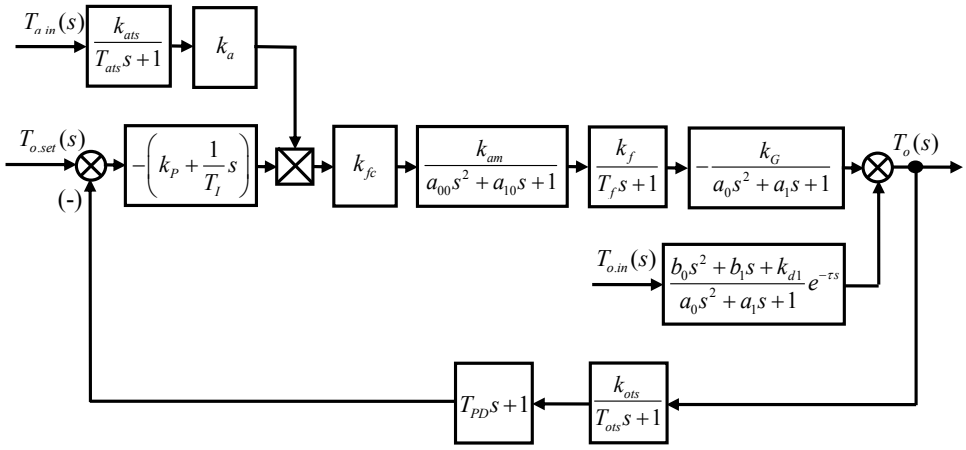


Рис. 2. Структурная схема системы управления АВО масла

На структурной схеме также изображена передаточная функция процесса теплообмена по отношению к управляющему воздействию – объемному расходу воздуха $G_a(s)$ [7]

$$W_{hep}(s)=\frac{T_o(s)}{G_a(s)}=-\frac{k_G}{a_0s^2+a_1s+1}, \qquad (6)$$

где

$$a_0=\frac{m_oC_om_pC_p}{\left(G_o\rho_oC_o+\alpha_oF_{in}\right)\left(\alpha_oF_{in}+\alpha_aF_{out}-\frac{\alpha_a^2F_{out}^2}{G_{a0}\rho_aC_a+\alpha_aF_{out}}\right)-}$$
$$-\alpha_o^2F_{in}^2$$

$$a_1=\frac{m_oC_o\left(\alpha_oF_{in}+\alpha_aF_{out}-\frac{\alpha_a^2F_{out}^2}{G_{a0}\rho_aC_a+\alpha_aF_{out}}\right)+}{+m_pC_p\left(G_o\rho_oC_o+\alpha_oF_{in}\right)};$$
$$\left(G_o\rho_oC_o+\alpha_oF_{in}\right)\left(\alpha_oF_{in}+\alpha_aF_{out}-\frac{\alpha_a^2F_{out}^2}{G_{a0}\rho_aC_a+\alpha_aF_{out}}\right)-$$
$$-\alpha_o^2F_{in}^2$$

$$k_G=\frac{\alpha_oF_{in}\alpha_aF_{out}\rho_aC_a(T_{a0}-T_{a.in0})}{\left(G_{a0}\rho_aC_a+\alpha_aF_{in}\right)\times};$$
$$\times\left[\begin{array}{l}\left(G_o\rho_oC_o+\alpha_oF_{in}\right)\left(\alpha_oF_{in}+\alpha_aF_{out}-\frac{\alpha_a^2F_{out}^2}{G_{a0}\rho_aC_a+\alpha_aF_{out}}\right)-\\-\alpha_o^2F_{in}^2\end{array}\right]$$

G_o и G_a – объемные расходы масла и воздуха; ρ_a и ρ_o – плотности воздуха и масла; m_o и m_p – массы масла и трубки теплообменника; C_a, C_o и C_p – удельные теплоемкости воздуха, масла и материла трубки теплообменника, соответственно; α_a и α_o – коэффициенты конвективного теплообмена от стенки трубки к воздуху и от масла к стенки трубки, соответственно; F_{in} и F_{out} – внутренняя и наружная площади теплообмена; T_o и T_a – средние значения температур масла и воздуха на выходе аппарата воздушного охлаждения; $T_{a.in}$ – среднее значение температуры воздуха на входе аппарата воздушного охлаждения; G_{a0}, T_{a0} and $T_{a.in0}$ – начальные условия.

Анализ корней знаменателя (6) показывает, что эту передаточную функцию можно записать в виде двойного апериодического звена [7]

$$W_{hep}(s)=\frac{T_o(s)}{G_a(s)}=-\frac{k_G}{(T_{11}p+1)(T_{22}p+1)}, \qquad (7)$$

где $T_{11}=\frac{2a_0}{a_1+\sqrt{a_1^2-4a_0}}$, $T_{22}=\frac{2a_0}{a_1-\sqrt{a_1^2-4a_0}}$, причем будем считать, что $T_{22}\ge T_{11}$.

Одним из возмущающих воздействий на систему управления АВО является изменение температуры масла $T_{o.in}$ на входе в аппарат. Передаточная функция процесса теплообмена по отношению к этому воздействию записывается следующим образом [7]

$$W_{hepd}(s)=\frac{T_o(s)}{T_{o.in}(s)}=\frac{b_0s^2+b_1s+k_{d1}}{a_0s^2+a_1s+1}e^{-\tau s}, \qquad (8)$$

где $b_0=\frac{a_0\Delta T_o(\tau)}{\Delta T_{o.in}}$; $b_1=\frac{a_1\Delta T_o(\tau)}{\Delta T_{o.in}}+\frac{a_0}{\Delta T_{o.in}}\frac{dT_o}{dt}(\tau)$;

$$k_{d1}=\frac{G_o\rho_oC_o\left(\alpha_oF_{in}+\alpha_aF_{out}-\frac{\alpha_a^2F_{out}^2}{G_{a0}\rho_aC_a+\alpha_aF_{out}}\right)}{\left(G_o\rho_oC_o+\alpha_oF_{in}\right)\left(\alpha_oF_{in}+\alpha_aF_{out}-\frac{\alpha_a^2F_{out}^2}{G_{a0}\rho_aC_a+\alpha_aF_{out}}\right)-\alpha_o^2F_{in}^2};$$

$\tau=\frac{L_p}{V_o}$ – транспортное запаздывание; L_p – длина трубки теплообменника; V_o – средняя скорость движения масла по трубопроводу.

Передаточная функция вентилятора совместно с воздуховодом представлена апериодическим звеном

$$W_f(s)=\frac{k_f}{\left(T_fs+1\right)} \qquad (9)$$

с переменными коэффициентом передачи $k_f=-\frac{(2c\omega_{00}+bG_{a0})}{2aG_{a0}+b\omega_{00}}$ и постоянной времени $T_f=-\frac{\rho_al_a}{(2aG_{a0}+b\omega_{00})S_a}$, где a, b and c – коэффициенты аэродинамической характеристики вентилятора; l_a и S_a – длина и площадь поперечного сечения воздуховода; ω_{00} – начальное значение скорости вращения вентилятора.

Передаточная функция асинхронного двигателя представлена динамическим звеном второго порядка [8]

$$W_{am}(s)=\frac{k_{am}}{a_{00}s^2+a_{10}s+1}, \qquad (10)$$

где k_{am} – коэффициент передачи двигателя по управляющему воздействию, а величины коэффициентов a_{00} и a_{10} зависят от параметров схемы замещения двигателя, частоты питающего напряжения и закона регулирования амплитуды напряжения в функции частоты.

Частотный преобразователь на структурной схеме представлен безынерционным звеном с коэффициентом передачи k_{fc}, поскольку его инерционностью по сравнению с инерционностью теплообменника можно пренебречь.

Параметры настройки пропорционально-интегрального регулятора выбираются таким образом, чтобы выполнялось равенство

$$k_PT_I=T_{22}. \qquad (11)$$

Формула (11) имеет две степени свободы. Поэтому, задаваясь величиной постоянной времени T_I, например, из соотношения

$$T_I=1,5T_{11}k_{fc}k_{am}k_fk_Gk_{ots}, \qquad (12)$$

можно найти требуемое значение k_P:

$$k_P=\frac{T_{22}}{T_I}. \qquad (13)$$

Коэффициент передачи пропорционального звена k_a выбирается исходя из разрешающей способности датчика температуры воздуха и диапазона изменения температур охлаждающего воздуха.

В соответствии с выражениями (1) – (13) посчитаны передаточные функции всех элементов адаптивной системы управления АВО масла типа 06-10 для двух режимов работы. Первый режим определяется температурой окружающего воздуха $T_{a.in0}=-30$ °С, при этом рассматриваемые передаточные функции принимают следующие численные значения:

$$W_{hep1}(s)=-\frac{1,0043}{412,1345s^2+67,2848s+1};$$

$$W_{hepd1}(s)=\frac{192,6927s^2+35,0625s+0,9861}{412,1345s^2+67,2848s+1}e^{-31,0164s};$$

$$W_{am1}(s)=\frac{1,57}{0,1101s^2+0,5939s+1};\ W_{f1}(s)=\frac{0,4042}{(1,202s+1)}.$$

Во втором режиме $T_{a.in0}=40$ °С, и передаточные функции элементов системы управления равны:

$$W_{hep2}(s)=-\frac{0,0675}{216,682s^2+40,7052s+1};$$

$$W_{hepd2}(s)=-\frac{96,9245s^2+19,7563s+0,6901}{216,682s^2+40,7052s+1}e^{-31,0164s};$$

$$W_{am2}(s)=\frac{1,557}{0,0024s^2+0,0755s+1};\ W_{f2}(s)=\frac{0,4042}{(0,024s+1)}.$$

Коэффициент передачи частотного преобразователя принципиально равен $k_{fc}=1$. Датчики температуры

характеризуются постоянными времени $T_{ots} = T_{ats} = 40$ с. Поскольку задающий сигнал в системе управления формируется в тех же величинах, что и выходная величина, то коэффициент передачи датчика температуры масла $k_{ots} = 1$.

Параметры регуляторов рассчитываются для первого режима: $T_I = 6{,}5$ с; $k_P = 9{,}3$; $T_{PD} = 58{,}8$ с. Коэффициент передачи пропорционального звена (фактически коэффициент адаптации) принят равным $k_a = 0{,}02$.

Результаты компьютерного моделирования

В соответствии с полученными передаточными функциями в программной среде «Matlab Simulink» разработана расчетная модель системы комбинированного управления АВО масла (рис. 3).

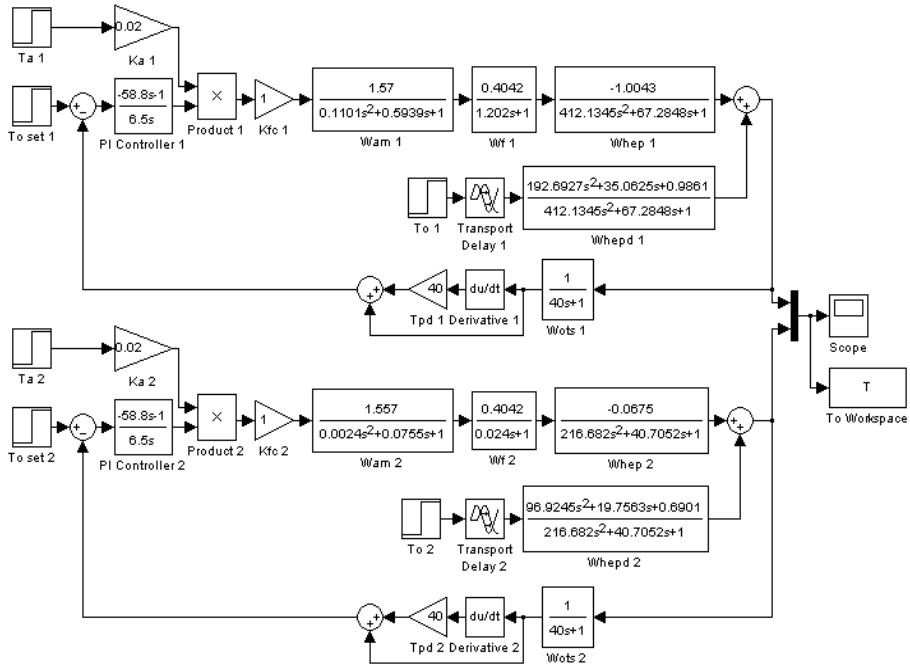


Рис. 3. Расчетная модель системы управления АВО масла для двух режимов работы

Расчетная модель позволяет провести исследование системы комбинированного управления АВО масла как по отношению к управляющему воздействию $T_{o.set}$, так и по отношению к возмущению $T_{o.in}$, с учетом вариации параметров объекта управления. Однако наибольший интерес представляет исследование процессов, протекающих при изменении температуры масла на входе в аппарат. При настройках регуляторов, выбранных для режима $T_{a.in0} = -30$ ºС, одновременно моделирование ведется и для противоположного случая, когда температура окружающего воздуха равна $T_{a.in0} = 40$ ºС.

Отсутствие на расчетной схеме инерционности датчика температуры воздуха объясняется тем, что к моменту изменения температуры масла на входе в аппарат выходной сигнал датчика имеет уже установившееся значение.

Результаты моделирования (рис. 4) показывают, что система комбинированного управления обеспечивает работоспособность АВО масла во всем возможном диапазоне изменения параметров объекта управления.

Кривая 1 соответствует температуре окружающего воздуха $T_{a.in0} = -30$ ºС, а кривая 2 – $T_{a.in0} = 40$ ºС. При этом время переходного процесса варьируется в пределах $t_r = 43{,}5 \div 53$ с (±9,8% от среднего значения), несмотря на то, что коэффициент передачи объекта управления изменяется почти в 15 раз.

Кроме того, необходимо отметить, что моделирование проведено при ступенчатом изменении температуры масла на входе в АВО, однако такой режим вряд ли возможен. Действительно, нагрев,

происходящий в гидростатических подшипниках газоперекачивающих агрегатов, является инерционным процессом. Поэтому следует ожидать, что максимальное изменение температуры масла на выходе АВО будет меньше, чем приведенное на графиках.

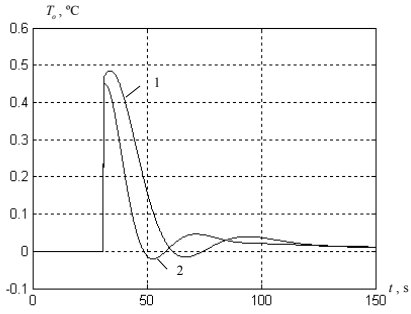


Рис. 4. Графики переходных процессов по возмущению для двух режимов работы

IV. Выводы

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Разработанная система комбинированного управления обеспечивает функционирование АВО масла во всем возможном температурном диапазоне оружающего воздуха.

2. Адаптация к изменению условий окружающей среды происходит непосредственно за счет изменения выходного сигала пропорционально-интегрального регулятора в функции температуры охлаждающего воздуха при фиксированных настройках.

3. Техническая реализация системы комбинированного управления АВО масла отличается исключительной простотой и не требует применения дополнительного программируемого контроллера.

Список литературы

[1] Россеев Н. Н. Создание энергоэффективной системы автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения масла на основе частотно-регулируемого электропривода // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2006. – 126 с.

[2] Россеев Н. Н., Кузнецов П. К., Мигачева Л. А., Семавин В. И. Оптимизация системы охлаждения масла электроприводного газоперекачивающего агрегата // Труды Второй Всероссийской научной конференции (1–3 июня 2005 г.). Часть. Моделирование и оптимизация динамических систем и систем с распределенными параметрами. Математические модели в информационных технологиях, Матем. моделирование и краев. задачи. – Самара: СамГТУ, 2005. – С. 217–219.

[3] Мигачева Л. А., Стариков А. В., Титов А. Р. Принципы построения и характеристики двухконтурной системы управления аппаратом воздушного охлаждения масла // Актуальные вопросы современной техники и технологии: Сборник докладов VII-й Международной научной конференции. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2012. – С. 137 – 143.

[4] Патент России № 2487290, МПК F16N 39/02, F04D 27/00. Система управления аппаратом воздушного охлаждения масла / С. В. Алимов, А. В. Мигачев, Л. А. Мигачева, А. В. Стариков, А. Р. Титов (Россия) // Опубл. 10.07.2013, Бюл. № 19.

[5] Патент России № 2525040, МПК F16N39/02. Система управления аппаратом воздушного охлаждения масла / С. В. Алимов, А. В. Мигачев, Л. А. Мигачева, А. В. Стариков (Россия) // Опубл. 10.08.2014, Бюл. № 22.

[6] Патент России № 2532090, МПК F16N39/02. Адаптивная система управления аппаратом воздушного охлаждения масла / А. В. Стариков (Россия) // Опубл. 27.10.2014, Бюл. № 24.

[7] Алимов С.В., Мигачева Л.А., Титов Р.А. Передаточные функции теплообмена в аппарате воздушного охлаждения масла // Вестник Самарского государственного 2технического университета. Серия «Технические науки», № 4 (36) – 2011. – Самара: СамГТУ, 2012. – С. 198 – 205.

[8] Кузнецов В. А., Мигачев А. В., Стариков А. В., Титов А. Р. Особенности математической модели асинхронного электродвигателя аппаратов воздушного охлаждения масла // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 3 (31) – 2011. – Самара: СамГТУ, 2011. – С. 171 – 179.

Совершенствование методик расчета надежности магистральных трубопроводов

Сызранцев В.Н.
Институт геологии и нефтегазодобычи Тюменский индустриальный университет (ТИУ)
Тюмень, Россия
v_syzrantsev@mail.ru

Сызранцева К.В.
Институт геологии и нефтегазодобычи Тюменский индустриальный университет(ТИУ)
Тюмень, Россия
kv.syzr@gmail.com

Abstract —The paper considers the task of calculation of strength reliability of the long distance pipe line (probabilities of failure, strength safety factor, including with corrosion defects of pipe) subjected under operating conditions to random loads: pressure and temperature. The task is solved with the help of methods of nonparametric statistics, which allow to describe random values irrespective of complexity of its distribution law. It is shown that accounting of the actual laws of stress variation in the pipe during its operation essentially changes results of calculation of its reliability in comparison with use of random variables distribution laws developed within the classical theory of parametrical statistics.

Ключевые слова — магистральные трубопроводы, прочность, случайные нагрузки, непараметрические методы статистики, вероятность отказа.

I. Характеристика проблем расчета надежности магистральных трубопроводов

В соответствии с методиками [1,2,3], конструктивная надежность участка газопровода по условиям прочности определяется в рамках физической модели «нагрузка-сопротивление» на основе условия:

$$Q \le R, \qquad (1)$$

где Q - значение параметра нагрузки; R - значение обобщенного параметра сопротивления.

В качестве основных показателей надежности участка газопровода используются вероятность его безотказной работы P_R или вероятность отказа P_O, рассчитываемые, соответственно, по выражениям:

$$P_R = \frac{1}{F_Q \cdot F_R} \int_0^\infty \left(\int_0^\infty f_R(Q+R) \cdot f_Q(Q) dQ \right) dR, \qquad (2)$$

$$P_O = \frac{1}{F_Q \cdot F_R} \int_0^\infty \left(\int_0^\infty f_Q(Q+R) \cdot f_R(R) dR \right) dQ, \qquad (3)$$

где $F_Q = \int_0^\infty f_Q(Q) dQ$, $F_R = \int_0^\infty f_R(R) dR$, $f_R(\cdot)$ - функция плотности распределения обобщенного параметра сопротивления; $f_Q(\cdot)$ - функция плотности распределения обобщенного параметра нагрузки; $S = R - Q$ - резерв несущей способности.

Решение задачи (1) в работах [1,2,3] представлено для варианта, когда случайные величины R , Q , а, следовательно, и S подчиняются нормальному закону распределения.

В качестве исходных данных обобщенного параметра нагрузки используют выборки температуры t_i, $i = \overline{1,n}$ и давлений в трубопроводе p_i, $i = \overline{1,n}$ (n -длина выборки), на основе которых рассчитывается выборка возникающих в трубе напряжений [4]:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{кцi}^2 - \sigma_{прi} \cdot \sigma_{кцi} + \sigma_{прi}^2}\ , \ i = \overline{1,n}, \qquad (4)$$

$$\sigma_{кцi} = (p_i \cdot D)/(2 \cdot \delta), \ \ \sigma_{прi} = -\alpha \cdot E \cdot t_i + \mu \cdot \sigma_{кцi},$$

где: α, μ, E - коэффициенты Пуассона и линейного расширения материала трубы, модуль его упругости; δ, D - толщина стенки и внутренний диаметр трубы.

Для обобщенного параметра сопротивления, - предельных напряжений, используется выборка значений предела прочности (предела текучести) $R_j, j = \overline{1,m}$ (m -длина выборки).

Если случайные величины σ и R подчиняются нормальному закону, то после расчета на основе выборок σ_i, $i = \overline{1,n}$ и $R_j, j = \overline{1,m}$ средних значений $\overline{\sigma}$, $\overline{R}$ и среднеквадратических отклонений s_σ , s_R , функции $f_Q(\sigma)$ и $f_R(R)$ становятся известными и расчет P_R или P_O затруднений не вызывает.

Для значений $\overline{\sigma} = 339$ МПа $s_\sigma = 8$ МПа, $\overline{R} = 400$ МПа, $s_R = 20{,}3$ МПа графическая интерпретация задачи (1) отражена на рис.1.

Полученная в результате взятия интеграла (3) величина отказа для этих данных составляет $P_O = 0{,}00259$.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

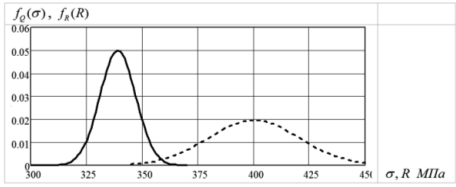


Рис. 1. Графическая интерпретация задачи (1)

В то же время, результаты обработки возникающих в трубе при эксплуатации газопровода напряжений [5,6] (обобщенный параметр нагрузки) свидетельствуют, что законы их распределения являются существенно более сложными, нежели нормальное распределение, функции плотности распределения в подавляющем большинстве случаев унимодальными и симметричными не являются. В работе [4] показано, что для описания функций плотности распределения предела текучести, предела прочности трубных сталей (обобщенный параметр сопротивления), следует использовать не только среднее значение и среднеквадратическое отклонения, но и асимметрию и эксцесс. Действующие в трубе напряжения ограничены справа величиной $\sigma_{\max}$, а предельные напряжения, - слева значением $R_{\min}$, то есть функции плотности $f_Q(\sigma)$ и $f_R(R)$ являются цензурированными, соответственно, справа и слева (рис.2).

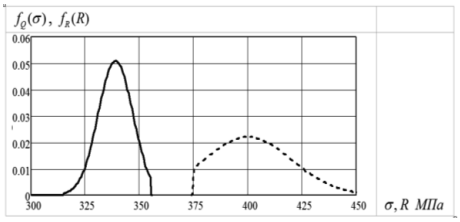


Рис. 2. Цензурированные функции плотности распределения действующих и предельных напряжений

Для цензурирования функций $f_Q(\sigma)$ и $f_R(R)$ используются зависимости:

$$f_Q^c(\sigma) = \begin{cases} f_Q(\sigma)/F_\sigma \text{ для } \sigma \le \sigma_{\max}, \\ 0 \text{ для } \sigma > \sigma_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

где $F_Q = \int_0^{\sigma_{\max}} f_Q(\sigma)d\sigma$

$$f_R^c(R) = \begin{cases} f_R(\sigma)/F_R \text{ для } R \ge R_{\min}, \\ 0 \text{ для } R < R_{\min} \end{cases} \quad (6)$$

где $F_R = \int_{R_{\min}}^{\infty} f_R(R)dR$.

Из анализа рис. 2 следует, что в данном случае величина отказа трубопровода, рассчитываемая по выражению (3), всегда будет иметь нулевое значение.

В процессе эксплуатации трубопровода в нем возникают коррозионные дефекты глубиной h и длиной l, вследствие которых действующие напряжения в трубе возрастают на величину, оцениваемую коэффициентом концентрации напряжений $\psi(h,l)$. Анализируя рис.2, нетрудно видеть, что для рассматриваемого примера пороговым значением коэффициента ψ_p, после превышения которого вероятность отказа трубопровода становится отличной от нуля, является величина, рассчитанная по выражению:

$$\psi_p = R_{\min}/\sigma_{\max}. \quad (7)$$

На основании рис.2 $\sigma_{\max} = 355$ МПа, $R_{\min} = 375$ МПа, а величина коэффициента $\psi_p = 1{,}056$. Положение функций $f_Q^c(\sigma)$ и $f_R^c(R)$ для этого случая показано на рис. 3.

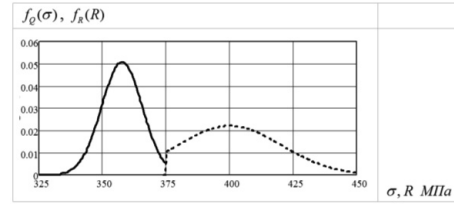


Рис. 3. Функции плотности распределения действующих и предельных напряжений при $\psi_p = 1{,}056$

На основании работы [4] коэффициент $\psi(h,l)$ рассчитывается по формуле:

$$\psi(h,l) = (h - A\cdot\delta)/[A\cdot(h-\delta)], \quad (8)$$

где $A = \sqrt{\left(\frac{0{,}893\cdot l}{\sqrt{D\cdot\delta}}\right)^2 + 1}$.

При $\psi(h,l) = \psi_p$ преобразуем зависимость (8) к виду:

$$l = \frac{\sqrt{D\cdot\delta}}{0{,}893}\sqrt{\left[\frac{h/\delta}{1-\psi_p(1-h/\delta)}\right]^2 - 1}, \quad (9)$$

на основе которой для $D = 1420$ мм, $\delta = 16{,}5$ мм рассчитаем совокупность значений глубин h и длин l дефектов, соответствующих $\psi_p = 1{,}056$, рис. 4.

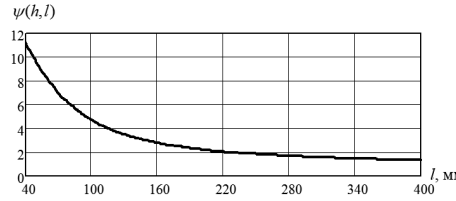


Рис. 4. Функция $\psi(h,l) = \psi_p$

В том случае, когда зафиксированные при диагностике трубопровода параметры l и h коррозионного дефекта лежат ниже кривой, показанной на рис.4, дефект является неопасным. Дефект, параметры l и h которого соответствуют кривой рис.4, является потенциально опасным. Если значения этих параметров находятся в области над кривой рис. 4, то коррозионный дефект является опасным и только для него может быть рассчитана вероятность отказа трубопровода по выражению (3) с учетом функций плотности распределения действующих и допускаемых напряжений (5) и (6), подчиняющихся цензурированным нормальным законам распределения.

Для оценки конструктивной надежности участка газопровода может быть использована и другая физическая модель «нагрузка-сопротивление», заключающаяся в определении вероятности того, что коэффициент запаса прочности n окажется меньше заданного n_p (квантильная оценка n) [5]:

$$P_n = \int_0^{n_p} f_n(n)dn, \qquad (10)$$

где $f_n(n)$- функция плотности распределения случайной величины n.

Эффективность данного подхода заключается в том, что он может быть реализован на любом этапе эксплуатации трубопровода, если функция $f_n(n)$ известна. Несмотря на то, что коэффициент запаса прочности n рассчитывается по элементарной зависимости:

$$n = R/\sigma, \qquad (11)$$

определение функции $f_n(n)$ при известных законах распределения случайных величин σ и R методами параметрической статистики возможным не представляется. Только в частном случае, когда σ и R подчиняются нормальным законам распределения (не цензурированным), функция $f_n(n)$ описывается распределением Коши, особенность которого, - невозможность определения по имеющейся выборке среднего и среднеквадратического отклонения случайной величины.

Задача настоящей работы заключается в совершенствовании методик расчета надежности магистральных трубопроводов на основе использования методов непараметрической статистики [5,7,8,9,10,11,12], позволяющей получить решение задач (1) и (10) независимо от сложности функций плотности распределения случайных величин σ и R.

II. Расчет надежности магистральных трубопроводов с использованием методов непараметрической статистики

Основой решения задачи [5,6] являются зафиксированные в процессе эксплуатации трубопровода выборки случайных величин: температуры t_i, $i=\overline{1,n}$ и давлений в трубопроводе p_i, $i=\overline{1,n}$, используя которые, при известных параметрах трубы и физических характеристик ее материала, по зависимостям (4) определяется выборка возникающих в трубе напряжений σ_i, $i=\overline{1,n}$. На рис.5 показана гистограмма давлений в трубопроводе ($D=1420$ мм, $\delta=20{,}0$ мм) на выходе компрессорной станции газопровода, а на рис.6 гистограмма температуры, полученные путем обработки ежедневно фиксируемых в течение года (n=364) значений $p_{i,}\ t_i$, $i=\overline{1,n}$.

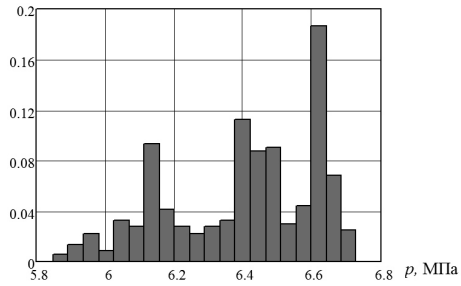


Рис. 5. Гистограмма давлений в трубопроводе

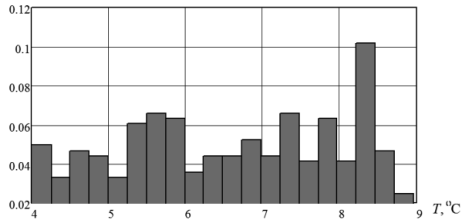


Рис. 6. Гистограмма температуры в трубопроводе

Гистограмма распределения напряжений, возникающих в стенке трубы при эксплуатации газопровода, отражена на рис. 7.

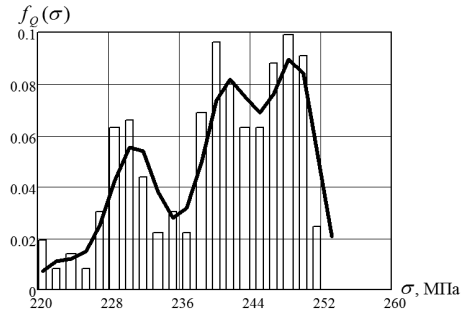


Рис. 7. Гистограмма напряжений в трубе при эксплуатации газопровода и функция плотности их распределения $f_Q(\sigma)$

Из анализа гистограммы рис. 7, следует, что функция плотности распределения действующих напряжений $f_Q(\sigma)$ законами, предложенными и исследованными в рамках классической параметрической статистики, описана быть не может. Для определения функции $f_Q(\sigma)$ воспользуемся методами непараметрической статистики [6,11,12]. Основой этих методов является восстановление неизвестной функция плотности распределения $f_Q(\sigma)$ случайной величины σ, заданной выборкой длины n ее значений σ_i, $i=\overline{1,n}$, в виде разложения (оценка Парзена–Розенблатта [5,8] с нормальным ядром):

$$f_Q(\sigma)=\frac{1}{nh_\sigma\sqrt{2\pi}}\sum_{i=1}^{n}\exp\left[\frac{-1}{2}\left(\frac{\sigma-\sigma_i}{h_\sigma}\right)^2\right]\cdot\frac{1}{F_\sigma}, \qquad (12)$$

где $F_\sigma=\frac{1}{nh_\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}}\sum_{i=1}^{n}\exp\left[-0{,}5\left(\frac{\sigma-\sigma_i}{h_\sigma}\right)^2\right]d\sigma$,

$\sigma_{\min}=\min_i\{\sigma_i\}$, $\sigma_{\max}=\max_i\{\sigma_i\}$.

Входящий в формулу (12) параметр размытости h_σ (ширина окна Парзена-Розенблатта) соответствует максимуму информационного функционала [5,6,8]:

$$\max_{h_\sigma} J=\int\ln[K(\sigma)]f_Q(\sigma)d\sigma, \qquad (13)$$

где $K(\sigma)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma-\sigma_i}{h_\sigma}\right)^2\right]$, - ядро;

$$J=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\ln\left[\frac{1}{(n-1)h_\sigma}\sum_{j\neq i}^{n-1}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\left(\frac{\sigma_i-\sigma_j}{4h_\sigma}\right)^2\right)\right].$$

Известно [6,8], что близкое к оптимальному (h_σ^*) значение параметра размытости h_σ, соответствующее максимуму функционала J (13), рассчитывается по зависимости:

$$h_\sigma^*=D_n\cdot n^{-1/5}, \qquad (14)$$

где D_n - выборочная дисперсия, на основе имеющейся выборки значений σ_i, $i=\overline{1,n}$ вычисляется по выражению:

$$D_n=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(\sigma_i-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sigma_i\right)^2}.$$

В результате функция плотности распределения действующих в газопроводе напряжений $f_Q(\sigma)$ описывается формулами (12) при замене в них h_σ на h_σ^*, величина которого определена по зависимости (14). Реализация описанной процедуры позволяет восстановить неизвестную функцию $f_Q(\sigma)$ независимо от ее сложности. Эта функция на рис. 7 показана в виде линии, при этом $\sigma_{\max}=253{,}3$ МПа.

Для допускаемых напряжений (сталь 17ГС [4]) воспользуемся нормальным законом, параметры которого $\bar{R}=359$ МПа, $s_R=19{,}8$ МПа, цензурированного слева величиной $R_{\min}=335$ МПа. Функции плотности $f_Q(\sigma)$ и $f_R(R)$ случайных величин σ и R для этого случая показаны на рис.8.

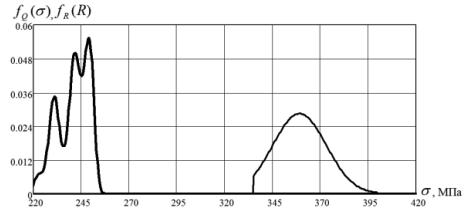


Рис. 8. Функции плотности распределения действующих $f_Q(\sigma)$ и предельных $f_R(R)$ напряжений

Из анализа рис. 8 следует, что величина отказа газопровода, рассчитанная по выражению (3), для данного случая даст нулевое значение.

Для определения потенциально опасных величин коррозионных дефектов газопровода, используя зависимость (8), рассчитаем величину коэффициента $\psi_p=1{,}322$ и на основе формулы (9) при $D=1420$ мм, $\delta=20$, мм установим значения глубин h и длин l дефектов, соответствующих $\psi_p=1{,}322$, рис. 9.

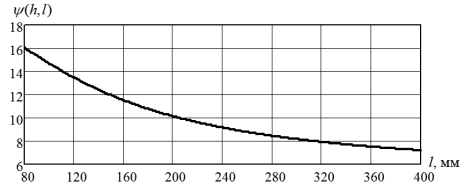


Рис. 9. Функция $\psi(h,l)=\psi_p=1{,}322$

В том случае, когда зафиксированные при диагностике газопровода параметры l и h коррозионного дефекта лежат ниже кривой, показанной на рис.9, вероятность отказа исследуемого участка газопровода по условиям прочности на основе условия (3) рассчитана быть не может. Чтобы оценить конструктивную надежность газопровода для коррозионных дефектов, параметры которых лежат ниже кривой рис.9, воспользуемся расчетом вероятности того,

что коэффициент запаса прочности n окажется меньше заданного n_p (10).

Имея выборки σ_i, R_i, $i=\overline{1,m=364}$, по формуле (11) рассчитаем выборку случайной величины коэффициента запаса прочности: $n_i = R_i/\sigma_i, i=\overline{1,m}$ и, используя оценки Парзена-Розенблатта для ядерной функции с нормальным ядром, восстановим неизвестную функцию $f_n(n)$ плотности распределения коэффициента запаса:

$$f_n(n)=\frac{1}{mh_n^*\sqrt{2\pi}}\sum_{i=1}^{m}\exp\left[\frac{-1}{2}\left(\frac{n-n_i}{h_n^*}\right)^2\right]\cdot\frac{1}{F_n}, \qquad (15)$$

где: $F_n=\frac{1}{mh_n^*\sqrt{2\pi}}\int_{n_{\min}}^{n_{\max}}\sum_{i=1}^{m}\exp\left[-0{,}5\left(\frac{n-n_i}{h_n^*}\right)^2\right]dn$;

$n_{\min}=\min_i\{n_i\}$; $n_{\max}=\max_i\{n_i\}$; $h_n^*=D_n^*\cdot m^{-1/5}$;

$D_n^*=\sqrt{\frac{1}{m-1}\sum_{i=1}^{m}\left(n_i-\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}n_i\right)^2}$.

В результате расчета по зависимости (10) величины P_n для $n_p=1{,}2$ новой трубы, при условии восстановления функции $f_n(n)$ на основе наихудшего сочетания действующих и предельных напряжений, получено значение: $P_n=2\cdot10^{-5}$.

Зададимся параметрами коррозионного дефекта $h=6$ мм и $l=150$ мм (ниже кривой на рис.9). По формуле (8) рассчитаем $\psi_p=1{,}09307$. Повторяя описанную процедуру для выборок $\sigma_i\cdot\psi_p$; R_i ; $i=\overline{1,m=364}$ определим новую функцию $f_n(n)$, - рис.10, на основе которой рассчитанная по формуле (10) величина $P_n=0{,}07772$.

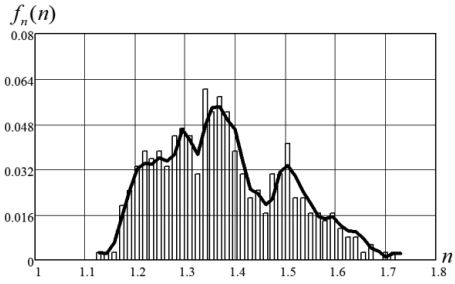


Рис. 10.Функция $f_n(n)$, труба с коррозионным дефектом

График функции $\psi(h,l)=\psi_p=1{,}09307$, соответствующий $P_n=0{,}07772$, представлен на рис.11.

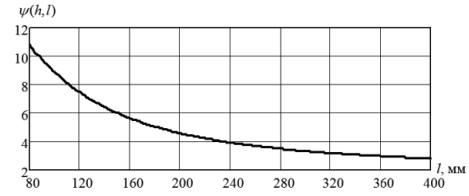


Рис. 11.Функция $\psi(h,l)$ для $P_n=0{,}07772$

III. Заключение

Рассмотрен математический аппарат, позволяющий при определении отказа газопровода по прочности учесть фактические законы распределения действующих и предельных напряжений независимо от их сложности. Показано, что использование квантильных значений коэффициента запаса прочности позволяет оценить надежность газопровода, осложненного коррозионными дефектами, на любом этапе его эксплуатации.

Список литературы

[1] СТО Газпром 2-2.3-184-2007. Методика по расчету и обоснованию коэффициента запаса прочности и устойчивости магистральных газопроводов на стадии эксплуатации и технического обслуживания. Введен с 14.05.2008.

[2] Махутов Н.А.,Пермяков В.Н. Ресурс безопасной эксплуатации сосоудов и трубопроводов. –Новосибирск: Наука, 2005. – 516 с.

[3] Харионовский В.В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов. – М.: Недра, 2000. -467 с.

[4] Бирилло И.Н., Яковлев А.Я., Теплинский Ю.А., Быков И.Ю., Воронин. В.Н. Оценка прочностного ресурса газопроводных труб с коррозионными повреждениями.– М: Изд.ЦентрЛитНефтеГаз. – 2008. – 168 с.

[5] Сызранцев В.Н. , В.В.Новоселов, П.М.Созонов, С.Л.Голофаст. Оценка безопасности и прочностной надежности магистральных трубопроводов методами непараметрической статистики. – Новосибирск: Наука, 2013. – 172 с.

[6] Сызранцев В.Н., Я.П.Невелев, С.Л.Голофаст. Расчет прочностной надежности изделий на основе методов непараметрической статистики. –Новосибирск: Наука, 2008. – 218 с.

[7] Орлов А.И. Прикладная статистика: Учебник. – М.: Экзамен,2004. -656 с.

[8] Симахин В.А. Непараметрическая статистика. –Курган: Изд-во Курган. ун-та, 2004. –Ч.1: Теория оценок. – 207 с.

[9] Вапник В.Н. Алгоритмы и программы восстановления зависимостей. М.: Наука, 1984. -816 с.

[10] Нероденко, Д.Г., Сызранцева К.В. Расчет прочностной надежности элементов технологических трубопроводов методами непараметрической статистики // Нефтяное хозяйство. – 2012. – №6. – С. 94-96.

[11] Syzrantseva K., Syzrantsev V. Reliability estimation of machine parts with complicated geometry on a base of methods of nonparametric statistics.-Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol.11. – Iss.2. – Pp. 204-209.

[12] Syzrantseva K., Syzrantsev V. Determination of parameters of endurance limit distribution law of material by the methods of nonparametric statistics and kinetic theory of high-cycle fatigue.- Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 736. – Pp. 52-57.

Моделирование тепловых режимов линейной индукционной машины в Matlab

Тарчуткин Н.В.
Кафедра электротехники и электротехнологических систем Уральский Федеральный Университет
Екатеринбург, Россия
nik_tar@mail.ru

Смольянов И.А.
Кафедра электротехники и электротехнологических систем Уральский Федеральный Университет
Екатеринбург, Россия
i.a.smolyanov@gmail.com

Шмаков Е.И.
Кафедра электротехники и электротехнологических систем Уральский Федеральный Университет
Екатеринбург, Россия
shmakovz@mail.ru

***Abstract*—This article examines the thermal characteristics for different modes of operation of a linear induction machine using the method of detailed equivalent circuits. The calculation of these thermal characteristics is performed by using a two-dimensional weakly coupled plane-parallel problem in the Matlab application package. This model allows to take into account the nonlinear properties of ferromagnetic materials (steel saturation). The thermal problem (calculation of the Joule loss) is formulated as the Transient formulation. The object of mathematical modeling is a real laboratory setup.**

Ключевые слова —детализированные тепловые схемы замещения, Matlab, линейная индукционная машина.

I. Введение

Существует несколько типов моделей, применяемых для исследования линейной индукционной машины (ЛИМ). Можно выделить два типамоделей, достаточно корректно учитывающих продольный краевой эффект [1]:

- двух- и трехмерные модели с расчетом магнитного поля методами конечных разностей или конечных элементов на каждом временном шаге [2, 3]. Они слабо ориентированы на синтез системы автоматического управления, требуют больших вычислительных ресурсов, отличаются сложностью учета индуцированных токов в массивных элементах;
- модели, основанные на детализированных схемах замещения. Они сводят задачу к расчету цепи, параметры которой интегрально представляют участки конструкции при моделировании устройства [4]. Такие модели могут быть успешно применены для синтеза систем автоматического управления и для исследования переходных процессов в электромеханической системе.

В качестве основного недостатка, присущего многомерным моделям, базирующимся на теории поля, стоит выделить их сложность и громоздкость, из-за чего для осуществления расчетов необходимы ЭВМ с большими памятью и быстродействием. При использовании схем замещения электрическая машина представляется совокупностью магнитных и электрических цепей, которые хорошо сочетаются с моделями внешних цепей [1]. Также преимуществомтакого подхода является большая гибкость в обеспечении необходимой подробности представления элементов конструкции машин.

В данной работе развиваются математические модели, основанные на детализированных схемах замещения с распределенными и сосредоточенными параметрами.

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

II. Формулировка проблемы

В работе произведен тепловой расчет линейного асинхронного двигателя с использованием детализированных схем замещения в пакете Matlab. В качестве исходных данных были приняты размеры двигателя и результаты расчетов магнитной задачи (таблица 1).

ТАБЛИЦА I. Исходные данные

Описание	Единица измерения	Значение
Длина индуктора	м	0,780
Длина ВЭ	м	0,780
Число витков в пазу	-	100
Число пазов	-	60
Толщина индуктора	м	0,05
Ширина индуктора	м	0,12
Ширина ВЭ	м	0,122
Высота прямоугольного паза	м	0,039
Ширина прямоугольного паза	м	0,008
Ширина зубца	м	0,005
Толщина сердечника ВЭ	м	0,2
Толщина высокопроводящего слоя ВЭ	м	0,002
Частота сети	Гц	50
Тяговое усилие	Н	174,388
Подведенная активная мощность	Вт	1907
Потери в индукторе	Вт	413,813

Начальная температура принимается равной 20°C. Расчетное значение скольжения равно 0,8. Производятся измерения лобовых и пазовых частей обмоток, стали индуктора и вторичного элемента (ВЭ).

В данной работе производится сравнение результатов тепловых расчетов при различных точностях разбиения модели: в первом случае ЛИМ состоит из 80 элементов, во второй случае модель упрощается до 16-элементной, причем учитывается только активная часть ВЭ, а в третьем случае каждая часть ЛИМ представлена в виде одного элемента, и модель состоит из 4 элементов.

III. Математическая модель

Для осуществления расчета тепловой задачи методом детализированных схем замещения установка была разделена на 80 элементов, после чего была записана система дифференциальных уравнений теплового баланса. Принцип разбиения модели показан на рисунке 1. Все тепловые массы связаны между собой посредством теплопроводностей, а также учитывается теплоотдача в воздух. Такая модель позволяет учитывать неравномерность нагрева установки по длине.

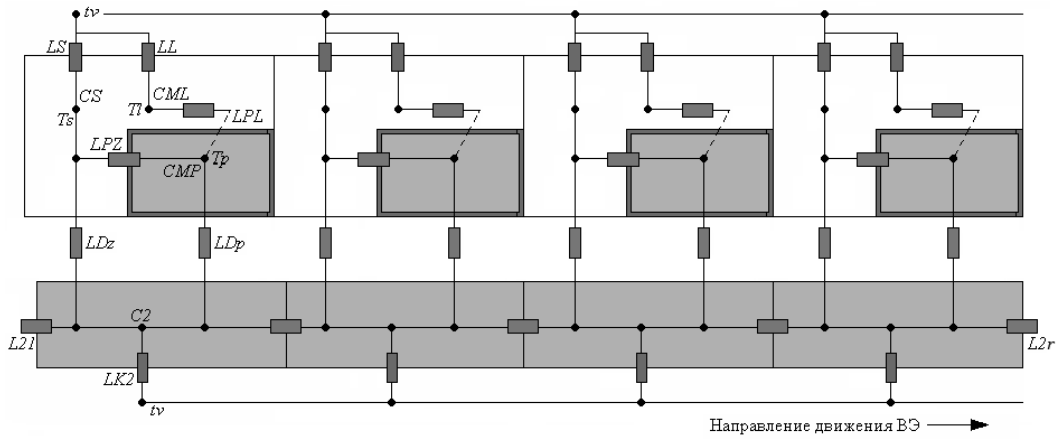


Рис. 1. Часть тепловой схемы замещения ЛИМ

Система дифференциальных уравнений теплового баланса состоит из двух типов уравнений [5]. Первый тип уравнений определяет температуры элементов активной части установки. Ниже представлен пример таких уравнений для элемента каждой из частей ЛИМ:

$$\frac{dT_{15}}{dt} = (-(LDp + LDz) * T_{15} - c1 * \left(\frac{273 + T_{15}}{100}\right)^4 + \\ + LDz * T_{18} + c1z * \left(\frac{273 + T_{18}}{100}\right)^4 + \\ + LDp * T_{17} + c1p * \left(\frac{273 + T_{17}}{100}\right)^4 + \\ + LK2 * tv + PR) * \frac{1}{C2} - (A + C) * T_{15} \\ + A * T_{14} + C * T_{19}; \quad (1)$$

$$\frac{dT_{16}}{dt} = (-(LPL + LL) * T_{16} + LPL * T_{17} + PL + \\ + LL * tv) * \frac{1}{CML}; \quad (2)$$

$$\frac{dT_{17}}{dt} = (-(LPL + LPZ + LDp) * T_{17} - \\ - c1p * \left(\frac{273 + T_{17}}{100}\right)^4 + LPL * T_{16} + \\ + LPZ * T_{18} + LDp * T_{15} + \\ + c1p * \left(\frac{273 + T_{15}}{100}\right)^4 + PP) * \frac{1}{CMP}; \quad (3)$$

$$\frac{dT_{18}}{dt} = (-(LPZ + LS + LDz) * T_{18} - \\ - c1z * \left(\frac{273 + T_{18}}{100}\right)^4 + LPZ * T_{17} + \\ + LS * tv + LDz * T_{15} + c1z * \left(\frac{273 + T_{15}}{100}\right)^4 + \\ + PS) * \frac{1}{CS}, \quad (4)$$

где $T_{15}, T_{16}, T_{17}, T_{18}$– температуры участков ВЭ, лобовой части обмоток, пазовой части обмоток и сердечника индуктора соответственно; T_{14}, T_{19} – температуры элементов ВЭ, граничащих с элементом 15; tv – температура воздуха; $C2, CML, CMP, CS$ – тепловые массы участков ВЭ, лобовой части обмоток, пазовой части обмоток и сердечника индуктора соответственно; LDp, LDz, LPL, LPZ – тепловые проводимости между участком ВЭ и пазовыми частями обмотки индуктора, между участком ВЭ и лобовыми частями обмотки индуктора, между выделенными участками пазовых и лобовых частей обмотки, между пазовыми частями обмотки индуктора и сердечником индуктора; $LL, LS, LK2$ – теплоотдача участков лобовой части обмотки индуктора, сердечника индуктора и ВЭ в воздух; PR, PL, PP, PS – потери мощности в участках ВЭ, лобовых частей обмотки индуктора, в меди пазов и в стали сердечника соответственно.

Второй тип определяет производные температур элементов пассивной части ВЭ и записывается следующим образом:

$$\frac{dT_i}{dt} = A * T_{i-1} - B * T_i + C * T_{i+1} + D, \quad (5)$$

где T_i – температура *i*-го элемента; *A*, *B*, *C*, *D* – коэффициенты для учета теплообмена между соседними элементами ВЭ, а также теплоотдачи в окружающую среду.

Тепло воВЭ выделяется в связи с индукционным нагревом и в обмотках из-за протекания по ним электрического тока.

При расчете 16- и 4-элементными способами ведется учет только активной части установки, длина ВЭ принимается равной длине индуктора. В остальном методика расчета совпадает с описанной ранее.

На данный момент в Matlab представлено несколько функций, предназначенных для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). В таблице 2 приводится сравнение этих функций.Каждая из представленных в таблице функций в качестве входных данных принимает вектор-функцию для вычисления производных температур элементов схемы замещения, интервал времени, на котором производится расчет, вектор начальных условий системы и дополнительные параметры.

ТАБЛИЦА II. ФУНКЦИИ MATLAB ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОДУ

Название функции	Реализуемый метод	Применение
ode45	одношаговые явные методы Рунге-Кутта 4-го и 5-го порядка	Стандартный метод, дающий вполне хорошие результаты, им стоит воспользоваться в первую очередь
ode23	одношаговые явные методы Рунге-Кутта 2-го и 3-го порядка	Решение задач с небольшой жесткостью, когда требуется получить решение с невысокой степенью точности
ode113	многошаговый метод Адамса-Башворта-Мултона переменного порядка	Решение нежестких задач с высокой точностью
ode15s	многошаговый метод переменного порядка (от 1-го до 5-го, по умолчанию 5), использующий формулы численного дифференцирования	Решение жестких систем
ode23s	одношаговый метод, использующий модифицированную формулу Розенброка 2-го порядка	Решение жестких задач с невысокой точностью
ode23t	метод трапеций с интерполяцией	Предпочтительнее, чем ode15s, если проблема только умеренно жесткая, и требуется получить решение без численного демпфирования
ode23tb	неявный метод Рунге-Кутта в начале решения и метод, использующий формулы обратного дифференцирования 2-го порядка в последующем	Более эффективен, чем ode15s, для проблем с грубыми допусками

Под жесткой системой ДУ понимают такую систему ДУ, численное решение которой явными методами (например, методами Рунге — Кутта или Адамса) является неудовлетворительным из-за резкого увеличения числа вычислений (при малом шаге интегрирования) или из-за резкого возрастания погрешности (так называемого, взрыва погрешности) при недостаточно малом шаге. Для жёстких систем характерно то, что для них неявные методы дают лучший результат, обычно несравненно более хороший, чем явные методы.

Сравнение расчетов ЛИМ с использованием различных решателей было произведено в [6]. В данной работе расчет тепловой задачи в Matlab осуществлен с помощью решателей ode45, основанного на явном методе Рунге-Кутта 4-го и 5-го порядков, и ode15s на основе многошагового метода переменного порядка.

IV. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунках 2 и 3 представлены графики изменения температуры элементов ЛИМ для различных точностей разбиения модели. Для сравнения конечных значений температур данные сведены в таблицу 3. Для 80- и 16-элементой схемы приводится среднее арифметическое значение для температуры каждого элемента модели.

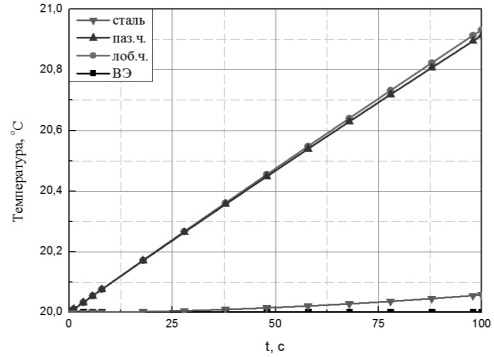


Рис. 2. Температуры элементов с учетом пассивной части ВЭ

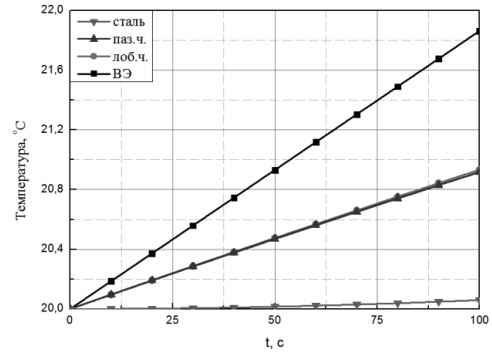


Рис. 3. Температуры элементов без учета пассивной части ВЭ

ТАБЛИЦА III. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ КРАТКОВРЕМЕННОГО НАГРЕВА ЭЛЕМЕНТОВ ЛИМ

Число элементов	Температура элементов в момент времени 100 с, °C			
	T1 (ВЭ)	*T2 (лобовая часть обмоток)*	*T3 (пазовая часть обмоток)*	*T4 (сталь индуктора)*
80	20,0029	20,9323	20,9134	20,0578
16	21,8640	20,9330	20,9172	20,0608
4	21,8640	20,9337	20,9179	20,0597

На основании представленных данных можно заключить, что учет наличия пассивной части ВЭ оказывает заметное влияние на температуру ВЭ, в то время как различие температур в остальных элементах при небольшом времени работы невелико.

Для определения установившегося значения температуры элементов при длительной работе машины увеличим расчетное время до 10800 секунд (3 часов). Конечные значения температур сведены в таблицу 4.

В данном случае из-за постоянно растущей температуры активной части ВЭ в случаях 16- и 4-элементной схем значения температур других элементов начинают заметно отличаться от соответствующих температур в 80-элементной схеме.

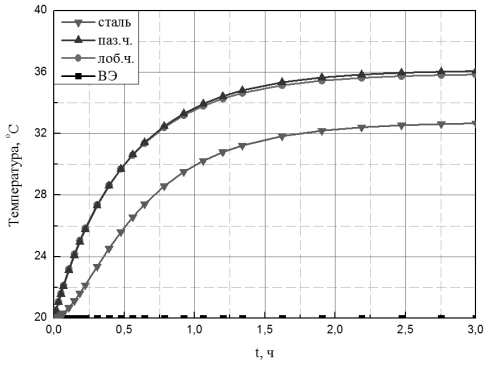


Рис. 4. Температуры элементов с учетом пассивной части ВЭ при длительной работе ЛИМ

ТАБЛИЦА IV. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ДЛИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА ЭЛЕМЕНТОВ ЛИМ

Число элементов	**Температура элементов в момент времени 10800 с, °С**			
	T1 (ВЭ)	***T2 (лобовая часть обмоток)***	***T3 (пазовая часть обмоток)***	***T4 (сталь индуктора)***
80	20,0029	35,8471	36,0721	32,6713
16	206,0776	42,9081	44,6697	45,9394
4	206,0776	42,9081	44,6697	45,9394

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно сделать вывод о возможности применять упрощенную модель установки при необходимости измерения температуры индуктора, но только при небольших значениях времени работы ЛИМ. Для расчета длительных режимов работы необходимо использовать подробную модель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Иванушкин В.А., Сарапулов Ф.Н., Шымчак П. Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов. – Щецин: ЩТУ, 2000.–310с.

[2] Насар С. А., Дел Сид. Тяговые и подъемные усилия, развиваемые односторонним асинхронным линейным двигателем, для высокоскоростного наземного транспорта. // Наземный транспорт 80-х годов. -М.: Мир, 1974. - С. 163−169.

[3] A.V.Bichkov, S.F.Sarapulov, B.A.Sokunov, “Electromagnetic transporting and mixing of liquid metals,” ISTC UEES-01, Szczecin, 04.09-07.09.01.

[4] Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. М.: Энергоатомиздат, 1991. –256 с.

[5] Сарапулов Ф. Н., Сарапулов С. Ф., Родионов И. Е. [и др.] Моделирование тепловых режимов тягового линейного асинхронного двигателя // Труды Международной шестнадцатой научно-технической конференции "Электроприводы переменного тока", [г. Екатеринбург], 05-09 октября 2015 г. — Екатеринбург: [УрФУ], 2015. — С. 141-144.

[6] N.V.Tarchutkin, I.A.Smolyanov, E.I.Shmakov, F.N.Sarapulov, “A Novel Approach of Solving Thermal Problems for Application of Electrical Engineering,” Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. редактор / S. Shaposhnikov. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. стр. 1108-1109

Блочный синтез системы слежения для беспилотного летательного аппарата при действии неконтролируемых возмущений

Уткин А.В.
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
г. Москва, Россия
utkin-av@rambler.ru

Кокунько Ю.Г.
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
г. Москва, Россия
juliakokunko@gmail.com

Краснов Д.В.
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
г. Москва, Россия
dim93kr@mail.ru

***Abstract* — The law of combined control with nonlinear stabilizing component in the form of sigma-function is designed for the control system of the center of mass of an unmanned aerial vehicle under the action of external uncontrolled disturbances. This law provides invariance to external disturbances and tracking with a given accuracy of generalized coordinates to reference signals. The original method of synthesis of the observer of the lowered order for an estimation of the generalized velocities on measurements of the generalized coordinates with piecewise linear corrective actions is developed.**

Ключевые слова — беспилотный летательный аппарат, слежение, внешние возмущения, наблюдатель состояния пониженного порядка, сигма-функция

I. Введение

Разработка систем автоматического управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) является одним из наиболее перспективных направлений современной военной и гражданской авиации. В большинстве работ, посвященных управлению БПЛА по обратной связи, предполагается, что все переменные состояния измеряются, а внешние возмущения или отсутствуют, или порождаются автономными динамическими моделями [1, 2]. Однако при выходе из строя датчиков или существенном изменении в процессе эксплуатации внешних возмущений, не учтенных в расширенной модели, система управления теряет работоспособность, что может привести к аварийной ситуации.

В данной работе рассматривается проблема синтеза системы слежения для БПЛА в условиях неполных измерений и действия внешних неконтролируемых возмущений. В качестве математической модели объекта управления рассматриваются уравнения пространственного движения центра масс БПЛА, которые описываются нелинейной динамической системой шестого порядка в траекторной системе координат [3]. В качестве управляющих воздействий рассматриваются вектор перегрузки и угол крена, к которым предъявляются требования гладкости и ограниченности. Ставится задача синтеза закона управления в форме динамической обратной связи, обеспечивающего отслеживание с заданной точностью выходными переменными (обобщенными координатами) заданных сигналов, определяющих заданную траекторию пространственного движения центра масс БПЛА. Задающие воздействия и их производные порождаются автономной динамической моделью. Генератор внешних возмущений (неучтенных в модели объекта сил) в построения не вводится. Возмущения являются согласованными и полагаются неизвестными, ограниченными функциями времени.

Во втором разделе в рамках блочного подхода [4–7] математическая модель объекта управления с помощью невырожденных замен переменных представлена в эквивалентной блочной форме вход – выход относительно ошибок слежения с замкнутыми линейными локальными связями. В терминах этой формы синтезирован базовый закон комбинированного управления с компенсирующей и стабилизирующей составляющими. Компенсирующая составляющая служит для компенсации известных сигналов. Стабилизирующая часть служит для подавления внешних возмущений и выбирается в виде нелинейных, гладких и всюду ограниченных S-образных сигма функций [6, 8]. Показано, что в следящей системе выбором параметров регулятора обеспечивается ε-инвариантность к внешним возмущениям.

Для реализации базового закона управления требуется измерение обобщенных координат и скоростей, задающих воздействий и их производных до второго порядка включительно. В разделе 3 разработан наблюдатель пониженного порядка для оценивания обобщенных скоростей по измерениям обобщенных координат, который выполняет функцию аналитического резервирования измерительных приборов и служит для повышения надежности системы управления и обеспечения ее работоспособности при выходе их строя датчиков скорости. В отличие от стандартных наблюдателей пониженного порядка [9], где отбрасывается динамика измеряемых переменных, в данном случае, наоборот, отбрасываются динамические уравнения неизмеряемых переменных. В системе, записанной относительно ошибок наблюдения, обобщенные скорости трактуются как внешние ограниченные возмущения. Их оценкой служат корректирующие воздействия наблюдателя, сформированные в виде ограниченных, кусочно-линейных функций от измеряемых ошибок наблюдения [5, 7, 10]. В разделе 4 представлены результаты моделирования, подтверждающие эффективность разработанных алгоритмов синтеза динамической обратной связи в системе слежения БПЛА.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (18-01-00846А)

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

II. Решение задачи слежения

Рассматривается пространственное движение центра масс БПЛА, которое описывается нелинейной динамической системой шестого порядка с использованием траекторной системы координат [3]:

$$\begin{aligned}&\dot L = V\cos\vartheta\cos\psi,\ \dot H = V\sin\vartheta,\ \dot Z = -V\cos\vartheta\sin\psi;\\&\dot V = (u_1-\sin\vartheta)g+\eta_1(t),\\&\dot\vartheta = \frac{(u_2-\cos\vartheta)g}{V}+\eta_2(t),\ \dot\psi = -\frac{gu_3}{V\cos\vartheta}+\eta_3(t),\end{aligned}\qquad(1)$$

где L – продольная дальность, H – высота, Z – боковое смещение, V – путевая скорость, ϑ – угол наклона траектории, ψ – угол курса; g – ускорение свободного падения; $u_1 = n_x$, $u_2 = n_y\cos\gamma$, $u_3 = n_y\sin\gamma$ – управляющие воздействия, выраженные через продольную n_x и поперечную n_y перегрузки, а также угол крена γ вектора перегрузки, $|\gamma|<\pi$; $\eta_1 = \mathrm{col}(\eta_1,\eta_2,\eta_3)$ – вектор внешних возмущений, которые полагаются неизвестными функциями времени, ограниченными известными константами: $|\eta_i(t)|\le N_i\ \forall t\ge 0, i=\overline{1,3}$.

Введем обозначения для обобщенных координат (выходных переменных) системы (1): $y_{11}=L$, $y_{12}=H$, $y_{13}=Z$. Учитывая, что в режиме полета $V(t)>0$, $|\vartheta(t)|<\pi/2$, $|\psi(t)|<\pi$, выполним диффеоморфную замену локальных координат

$$y_{21} = V\cos\vartheta\cos\psi,\ y_{22} = V\sin\vartheta,\ y_{23} = -V\cos\vartheta\sin\psi\qquad(2)$$

и представим систему (1) в каноническом виде:

$$\dot y_1 = y_2,\ \dot y_2 = f(g)+C(V,\vartheta,\psi)\eta(t)+B(\vartheta,\psi)u,\qquad(3)$$

где $\det B\equiv g^3\ne 0$,

$$f=\begin{pmatrix}0\\-g\\0\end{pmatrix},\ B=g\begin{pmatrix}\cos\vartheta\cos\psi & -\sin\vartheta\cos\psi & \sin\psi\\ \sin\vartheta & \cos\vartheta & 0\\ -\cos\vartheta\sin\psi & \sin\vartheta\sin\psi & \cos\psi\end{pmatrix},$$

$$C=\begin{pmatrix}\cos\vartheta\cos\psi & -V\sin\vartheta\cos\psi & -V\cos\vartheta\sin\psi\\ \sin\vartheta & V\cos\vartheta & 0\\ -\cos\vartheta\sin\psi & V\sin\vartheta\sin\psi & -V\cos\vartheta\cos\psi\end{pmatrix},$$

$$\begin{aligned}&|y_{ji}(t)|\le Y_{ji}, j=1,2, |\dot y_{2i}(t)|\le \overline{Y}_{2i},\\&|u_i(t)|\le U_i, |\dot u_i(t)|\le \overline{U}_i\ \forall t\ge 0, i=\overline{1,3},\end{aligned}\qquad(4)$$

ограничения (4) являются проектными.

Для системы (3) ставится задача слежения для выходных переменных $y_1(t)=\mathrm{col}(y_{11},y_{12},y_{13})$ за заданными сигналами $y_{1d}(t)=\mathrm{col}(y_{11d},y_{12d},y_{13d})$ с заданной точностью

$$|y_{1i}-y_{1id}|\le\delta_i\ \forall t>T>0, i=\overline{1,3},\qquad(5)$$

что обеспечивает вывод центра масс БПЛА на заданную пространственную траекторию и его движение в малой окрестности данной кривой. Переменные $y_{1id}(t)$, $\dot y_{1id}(t)$, $\ddot y_{1id}(t)$ являются известными функциями времени. Для синтеза системы слежения используем блочный подход [4–7] и путем невырожденной замены переменных

$$e_1 = y_1-y_{1d},\ e_2 = y_2-\dot y_{1d}+K_1e_1,\qquad(6)$$

где $e_j=\mathrm{col}(e_{j1},e_{j2},e_{j3}), j=1,2$, $K_1=\mathrm{diag}(k_{1i})$, $k_{1i}=\mathrm{const}>0$, $i=\overline{1,3}$, представим систему (3) в виде блочной формы вход–выход в ошибках слежения e_1:

$$\begin{aligned}&\dot e_1 = -K_1e_1+e_2,\\&\dot e_2 = q(e_1,e_2,\ddot y_{1d})+\overline{\eta}(t)+B(\vartheta,\psi)u,\end{aligned}\qquad(7)$$

где $q(e_1,e_2,\ddot y_{1d}) = K_1(-K_1e_1+e_2)+f(g)-\ddot y_{1d}$, $\overline{\eta}=C(V,\vartheta,\psi)\eta$, $|\overline{\eta}_i(t)|\le\overline{N}_i\ \forall t\ge 0, i=\overline{1,3}$.

Для обеспечения инвариантности по отношению к внешним возмущениям $\overline{\eta}$ предлагается базовый (т.е. при полных измерениях переменных состояния) закон комбинированного управления в форме обратной связи со стабилизирующей составляющей в виде нелинейных сигма функций:

$$\begin{aligned}&u=-B^{-1}(\vartheta,\psi)(q(e_1,e_2,\ddot y_{1d})+M_2\sigma(L_2e_2)),\\&B^{-1}=\frac{1}{g}\begin{pmatrix}\cos\vartheta\cos\psi & \sin\vartheta & -\cos\vartheta\sin\psi\\ -\sin\vartheta\cos\psi & \cos\vartheta & \sin\vartheta\sin\psi\\ \sin\psi & 0 & \cos\psi\end{pmatrix},\end{aligned}\qquad(8)$$

где $\sigma(L_2e_2)=\mathrm{col}(\sigma(l_{21}e_{21}),\sigma(l_{22}e_{22}),\sigma(l_{23}e_{23}))$, $M_2=\mathrm{diag}(M_{2i})$, $M_{2i},l_{2i}=\mathrm{const}>0$, $i=\overline{1,3}$. Сигма-функция $\sigma(l_{2i}e_{2i}) = 2/(1+\exp(-l_{2i}e_{2i}))-1$ имеет S-образную форму и является гладкой допредельной реализацией разрывного управления. В указанных интервалах для сигма функции справедливы следующие оценки [8]:

$$\begin{aligned}&\sigma(l_{2i}\Delta)<|\sigma(l_{2i}e_{2i})|<1\ \forall|e_{2i}|>\Delta>0, i=\overline{1,3};\\&\sigma(l_{2i}\Delta)|e_{2i}|/\Delta\le|\sigma(l_{2i}e_{2i})|\le\sigma(l_{2i}\Delta),\forall|e_{2i}|\le\Delta.\end{aligned}\qquad(9)$$

Из (9) следует, что при $|e_{2i}|>\Delta$ сигма функция близка к постоянной функции, а при $|e_{2i}|\le\Delta$ – к линейной. В качестве границы рекомендуется принять точку $l_{2i}\Delta = c$, где $\pm c\approx\pm 3$ – абсциссы вершин сигма функции, в которых ее кривизна достигает максимума и $\sigma(\pm 3)\approx\pm 0.9$.

Замкнутая система (7)–(8) имеет вид:

$$\dot e_1 = -K_1e_1+e_2,\ \dot e_2 = -M_2\sigma(L_2e_2)+\overline{\eta}(t).\qquad(10)$$

Для выбора параметров регулятора, обеспечивающего в замкнутой системе ε - инвариантность по отношению к внешним возмущениям, используем второй метод Ляпунова. Введем квадратичную форму в виде суммы квадратичных форм $W = W_1 + W_2, \quad W_j = \sum_{i=1}^{3} \frac{1}{2} e_{ji}^2, j = 1,2$ и выполним покомпонентный анализ их производных:

$$\dot{W}_{1i} = e_{1i}\dot{e}_{1i} = e_{1i}(e_{2i} - k_{1i}e_{1i}) \le |e_{1i}|(|e_{2i}| - k_{1i}|e_{1i}|),$$
$$\dot{W}_{2i} = e_{2i}\dot{e}_{2i} = e_{2i}(\overline{\eta}_i - M_{2i}\sigma(l_{2i}e_{2i})) \le$$
$$\le |e_{2i}|(\overline{N}_i - M_{2i}\sigma(c)), |e_{2i}| > c/l_{2i}, i = \overline{1,3}.$$

Неравенство $\dot{W} < 0$ выполняется при следующих условиях:

$$M_{2i} > \overline{N}_i / \sigma(c) \Rightarrow |e_{2i}| \le c/l_{2i} \ \forall t > t_1 > 0,$$
$$k_{1i} > |e_{2i}|/|e_{1i}| \Rightarrow k_{1i} > c/(l_{2i}\delta_i), i = \overline{1,3},$$

которые определяют нижние границы для выбора параметров регулятора, обеспечивающих в замкнутой системе (10) стабилизацию ошибок слежения (5):

$$|e_{1i}| \le c/(l_{2i}k_{1i}) \le \delta_i \ \forall t > T > t_1. \qquad (11)$$

Верхние границы параметров, от которых зависит минимальные значения ошибок слежения, определяются проектными ограничениями (4).

III. Решение задачи наблюдения

Для реализации управления (8) нужны текущие значения обобщенных координат $y_1(t)$ и скоростей $y_2(t)$ (или переменных $V(t), \vartheta(t), \psi(t)$ (2)), задающих воздействий и их производных до второго порядка. Для повышения надежности БПЛА предлагается использовать в регуляторе систему аналитического резервирования измерительных приборов, что позволит отказаться от датчиков скорости или сохранить работоспособность системы управления при их поломке. Итак, по измерениям обобщенных координат $y_1(t)$ ставится задача наблюдения обобщенных скоростей $y_2(t)$. Учитывая, что на систему (3) действуют внешние, неконтролируемые возмущения, предлагается использовать наблюдатель пониженного порядка. В отличие от стандартных редуцированных наблюдателей [9], где отбрасывается динамика измеряемых переменных, предлагается, наоборот, отбросить динамику неизмеряемых переменных (второе уравнение системы (3)) и построить наблюдатель обобщенных скоростей на основе первого уравнения системы (3), а именно, $\dot{y}_1 = y_2$, где переменные y_2 трактуются как внешние ограниченные возмущения с ограниченными производными (4). Наблюдатель «возмущений» (по сути, дифференциатор) имеет третий порядок:

$$\dot{z} = v(\varepsilon), \qquad (12)$$

где $z \in R^3$ – вектор состояния, $v = \mathrm{col}(v_1, v_2, v_3)$ – вектор корректирующих воздействий наблюдателя, $\varepsilon = y_1 - z \in R^3$ – вектор ошибок наблюдения; $\dot{\varepsilon} = y_2 - v \in R^3$ – вектор производных ошибок наблюдения. Задача наблюдения сводится к задаче стабилизации с заданной точностью ошибок наблюдения и их производных:

$$|\varepsilon_i(t)| \le \alpha \ \forall t > t_{01} \ge 0, i = \overline{1,3},$$
$$|\dot{\varepsilon}_i(t)| = |y_{2i}(t) - v_i(t)| \le \alpha \forall t > t_0 > t_{01}, t_0 < t_1. \qquad (13)$$

При $t > t_0$ корректирующие воздействия служат оценками «внешнего возмущения» $v_i(t) = y_{2i}(t) \pm \alpha$ и используются для вычисления смешанной переменной $\widetilde{e}_2 = v - \dot{y}_{1d} + K_1 e_1$ (6) и элементов матрицы $B^{-1}(\vartheta, \psi)$ (8). В силу (2) при ограничении $v_1^2(t) + v_3^2(t) \ne 0$ имеем:

$$\widetilde{V} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2}, \sin\widetilde{\vartheta} = \frac{v_2}{\widetilde{V}}, \cos\widetilde{\vartheta} = \sqrt{1 - \frac{v_2^2}{\widetilde{V}^2}},$$
$$\cos\widetilde{\psi} = \frac{v_1}{\widetilde{V}\cos\widetilde{\vartheta}}, \sin\widetilde{\psi} = -\frac{v_3}{\widetilde{V}\cos\widetilde{\vartheta}}. \qquad (14)$$

В замкнутой системе с наблюдателем закон комбинированного управления (8) реализуется в виде

$$u = -B^{-1}(\widetilde{\vartheta}, \widetilde{\psi})(q(e_1, \widetilde{e}_2, \ddot{y}_{1d}) + M_2\sigma(L_2\widetilde{e}_2)). \qquad (15)$$

и обеспечивает (5) с немного большей ошибкой [5, 7, 10]. Для выполнения (13) можно использовать *S*-образные корректирующие воздействия, обеспечивающие инвариантность по отношению к «внешним возмущениям». В отличие от управляющих воздействий (8), к которым предъявляется требование гладкости, корректирующие воздействия наблюдателя (12) можно выбрать в виде негладких, более простых в реализации кусочно-линейных sat -функций вида:

$$v_i = M_i \mathrm{sat}(l_i\varepsilon_i), M_i, l_i = \mathrm{const} > 0, i = \overline{1,3},$$
$$M_i \mathrm{sat}(l_i\varepsilon_i) = \begin{cases} M_i \mathrm{sign}\varepsilon_i, & |\varepsilon_i| > 1/l_i; \\ M_i l_i \varepsilon_i, & |\varepsilon_i| \le 1/l_i. \end{cases} \qquad (16)$$

Амплитуды M_i корректирующих воздействий (16) выбираются из достаточных условий $\varepsilon_i\dot{\varepsilon}_i < 0$ так, чтобы при $|\varepsilon_i(0)| > 1/l_i$ обеспечить за конечное время попадание в линейную зону, а при $|\varepsilon_i(0)| < 1/l_i$ – не выйти из нее:

$$\varepsilon_i\dot{\varepsilon}_i = \varepsilon_i(y_{2i} - M_i\mathrm{sign}\varepsilon_i) \le |\varepsilon_i|(Y_{2i} - M_i) < 0 \Rightarrow$$
$$M_i > |\varepsilon_i(0)|/t_{01} + Y_{2i} \Rightarrow |\varepsilon_i(t)| \le 1/l_i \ \forall t > t_{01}, i = \overline{1,3}.$$

При $t > t_{01}$ виртуальная динамическая система для ошибок наблюдения и их производных имеет вид:

$$\dot{\varepsilon}_i = y_{2i} - M_i l_i \varepsilon_{0i}, \ddot{\varepsilon} = \dot{y}_2 - M_i l_i \dot{\varepsilon}_i, i = \overline{1,3}. \quad (17)$$

Неравенства для выбора l_i, которые играют роль больших коэффициентов и обеспечивают заданную точность оценивания (13), определим с помощью второго метода Ляпунова. Для слагаемых производной квадратичной формы $W_0 = W_{01} + W_{02} = \sum_{i=1}^{3} \frac{1}{2} \varepsilon_i^2 + \sum_{i=1}^{3} \frac{1}{2} \dot{\varepsilon}_i^2$ в силу (4), (17) справедливы следующие оценки:

$$\begin{aligned} &W_{01i} = \varepsilon_i (y_{2i} - M_i l_i \varepsilon_i) \le |\varepsilon_i| (Y_{2i} - M_i l_i |\varepsilon_i|) < 0, \\ &l_i > Y_{2i} / (M_i \alpha) \Rightarrow |\varepsilon_i(t)| \le \alpha \, \forall t > t_{01} \ge 0; \\ &W_{02i} = \dot{\varepsilon}_i (\dot{y}_{2i} - M_i l_i \dot{\varepsilon}_i) \le |\dot{\varepsilon}_i| (\overline{Y}_{2i} - M_i l_i |\dot{\varepsilon}_i|) < 0, \\ &l_i > \overline{Y}_{2i} / (M_i \alpha) \Rightarrow |\dot{\varepsilon}_i(t)| \le \alpha \, \forall t > t_0 > t_{01}; \\ &\dot{W}_0 < 0 \Rightarrow l_i > \max\{Y_{2i}, \overline{Y}_{2i}\} / (M_i \alpha), i = \overline{1,3}. \end{aligned} \quad (18)$$

Неравенства (18) служат нижней границей для выбора больших коэффициентов коррекции. Минимальная допустимая ошибка оценивания (13) не зависит непосредственно от проектных ограничений (в отличие от ошибки слежения (11)) и определяется только возможностями вычислительной среды.

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование разработанных алгоритмов проводилось в среде MATLAB-Simulink. Для системы (3) с начальными условиями $y_1(0) = \mathrm{col}(0;100;1)$ при действии внешних возмущений $\eta_1(t) = 0.2 \sin t$, $\eta_2(t) = 0.24 \sin t$, $\eta_3(t) = 0.9 \cos t$ ставилась задача вывода центра масс БПЛА на пространственную траекторию: $y_{1d}(t) = 9 \sin(t/9)$, $y_{2d}(t) = t + 100$, $y_{3d}(t) = 9 \cos(t/9)$. При синтезе базового закона комбинированного управления (8) были приняты параметры регулятора в виде $K_1 = \mathrm{diag}(10.3;10.2;10.1)$, $M_2 = \mathrm{diag}(10.4;10.2;10.1)$, $L_2 = \mathrm{diag}(50;50;50)$. При синтезе наблюдателя (12) были приняты параметры корректирующих воздействий (16) в виде $M = \mathrm{diag}(8;8;8)$, $L = \mathrm{diag}(280;280;280)$.

На рис. 1 показаны графики ошибок слежения $e_{1i}(t) = y_{1i}(t) - y_{1di}(t)$[м], $i = \overline{1,3}$ в замкнутой системе (3): слева – с базовым законом управления (8); справа – с управлением (15) и наблюдателем (12), (16). Как видно из графиков, в системе с полными измерениями $|e_{1i}(t)| \le 0.01$[м] $\forall t > 8.18[c]$; в системе с наблюдателем: $|e_{1i}(t)| \le 0.01$[м] $\forall t > 7.9[c]$ $\forall i = \overline{1,3}$.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана работоспособность разработанного закона управления и его реализации без использования датчиков обобщенных скоростей. Использование наблюдателя обобщенных скоростей повысит надежность системы управления БПЛА при отказе измерительных устройств. Заметим, что разработанный нелинейный закон управления (8) (в отличие от линейного [5]) позволяет существенно снизить перерегулирования в начале переходных процессов.

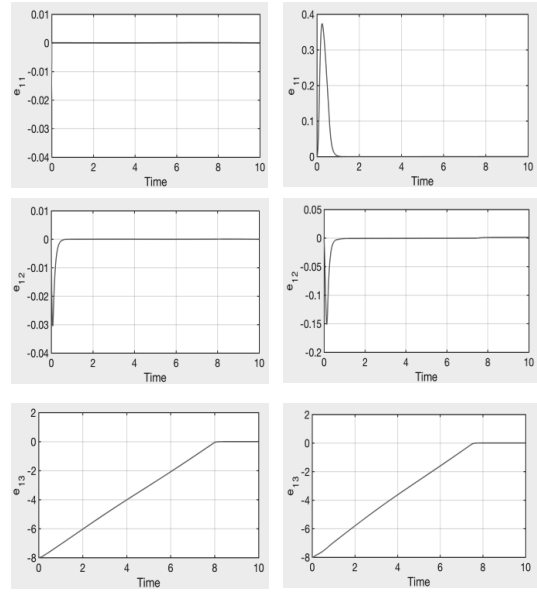


Рис. 1. Графики ошибок слежения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Современные направления синтеза систем автоматического управления ЛА // Известия РАН. ТиСУ, 2004. № 2. – С. 126-136.

[2] Gerasimov D.N., Paramonov A.V., Nikiforov V.O. Algorithm of multiharmonic disturbance compensation in linear systems with arbitrary delay: internal model approach // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2016. vol. 16, no 6. – P. 1023–1030.

[3] Канатников А.Н., Крищенко А.П. Терминальное управление пространственным движением летательных аппаратов // Известия РАН. Теория и системы управления, 2008. № 5. – С. 51–64.

[4] Краснова С.А., Мысик Н.С. Синтез инвариантной системы управления продольным движением летательного аппарата // Автоматика и телемеханика, 2011. № 10. – С. 104–116.

[5] Kochetkov S.A., Krasnova S.A., Utkin A.V. Analytical Reservation of Aircraft Measuring Systems via Disturbances and State Observers // Proc. of the 4th IEEE Workshop on Metrology for AeroSpace. Padua, Italy. June 21-23, 2017. P. 297–302.

[6] Краснова С.А., Антипов А.С. Иерархический синтез сигмоидальных обобщенных моментов манипулятора в условиях неопределенности // Проблемы управления, 2016. №4. С. 10–21.

[7] Краснова С.А., Уткин В.А., Уткин А.В. Блочный подход к анализу и синтезу инвариантных нелинейных систем слежения // Автоматика и телемеханика, 2017. № 12. – С.26–53.

[8] Краснова С.А., Уткин А.В. Сигма-функция в задачах синтеза наблюдателей состояний и возмущений // Проблемы управления, 2015. №5. – С. 27– 36.

[9] Afri C., Andrieu V., Bako L. and Dufour P. State and parameter estimation: A nonlinear Luenberger observer approach // IEEE Trans. on Automatic Control,2017. vol. 62, no. 2. – P. 973–980.

[10] Краснов Д.В., Уткин А.В. Синтез многофункциональной системы слежения в условиях неопределенности // Управление большими системами, 2017. Вып. 69. – С. 29–49.

Синтез систем управления при односторонних ограничениях на управления

Уткин А.В.
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН
г. Москва, Россия
utkin-av@rambler.ru

Уткин В.А.
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН
г. Москва, Россия
vicutkin@ipu.ru

***Abstract* — The paper considers a number of control problems with one-sided constraints on controls as applied to linear systems of a general form using linear feedbacks with restrictions.**

Ключевые слова — задача стабилизации и слежения, односторонние ограничения на управления, инвариантность, импульсные преобразователи напряжения постоянного тока.

I. Введение

На практике часто встречается ситуация, когда управления могут принимать односторонние (например, только положительные) значения. Примерами таких систем могут служить транспортные средства с однонаправленной тягой, нагрев теплоносителя с естественным охлаждением т.д. В этом случае известные методы теории управления, такие как модальный синтез, классические методы теории скользящих режимов и глубоких обратных связей [1] не могут быть непосредственно использованы. Ясно, что принципы управления в этом случае должны строиться с привлечением физических соображений. Например, для транспортного средства скорость может быть стабилизирована в окрестности заданного значения с использованием ускоряющей тяги и естественных или искусственно создаваемых тормозящих сил, в то время как при нагреве в заданной рабочей точке будет поочередно подаваться тепло и происходить охлаждение рабочего тела. Некоторые результаты получены для разрывных управлений «единица – ноль» для класса систем, в которых может быть реализован односторонний скользящий режим. В частности, такой подход используется в импульсных преобразователях напряжения, где используются электронные ключи с разрывной характеристикой [2,3].

В данной работе рассматривается ряд задач управления (стабилизация, слежение, наблюдения) с односторонними ограничениями на управления применительно к линейным системам общего вида с использованием линейных обратных связей с насыщением. Свойства робастности и инвариантности замкнутых систем обеспечивается использованием наблюдателей состояния и возмущений, построенных с использованием корректирующих воздействий в виде разрывных функций, что позволяет получить оценки не только компонент вектора состояния, но и оценки внешних возмущений и неопределенных составляющих модели объекта управления [4]. Полученные результаты применяются в задачах управления импульсными преобразователями напряжения постоянного тока [5,6], модель которых описывается системой дифференциальных уравнений с параметрическими неопределенностями, при действии внешних возмущений и при неполной информации о векторе состояния. Эффективность предложенных алгоритмов подтверждается численным моделированием в среде Matlab

II. Постановка задачи

Рассматриваются линейные стационарные системы общего вида

$$\dot{x} = Ax + Bu + Q\eta,\ y_1 = Dx, \tag{1}$$

где $x \in R^n, u, y_1 \in R^r, \eta \in R^l$ вектора состояний управлений, выходных переменных и возмущающих воздействий, соответственно.

Ставится задача слежения относительно выходных переменных за заданными значениями

$$e_1 = y_1 - y_{1d}(t) \tag{2}$$

в следующих предположениях:

1) Относительно задающих и возмущающих воздействий предполагается, что они являются гладкими функциями времени;
2) Область значений управляющие воздействия неотрицательна $u \in [O, U],\ U \in R^m = const > 0$.

Ограничения, накладываемые на область значений функций управлений, приводит к проблемам при использовании известных методов теории управления, в частности, модального управления. В следующем разделе 3А приводятся результаты решения поставленной задачи применительно к системам первого порядка. В разделе 3В полученные результаты распространяются на системы общего вида (1). В разделе 4 приводится пример синтеза управления в инверторе напряжения.

III. Системы первого порядка

A. Стабилизация с однополярным управлением

Рассмотрим систему первого порядка с учетом ограничений на управление и возмущения

$$\dot{x} = bu + \eta \tag{3}$$

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ (18-01-00846А)

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

где $0 \le u \le U, -N_1 \le \eta \le -N_2, |\dot{\eta}| \le \overline{N}$, $b, U, N_1 N_2, \overline{N} = consts > 0$.

В системе (3) управление неотрицательно, тогда как возмущение не положительно.

Введем два вида одностороннего управления – разрывное и непрерывное.

Разрывное управление

$$u = \frac{M}{2}[1 - sign(s)], \qquad (4)$$

где $s = x,\ M = const > 0$.

Для разрывного управления (4) условия существования скользящего движения по плоскости скольжения $s = 0$ определяется соотношением $s\dot{s} < 0$:

$$\dot{s}_{s>0} = \eta < 0,\ \dot{s}_{s<0} = bM + \eta > 0 \Rightarrow bM > -\eta. \qquad (5)$$

Линейное управление с насыщением

$$u = Msat^{+}(-s),\ s = kx + \eta,\ k, M = const > 0, \qquad (6)$$

где $M = const > 0$, $Msat^{+}(s) = \min(|s|, M)\frac{1}{2}[1 + sign(s)]$ и, в силу четности функции знака $sign(-s) = -sign(s)$, имеем $Msat^{+}(-s) = \min(|s|, M)\frac{1}{2}[1 - sign(s)]$ и для $b = const > 0$ примем $bMsat^{+}(s) = \min(|s|, bM)\frac{1}{2}[1 + sign(s)]$. Следующий результат дает соотношения на выбор параметров k, M в управлении (6), обеспечивающие асимптотическую сходимость замкнутой системы.

Лемма 1. Пусть в системе (2.1), или (2.4) выполнены условия

$$k > \left(\frac{\overline{N}}{N_2}\right) \setminus\ bM > N_1 + \frac{\overline{N}}{k}.$$

Тогда замкнутая система (3) и (6) асимптотически сходится.

Действительно, запишем дифференциальное уравнение относительно переменной s: $\dot{s} = k\eta + kbu + \dot{\eta}$.

Задача состоит в том, чтобы обеспечить попадание переменной s в линейную зону $s \in (-bM, 0)$ выбором параметров M, k.

Рассмотрим два возможных случая:

1) Для $s \le -bM$ имеем $\dot{s} = k\eta + kbM + \dot{\eta}$

Оценка производной в области $s \le -bM$ $\dot{s} \ge -kN_1 + kbM - \overline{N}$ и требование $\dot{s} > 0$ в этой области приводит к выбору амплитуды вида

$bkM > kN_1 + \overline{N} \Rightarrow bM > N_1 + \frac{\overline{N}}{k}$;

2) Для $s \ge 0$ имеем ($u = 0$) $\dot{s} = k\eta + \dot{\eta}$.

Требование $\dot{s} < 0$ приводит к оценке

$$\dot{s} < -kN_2 + \overline{N} < 0 \Rightarrow k > \frac{\overline{N}}{N_2}.$$

После попадания в линейную зону $bu = -s = -kx - \eta$ следует асимптотическая сходимость системы (3) и (6): $\dot{x} = -kx$.

Производная по управлению равна нулю вне линейной зоны $|s| \ge bM$, а в линейной зоне ограничена величиной

$$\dot{u} = -k(-kx) - \dot{\eta} \Rightarrow |\dot{u}| \le kM + \overline{N},\ \lim_{t\to\infty} \dot{u} = \dot{\eta} \qquad (7)$$

B. Системы общего вида при действии постоянных возмущений

Рассмотрим задачу стабилизации выходных переменных в линейных системах при воздействии постоянных возмущений

$$\dot{x} = Ax + Bu + Q\xi,\ y = Dx, \qquad (8)$$

где $x \in R^n, u, y \in R^m, \xi \in R^l$ - вектора состояния управлений, выходных переменных и возмущений соответственно, $\xi \in R^l, \dot{\xi} = 0$.

Утверждение 1. Пусть система (8) замкнута стабилизирующей обратной связью $u = Fx$ $\dot{x} = \overline{A}x + Q\eta$, где матрица $\overline{A} = A + BF$ Гурвицева.

Тогда в пределе (при $t \to \infty$) справедливы соотношения $\overline{A}x(\infty) + Q\xi = 0 \Rightarrow x(\infty) = -\overline{A}^{-1}Q\xi$.

Пусть в системе (8) возмущения действуют в пространстве управлений $\mathrm{Im}Q \in \mathrm{Im}B$. Тогда система (8) может быть представлена в виде

$$\dot{x} = Ax + B(u + \Lambda\xi),\ B\Lambda = Q. \qquad (9)$$

Утверждение 2. (ПИ-регулятор). Расширим пространство состояния системы (9) $\dot{z} = x$ и синтезируем стабилизирующее управление расширенной системы в виде $u = Fx + F_1 z$. Тогда справедливо $x(\infty) = 0$.

Действительно, запишем расширенную замкнутую систему $\dot{z} = x, \dot{x} = (A + BF)x + B(F_1 z + \Lambda\xi)$, а затем перепишем ее относительно новых переменных $\bar{z} = z + F_1^{-1}\Lambda\xi$:

$$\dot{\bar{z}} = x,\ \dot{x} = (A + BF)x + BF_1\bar{z}. \qquad (10)$$

Система (10) устойчива $x \to 0, \bar{z} \to 0$, откуда следует стабилизация системы (9), при этом $z \to F_1^{-1}\Lambda\xi$.

Пример 1. Рассмотрим задачу стабилизации системы второго порядка относительно переменной $x_1 \to 0$:

$$\dot{x}_1 = x_2 + \xi_1,\ \dot{x}_2 = u + \xi_2,\ \ \xi_1 = \dot{\xi}_2 = 0. \qquad (11)$$

Расширим пространство состояний

$$\dot{z}_1 = x_1,\ \dot{x}_1 = x_2 + \xi_1,\ \dot{x}_2 = u + \xi_2. \qquad (12)$$

Выберем стабилизирующую обратную связь

$$u = -d_1 z_1 - k_1 x_1 - k_2 x_2. \qquad (13)$$

Согласно Утверждению 2 в замкнутой системе (11)-(13) выполняются в асимптотике соотношения (при $t \to \infty$)

$$z_1(\infty) = \frac{1}{d_1}(k_2\xi_1 + \xi_2),\ x_1(\infty) = 0,\ x_2(\infty) = -\xi_1. \qquad (14)$$

Действительно, введем новые переменные

$$z_1 = z_1 + \frac{1}{d_1}(k_2\xi_1 + \xi_2),\ \bar{x}_2 = x_2 + \xi_1.$$

Система (12)-(13) относительно переменных $\bar{z}_1, x_1, \bar{x}_2$ примет вид $\dot{\bar{z}}_1 = x_1,\ \dot{x}_1 = \bar{x}_2, \dot{\bar{x}}_2 = -d_1\bar{z}_1 - k_1 x_1 - k_2\bar{x}_2$.

Из условия устойчивости последней системы $\bar{z}_1 \to 0, x_1 \to 0, \bar{x}_2 \to 0$ обеспечивается асимптотическое схождение в ноль переменной $x_1 \to 0$.

В предыдущих рассмотрениях управление выбиралось в виде линейной обратной связи. Для случая односторонних управлений полученные результаты стабилизации систем не приемлемы. Покажем, как решить задачу стабилизации систем с односторонними управлениями применительно к системе (9).

Приведем систему (9) к регулярному виду

$$\dot{x}_1 = A_{11}x_1 + A_{10}x_0,\ \dot{x}_0 = A_{01}x_1 + A_{00}x_0 + B_0 u, \quad (15)$$

где $x_1 \in R^{n-m},\ x_0 \in R^m,\ \det B_0 \neq 0$.

После введения замены переменных $s = B_0^{-1}(x_0 + F_1 x_1)$ система (15) примет вид:

$$\dot{x}_1 = \overline{A}_{11}x_1 + B_0 s,\ \dot{s} = \overline{A}_{01}x_1 + \overline{A}_{00}s + u, \qquad (16)$$

где спектр матрицы $\overline{A}_1 = (A_{11} - A_{10}F_1)$ выбором матрицы F_1 назначается произвольным в силу управляемости пары (A_{11}, A_{10}), $\overline{A}_{01} = B_0^{-1}(A_{01} - A_{00}F_1 + F_1\overline{A}_{11})$, $\overline{A}_{00} = B_0^{-1}(A_{00} + F_1)B_0$.

Задача стабилизации исходной системы (9) свелась к стабилизации второй элементарной подсистемы (16), которую запишем в виде, аналогичном (3):

$$\dot{s} = \overline{\eta} + u,\ \overline{\eta} = \overline{A}_{01}x_1 + \overline{A}_{00}s. \qquad (17)$$

Для стабилизации системы (17) в предположении $\eta < 0$ можно воспользоваться векторным аналогом разрывного управления (4)

$$u_i = \frac{M_i}{2}[1 - sign(s_i)],\ i = \overline{1,m}, \qquad (18)$$

где параметры $k_i, M_i = const > 0$ выбираются по соотношениям (5)

или векторным аналогом непрерывного управления (6)

$$u_i = M_i sat^+(-\bar{s}_i),\ \bar{s}_i = k_i s_i + \overline{\eta}_i,\ i = \overline{1,m}, \qquad (19)$$

где параметры $k_i, M_i = const > 0$ выбираются согласно Лемме 1.

Поскольку производная $\dot{\overline{\eta}}$ в (19) зависит от управлений, требуется модификация закона управления (19), например, вида

$$u = Msat^+(-\bar{s}),\ \bar{s} = (K - \overline{A}_{00})s + \overline{\eta}. \qquad (20)$$

В силу того, что матрица $K = diag(k_i)$ диагональная с ростом коэффициентов k_i можно добиться того, что матрица $(K - \overline{A}_{00})$ станет гурвицевой. Тогда задача сводится к уже известной постановке из Леммы 1:

$$\dot{\bar{s}} = (K - \overline{A}_{00})\dot{s} + \dot{\overline{\eta}} = K(\overline{\eta} + u) + \overline{A}_{10}\dot{x}_1.$$

В заключение этого раздела заметим, что разрывные управления (18) используются для управления ключами непосредственно, в то время как непрерывные управления служат входными сигналами устройства ШИМ, на выходе которого формируется алгоритм управления ключами.

IV. Приложение к понижающему преобразователю

Рассмотрим задачу регулирования выходного напряжения применительно к понижающему преобразователю, описываемого уравнениями вида [4]:

$$L\dot{x}_1 = -x_2 - rx_1 + uE,\ C\dot{x}_2 = x_1 - \frac{1}{R}x_2, \qquad (21)$$

$x_1 = I$ - входной ток, $x_2 = V = const$ - выходное напряжение, C - емкость конденсатора, L - индуктивность дросселя, R - сопротивление нагрузки, r – активное сопротивление катушки, E - входное напряжение, u - управление.

Особенность модели (21) состоит в том, что управление имеет ключевую природу $u \subset (0,1)$, т.е. управление может принимать два значения. Ниже приводятся два алгоритма синтеза стабилизирующего

управления. В первом алгоритме синтезируется непосредственно разрывное управление. Во втором управление ищется в классе односторонних непрерывных функций, которое служит заданием для ШИМ.

Синтез 1 (известны x_1 и R)

Цель управления $x_2 \to V_d = const$ в предположении, что для измерения доступны входной ток и нагрузка.

Сделаем замену переменных в системе (21)

$$s = x_1 - \frac{1}{R}V_d \qquad (22)$$

и запишем (21) в новых координатах

$$C\dot{x}_2 = -\frac{1}{R}x_2 + (s + \frac{V_d}{R}),\ L\dot{s} = -x_2 - r(s + \frac{1}{R}V_d) + uE. \quad (23)$$

Выберем управление односторонним и разрывным

$$u = 0.5(1 - sign(s)). \qquad (24)$$

Проверим условия существования скользящего режима на плоскости $s = 0:\ s\dot{s} < 0$.

$$L\dot{s}_{s>0} = -x_2 - r(s + \frac{1}{R}V_d) < 0,$$

$$L\dot{s}_{s<0} = -x_2 - r(s + \frac{1}{R}V_d) + E > 0 \Rightarrow 0 < x_2 < E - \frac{r}{R}V_d.$$

Уравнение в скользящем режиме ($s = 0$) имеет вид

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{RC}(x_2 - V_d) \Rightarrow x_2 \to V_d. \qquad (25)$$

Как видно из анализа сходимости изображающей точки системы на плоскость $s = 0$ при малых $s \approx 0$ наблюдается следующее

$L\dot{s}_{s>0} = -x_2 - r(s + \frac{1}{R}V_d) \approx -x_2 - \frac{r}{R}V_d < 0$ в то время как с отрицательной стороны плоскости имеем

$L\dot{s}_{s<0} = -x_2 - r(s + \frac{1}{R}V_d) + E \approx -x_2 - \frac{r}{R}V_d + E > 0$.

Тот факт, что скорость с разных сторон зависит от входного напряжения, приводит к следующим соображениям. Если входное напряжение удовлетворяет соотношению

$$-x_2 - \frac{r}{R}V_d + E = x_2 + \frac{r}{R}V_d \Rightarrow E = 2(x_2 + \frac{r}{R}V_d), \quad (26)$$

то скорости с разных сторон плоскости примерно равны и ее среднее значение на интервале переключений равно нулю. В случае изменения входного напряжения происходит смещение среднего значения плоскости на интервале переключения и первое уравнение (23) можно переписать в виде

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{RC}(x_2 - V_d) + \frac{1}{C}s_m = -\frac{1}{RC}(x_2 - V_d + Rs_m)$$

где s_m среднее значения плоскости скольжения в установившемся режиме. Поскольку s_m изменяется пропорционально выходному напряжению E, отклонения выходного напряжения от заданного тем больше, чем больше входное напряжение отличается от значения (26). В смысле приведенных соображений, не приходится говорить о том, что приведенный алгоритм инвариантен к величине входного напряжения и активному сопротивлению катушки, как это обычно происходит при реализации идеального скользящего режима. Приведенный алгоритм также критически зависит от величины нагрузки R. Полагая в установившемся режиме смещение плоскости скольжения от нуля постоянным $\dot{s}_m = 0$, воспользуемся утверждением 2 и выберем вместо плоскости скольжения (22) скорректированную плоскость вида

$$\bar{s} = x_1 - \frac{1}{R}V_d + \alpha\int_0^t (x_1 - \frac{V_d}{R})d\tau. \qquad (27)$$

Синтез 2. (известен x_1 и входное напряжение E).

Для получения оценки величины нагрузки синтезируем наблюдатель состояния на скользящих режимах по измерениям входного тока в предположении, что нагрузка постоянна $\dot{R} = 0$

Перепишем (3.1) в виде

$$\begin{aligned} &\dot{x}_1 = -\frac{1}{L}x_2 - rx_1 + u\frac{E}{L},\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C}(x_1 - \frac{1}{C}x_3x_2), \\ &\dot{x}_3 = 0,\ x_3 = \frac{1}{R} = const. \end{aligned} \qquad (28)$$

Для решения поставленной задачи используем наблюдатель состояния вида

$$\begin{aligned} &\dot{z}_1 = -\frac{1}{L}z_2 - rz_1 + u\frac{E}{L} - v_1, \\ &\dot{z}_2 = \frac{1}{C}(z_1 - z_3z_2) - v_2,\ \dot{z}_3 = -v_3 \end{aligned} \qquad (29)$$

В невязках $\varepsilon_i = x_i - z_i,\ i = 1,2,3$ системы (28) и (29) будут описываться уравнениями

$$\begin{aligned} &\dot{\varepsilon}_1 = -\frac{1}{L}\varepsilon_2 - r\varepsilon_1 + v_1, \\ &\dot{\varepsilon}_2 = \frac{1}{C}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3\varepsilon_2 - \varepsilon_3z_2 - \varepsilon_2z_3) + v_2,\ \dot{\varepsilon}_3 = v_3. \end{aligned} \qquad (30)$$

Синтез наблюдателя на скользящих режимах.

Выберем $v_1 = M_1 sign(\varepsilon_1)$. При достаточно большой амплитуде $M_1 > 0$ в первой подсистеме (30) возникнет скользящий режим по плоскости $\varepsilon_1 = 0$ и эквивалентное значение корректирующего воздействия равно

$v_{1eq} = \frac{1}{L}\varepsilon_2$ и $\varepsilon_2 = Lv_{1eq}$. При выборе $v_2 = M_2 sign(Lv_{1q})$ во втором уравнении (30) возникает скользящее движение по плоскости $\varepsilon_2 = 0$ и эквивалентное корректирующее воздействие равно $v_{2eq} = \frac{1}{C}\varepsilon_3 z_2$ и $\varepsilon_3 = \frac{Cv_{2eq}}{z_2}$. Выбор $v_3 = M_3 sign\left(\frac{Cv_{2eq}}{z_2}\right)$ обеспечивает скользящие движение по плоскости скольжения $\varepsilon_3 = (x_3 - z_3) = 0$, что решает задачу оценивания неизвестной нагрузки $z_3 = x_3 = \frac{1}{R}$. Выбор управления вида (24) с использованием оценки $R = \frac{1}{z_3}$ решает поставленную задачу. Отметим также, что из равенства $\varepsilon_2 = x_2 - z_2 = 0$ следует оценка выходного напряжения $z_2 = x_2$, что позволяет синтезировать управление с заданными темпами сходимости выходного напряжения по следующей схеме:

Замена переменных

$\bar{s} = x_1 + \frac{1}{R}[mz_2 - (m+1)V_d], m = const > 0$ приводит систему (3.1) к виду при $z_2 = x_2$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1+m}{RC}(x_2 - V_d) + \frac{1}{C}\bar{s},\ \dot{\bar{s}} = -\frac{1}{L}x_2 - r(s + \frac{1}{R}V_d) +$$
$$+ u\frac{E}{L} + \frac{m}{R}\left(-\frac{1+m}{RC}(x_2 - V_d) + \frac{1}{C}\bar{s}\right).$$

Решая задачу синтеза скользящего движения по плоскости $\bar{s} = 0$, с управлением $u = 0.5(1 - sign(\bar{s}))$

имеем движение в скользящем режиме $\dot{x}_2 = -\frac{1+m}{RC}(x_2 - V_d)$, где выбор коэффициента $m > 0$ определяет темпы сходимости выходного напряжения к заданному значению.

V. Моделирование

При моделировании выбраны следующие параметры модели (21): $L = 6{,}914 \times 10^{-3}\,Гн$, $r = 0{,}2Ом$, $R = 40Ом$,

$C = 14{,}14 \times 10^{-6}\,ф$, $E = 40в$, $U_{out} = 12\,в$.

На рис. 1 при частоте 40 кГц смещение (ERROR) по x_2 относительно заданного напряжения (12В) составляет 0.4 В. При повышении частоты до 200 кГц на рис. 2 смещение составляет уже 0.04В. При введении же в регулятор (27) интегральной составляющей при $\alpha = 4$, на рис.3 показано, что смещение полностью отсутствует в том числе и при первоначальной частоте 40 кГц.

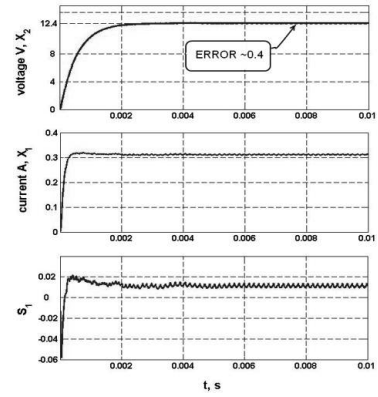


Рис. 1. Управление (24) при 40 кГц.

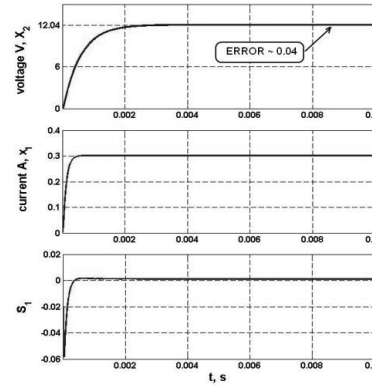


Рис. 2. Управление (24) при 200 кГц.

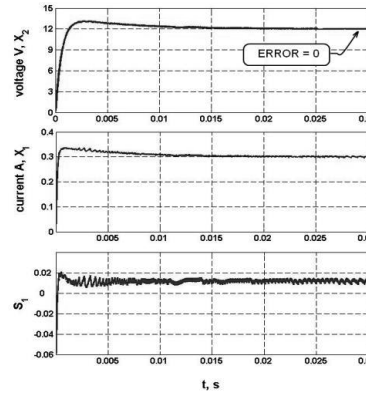


Рис. 3. Управление (24) при 40 кГц.

VI. Заключение

В данной статье рассмотрены задачи регулирования по выходу многомерных линейных систем при воздействии внешних постоянных возмущений и/или заданий в предположении, что управления являются односторонними (неотрицательными) ограниченными по амплитуде функциями. С использованием разрывных управлений за счет создания скользящих движений обеспечиваются инвариантность к внешним не доступным для измерения возмущениям и робастность замкнутых систем. При дополнительных требованиях на ограниченность и скорости роста управлений, введен односторонний (неотрицательный) аналог линейной функции с насыщением. В этом случае для обеспечения инвариантных свойств замкнутой системы используется стандартный ПИ-регулятор. В качестве приложения рассмотрены задачи управления импульсными понижающими преобразователями напряжения постоянного тока.

Список литературы

[1] Y. Shtessel, C. Edwards, L. Fridman, A. Levant, Sliding mode control and observation // Control Engineering: Birkhauser, 2012, 356 p.

[2] Sabanovic A, Sabanovic N, Ohnishi K., Sliding Mode in Power Converters and Motion Control Systems // Int. J. Control, 1993. 57. – P. 1237-1259.

[3] Y.B. Shtessel, A. S.I. Zinober and I. A. Shkolnikov, Sliding mode control of boost and buck-boost power converters using method of stable system center // Automatica, 2003. Vol 39. - P. 1061-1067.

[4] Krasnova S. A., Utkin V. A., Utkin A. V., Block Approach to Analysis and Design of the Invariant Nonlinear Tracking Systems // Automation and Remote Control, 2017. Vol. 78. No. 1. - P. 2120–2140.

[5] S Kapat, Improved time optimal control of a buck converter based on capacitor current // IEEE Trans. Power Electron., 2012. Vol. 27(3).- P. 1444–1454.

[6] W. Stefanutti, P. Mattavelli, S. Saggini, and M. Ghioni, Autotuning of digitally controlled DC-DC converters based on relay feedback // IEEE transactions on power electronics, 2007.Vol. 22. - P. 199-207.

Перевод электродинамической космической тросовой системы во вращение с помощью скользящего режима управления

Лу Хонши
Самарский национальный исследовательский университет им.академика С.П. Королева,
Самара, Россия
Северо-западный политехнический университет,
Сиань, Китай
luhs@mail.nwpu.edu.cn

Ли Айцзюнь
Северо-западный политехнический университет,
Сиань, Китай
liaijun@nwpu.edu.cn

Заболотнов Ю.М.
Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева,
Самара, Россия
yumz@yandex.ru

***Abstract* —Spinning electrodynamic tether system (SEDT) consists of two small spacecrafts connected by one conductive tether, and is promising in many applications, including space debris removal, transportation missions, changing orbital parameters and so on. Spinning electrodynamic tether system is considered to have several advantages compared to traditional vertical electrodynamic tether systems from the view of motion stability. During the transition of tether system into spin, system is expected to be accelerated into spin from vertical position. However, Ampere force acts with magnetic field, which constantly changes its spatial position due to the spinning tether. Therefore it requires special control algorithms. Two open-loop control methods are proposed in this paper as nominal trajectories with one closed-loop adaptive sliding mode controller: "direct" and "swing" methods. The "direct" method provides time-minimal solution, but suits for only rather big current level. "Swing" method takes longer time, but significantly reduces requirement of current level and impulse. To track the nominal trajectories of the two methods under space perturbations, one closed-loop adaptive sliding mode controller is proposed, which is able to deal with initial errors in the angular position of the tether and in the inclination of the orbit (changing the direction of the magnetic induction vector). Numerical simulation confirms the effectiveness of the proposed control algorithms.**

Ключевые слова —Вращающаяся электродинамическая тросовая система, сила Ампера, переходный этап, адаптивный скользящий режим управления.

I. Введение

Космическая тросовая система (КТС) - это космическая система, концевые тела у которой соединены тонкими длинными тросами[1]. КТС считаются полезными во многих миссиях, включая удаление космического мусора, мониторинг атмосферы или магнитного поля, создание искусственной гравитации, транспортные операции, изменение параметров орбит космических аппаратов (КА) [1]. В настоящее время задача сокращения стоимости космических операций при реализации различных космических миссий остается актуальной, и КТС во многих случаях обеспечивают решения, уменьшающие стоимость космических миссий [2]. С помощью механического импульсного обмена (МИО) между отдельными частями КТС, и в сочетании с многоразовыми ракетами-носителями (МРН), КТС может использоваться для запуска полезной нагрузки с Земли на орбиту или для перехода между орбитами, что во многих случаях позволяет уменьшить энергетические затраты. Кроме того, КТС является многоразовой системой, поэтому транспортные операции являются одними из наиболее перспективных направлений использования КТС [1,3]. После многолетних исследований установлено, что вращающая тросовая система (ВТС) обеспечивает в этом смысле наилучшую способность и устойчивость для всех типов МИО [3-5].

В последнее десятилетие использование электродинамической тросовой системы (ЭДТС) является перспективной задачей, решение которой обеспечивает реализацию орбитальных маневров с наибольшей эффективностью [6]. ЭДТС широко используются для удаления космического мусора [7,8]. Благодаря способности ЭДТС в изменении орбитальных параметров, комбинация с ЭДТС и МИО также была предложена различными специалистами, чтобы обеспечить бестопливное орбитальное маневрировании [8,9]. Вращающаяся ЭДТС (ВЭДТС) имеет большой потенциал с точки зрения её применения в этой области. Для традиционной вертикальной ЭДТС величина тока ограничивается условием устойчивости системы, и следовательно, значительно ограничивает возможности системы. У ВЭДТС не такого ограничения, поэтому возможности электродинамического троса может быть полностью использованы [10]. Кроме того, из-за действия центробежных сил, которые возникают при вращении системы, изгибная деформация троса от распределенных силы Ампера уменьшается, и форма троса приближается к прямой линии [10]. Поэтому ВЭДТС считается идеальным решением для транспортных операций или для изменения параметров орбит КА.

Использование вращающейся ЭДТС кажется полезной, однако требует всесторонних исследований до того, как эта миссия будет реализована. Самым опасным участком при движении ЭДТС является участок перевода от вертикального положения равновесия к вращательному движению [11]. Когда ЭДТС стабилизируется вблизи положения равновесия, гравитационная сила обеспечивает слабую, но эффективную стабилизацию. Когда ЭДТС вращается,

Исследование автора финансируется китайским стипендиальным советом (Chinese Scholarship Council). Работа выполнена при поддержке Шэньси провинции лаборатория управления полетом и технологии моделирования, Китая (Shaanxi Province Key Laboratory of flight control and Simulation Technology, China).

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

центробежная сила также обеспечивает натяжение троса. В момент перевода системы во вращение натяжение троса минимально, поэтому именно на этом участке движения ЭДТС возможны случаи ослабления (или провисания) троса [12]. Поэтому переходный участок движения ЭДТС требует тщательного исследования.

Основное внимание в этой статье уделяется анализу устойчивости и управлению движением ЭДТС при переводе во вращение из состояния равновесия вблизи вертикали. Перевод во вращение осуществляется с помощью сил Ампера, действующих на проводящий ток трос в магнитном поле Земли. Для перевода системы во вращение предлагаются два способа. Первый способ основан на постепенном раскачивании системы (метод «качания»), при втором способе перевод системы в вращение осуществляется непосредственно на первом периоде колебаний КТС относительно вертикали («прямой» метод). Предлагаемые методы управления адаптивны к возникающим ошибкам регулирования, включая неоднородность магнитного поля, изменение параметров системы и др. Адаптивность обеспечивается изменением коэффициентов системы [13]. Учитываются начальные ошибки в угловом положении троса и в наклонении орбиты (изменение направления вектора магнитной индукции). Предлагаемые методы основываются на скользящем режиме управления. Результаты моделирования подтверждают эффективность управления.

II. Математическая модель движения тросовой системы

A. Динамическая модель движения ЭДТС

Для описания движения ЭДТС вокруг центра масс учитываются только гравитационные и электродинамические силы, используется ньютоновское поле тяготения. Системы координат (СК), которые применяются в математических моделях, приводятся на рис. 1.

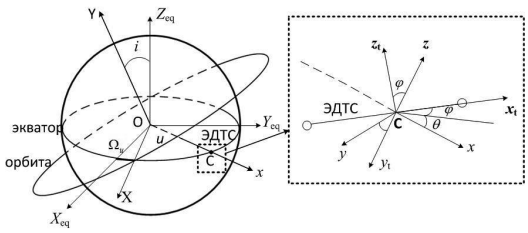


Рис. 1. Системы координат

На рисунке 1: 1. Геоцентрическая экваториальная СК $OX_{eq}Y_{eq}Z_{eq}$ (неподвижная система): начало координат в центре Земли , ось OX_{eq} направлена на точку весеннего равноденствия; OZ_{eq} параллельна оси вращения Земли, а ось OY_{eq} дополняет СК до правой. 2. Геоцентрическая орбитальная СК $OXYZ$: ось OX направлена в восходящий узел или в перигей (для экваториальной орбиты) орбиты ЭДТС, ось OZ перпендикулярна плоскости орбиты и направлена по вектору угловой скорости центра масс ЭДТС, ось OY дополняет СК до правой. 3. Орбитальная правая подвижная СК $Cxyz$: начало координат в центре масс ЭДТС, ось Cx направлена по радиус-вектору центра масс ЭДТС, ось Cz - параллельна оси OZ . 4. Система координат связанная с тросом $Cx_Ty_Tz_T$ (подвижная СК): ось Cx_T направлена по натянутому тросу от центра масс к спутнику m_1 . Угол θ определяет движение ЭДТС относительно центра масс в плоскости орбиты, угол φ определяет угловые колебания системы вне плоскости орбиты.

Орбита центра масс системы характеризуется следующими параметрами: A - большая полуось эллипса, e - эксцентриситет, Ω_u - прямое восхождение восходящего узла, i - наклонение орбиты. Положение центра масс на орбите определяется углом истинной аномалии ϑ . Положение ЭДТС относительно СК $Cxyz$ определяется углами θ , φ . Движение ЭДТС описываются следующими уравнениями [14]:

$$
\begin{aligned}
\frac{dA}{dt} &= 2\nu\sqrt{\frac{A^3}{K\left(1-q^2-k^2\right)}}\left[a_s\frac{q\sin u-k\cos u}{\nu}+a_t\right]\\
\frac{dq}{dt} &= \sqrt{\frac{p}{K}}[a_s\sin u+a_t\left(1+\frac{1}{\nu}\right)\cos u\\
&\quad+\frac{1}{\nu}\left(qa_t+ka_w ctgi\sin u\right)]\\
\frac{dk}{dt} &= \sqrt{\frac{p}{K}}[-a_s\cos u+a_t\left(1+\frac{1}{\nu}\right)\sin u\\
&\quad+\frac{1}{\nu}\left(ka_t-qa_w ctgi\sin u\right)]\\
\frac{di}{dt} &= \frac{a_w}{\nu}\sqrt{\frac{p}{K}}\cos u\\
\frac{d\Omega}{dt} &= \frac{a_w}{\nu}\sqrt{\frac{p}{K}}\frac{\sin u}{\sin i}\\
\frac{du}{dt} &= \frac{1}{\nu}\sqrt{\frac{p}{K}}\left[\nu^3\frac{K}{p^2}-a_w ctgi\sin u\right]
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

$$
\begin{aligned}
&\ddot{\theta}+\dot{\omega}-2\dot{\varphi}\mathrm{tg}\varphi\left(\dot{\theta}+\omega\right)+1.5\nu^{-1}\omega^2\sin 2\theta = Q_1/m_e r^2\cos^2\varphi\\
&\ddot{\varphi}+[0.5\left(\dot{\theta}+\omega\right)^2+1.5\nu^{-1}\omega^2\cos^2\theta]\sin 2\varphi = Q_2/m_e r^2
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

где r - расстояние между концевыми точками, $u=\vartheta-\omega_\pi$, ω_π - аргумент перигея, $e=\sqrt{q^2+k^2}$, $\nu=1+q\cos(\vartheta)+k\sin(\vartheta)$, $p=A\left(1-q^2-k^2\right)$, K - гравитационная постоянная Земли; a_s , a_t , a_w - компоненты возмущающего ускорения от силы Ампера соответственно по осям Cx , Cy , Cz ;

$\omega=\dot{\vartheta}=\left(K/p^3\right)^{\frac{1}{2}}\nu^2$, $\dot{\omega}=\ddot{\vartheta}=-2K\nu^3 e\sin\vartheta/p^3$;

$m_e=\left(m_1m_2\right)/\left(m_1+m_2\right)$.

Здесь система (1) описывает возмущенное движение центра масс ЭДТС в оскулирующих элементах и

записана в традиционной форме. Система (2) описывает движение ЭДТС относительно центра масс [5, 15].

Обобщенные силы Q_1, Q_2 и ускорения a_s, a_t, a_w, зависящие от сил Ампера, имеют вид [14, 15]:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \cos\varphi(B_z\cos\varphi - B_x\sin\varphi\cos\theta \\ &\quad - B_y\sin\varphi\sin\theta)\Delta Ir \\ Q_2 &= \left(B_x\sin\theta - B_y\cos\theta\right)\Delta Ir + F_c \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} a_s &= \frac{Ir\left(B_z\cos\varphi\sin\theta - B_y\sin\varphi\right)}{m_1 + m_2} \\ a_t &= \frac{Ir\left(B_x\sin\varphi - B_z\cos\varphi\cos\theta\right)}{m_1 + m_2} \\ a_w &= \frac{Ir\left(B_y\cos\varphi\cos\theta - B_x\cos\varphi\sin\theta\right)}{m_1 + m_2} \end{aligned} \tag{4}$$

где I - ток (его положительное направление определяется в направлении КА массой m_2; T - Сила натяжения; F_c -тяга, которая действует на угловое движение φ; $\Delta = 0.5r\left(m_2 - m_1\right)/\left(m_1 + m_2\right)$ - расстояние от точки приложения равнодействующей сил Ампера до центра масс системы (алгебраическая величина); B_x, B_y, B_z - проекции вектора магнитной индукции на оси СК Cx, Cy, Cz соответственно.

B. Магнитное поле Земли

Вектор магнитной индукции определяется в следующем виде [14]:

$$\mathbf{B} = B_o\left[\mathbf{e}_z - 3\left(\mathbf{e}_z\cdot\mathbf{e}_R\right)\mathbf{e}_R\right] \tag{5}$$

где $\mathbf{e}_z$ - единичный вектор, направленный по оси вращения Земли, $\mathbf{e}_R$ - единичный вектор, направленный по радиус-вектору центра масс ЭДТС, $B_0 = \mu_m / R^3$, $\mu_m = 8\times10^6$ тол.км^3 - момент магнитного диполя, $(\cdot)$ - знак скалярного произведения. В этой работе используется прямая дипольная модель, то есть, ось магнитного поля Земли совпадает с осью вращения Земли. Проекции вектора магнитной индукции на оси СК *OXYZ* определяются из следующих выражений (рисунки 1) [15]:

$$\begin{aligned} B_x &= -2B_0\sin i\sin u \\ B_y &= B_0\sin i\cos u \\ B_z &= B_0\cos i \end{aligned} \tag{6}$$

III. Номинальное управление при переводе во вращение

Используется релейное управление для перевода системы во вращение вида

$$I = \begin{cases} I_{\max}, & if \quad \dot\theta \le \dot\theta_f \\ 0, & if \quad \dot\theta > \dot\theta_f \end{cases} \tag{7}$$

где $\dot\theta_f$ - желаемая скорость вращения, $I_{\max}$ - наибольший доступный ток.

Известно [16], что существует минимальная величина момента (критическое значение) для перевода системы во вращение, причем момент может быть обеспечен либо силами тяги реактивных двигателей [5], либо силой Ампера [16]. Из первого уравнения системы (2), когда $\dot\theta = \ddot\theta = \dot r = \varphi = i = 0$, следует:

$$\dot\omega + 1.5v^{-1}\omega^2\sin 2\theta^* = B_0\Delta IL_f / m_e{L_f}^2 \tag{8}$$

где θ^* - квазиравновесное положение троса. Причем для почти круговых орбит ($e \approx 0$) получим:

$$1.5\omega^2\sin 2\theta^* \approx B_0\Delta IL_f / m_e{L_f}^2 \tag{9}$$

Из выражения (9) из условия $\sin 2\theta^* = 1$ можно получить критическую величину тока

$$I^* \approx \frac{3K}{2\mu m^*} \tag{10}$$

где $m^* = \dfrac{m_2 - m_1}{2(m_1 m_2)}$.

Из (10) следует, что критическая величина тока не зависит от высоты орбиты, длины троса и орбитального наклонения, а зависит только от массовых характеристик ЭДТС. Однако такой ток получается из условия квазиравновесия, и, как показывают результаты моделирования, реальный критический ток I' составляет около 75% от расчетного значения I^* (10). Если $I > I'$, система переходит во вращение на первом периоде колебаний. Это соответствует «прямому» методу перевода системы во вращение.

Критический ток I' может быть слишком большим с точки зрения возможностей бортовой энергетической системы. Для уменьшения величины тока при переводе системы во вращение используется метод «качания». В этом случае

$$I = \begin{cases} I_{\max}, & если \quad 0 \le \dot\theta \le \dot\theta_f \\ 0, & по-другому \end{cases} \tag{11}$$

Этот закон управления использовался ранее для перевода КТС во вращение с помощью реактивных двигателей [5,16]. В этом законе управления ток пропускается по тросу, когда знак угловой скорости $\dot\theta$ совпадает со знаком заданного вращения системы, а в противоположном случае ток отсутствует. Таким образом, ЭДТС будет представлять собой гравитационный маятник на орбите, амплитуда

колебаний которого будет постоянно увеличиваться. Соответственно будет увеличиваться полная энергия «маятника». Поэтому в некоторый момент ЭДТС начнет вращаться. Этот закон управления значительно снижает небходимую величину тока и, следовательно, потребные энергетические затраты.

IV. Проектирование замкнутой системы управления

Необходимо построить замкнутую систему управления для ЭДТС, чтобы решить задачу регулирования при действующих возмущениях. Здесь надо отметить, что сила Ампера оказывает существенное влияние на угол θ и не значительное влияние на колебания системы вне плоскости орбиты (угол φ). В этом случае можно использовать два подхода: 1) отказаться от управления по углу φ; 2) применить для стабилизации вне плоскости орбиты дополнительную реактивную тягу. В первом случае амплитуда колебаний по углу φ почти постоянна и, если начальные возмущения не велики, то колебания по углу φ практически не влияют на эффективность использования ЭДТС. Во втором случае можно использовать двигатели малой тяги, так как уровень потребной управляющей тяги очень мал (100 мН или менее). Поэтому можно использовать или электрореактивные двигатели [5], или двигатели на сжатом газе.

В этой работе предлагается адаптивный регулятор скользящего режима для управления движением по углу θ, который основан на изменении величины тока. Закон управления является адаптивным, так как учитывает изменение магнитного поля, характеристик КТС и других параметров. Для стабилизации движения по углу φ предлагается релейный закон управления с использованием двигателей малой тяги.

A. Адаптивный скользящий режим управления

Динамические уравнения могут быть переписаны следующим образом

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{\theta} \\ \dot{x}_2 = \ddot{\theta} = f_1(\mathrm{x}) + \lambda_1(\mathrm{x},t) + b_\theta u_\theta \\ \dot{x}_3 = \dot{\varphi} \\ \dot{x}_4 = \ddot{\varphi} = f_2(\mathrm{x}) + \lambda_2(\mathrm{x},t) + b_\varphi u_\varphi \end{cases} \tag{12}$$

где

$$\begin{aligned} f_1(x) &= -\dot{\omega} + 2(x_2+\omega)x_4 \mathrm{tg} x_3 - 1.5\nu^{-1}\omega^2 \sin 2x_1 \\ f_2(x) &= -\left[0.5(x_2+\omega)^2 + 1.5\nu^{-1}\omega^2 \cos^2 x_1\right] + \chi \\ b_\theta &= \frac{B'_\theta(m_2-m_1)}{2m_1m_2\cos^2 x_5}, b_\beta = \frac{1}{m_e r^2} \\ u_\theta &= I, u_\varphi = F_c, \chi = \frac{B'_\varphi I(m_2-m_1)}{2m_1m_2} \\ B'_\theta &= B_z\cos\varphi - B_x\sin\varphi\cos\theta - B_y\sin\varphi\sin\theta \\ B'_\varphi &= B_x\sin\theta - B_y\cos\theta \end{aligned} \tag{13}$$

$\|\lambda_1(\mathrm{x},t)\|_\infty \le D_1$, $\|\lambda_2(\mathrm{x},t)\|_\infty \le D_2$ содержат неопределенность и возмущения. D_1, D_2 являются положительными константами. После замены b_θ, b_φ на $\delta_\theta = 1/b_\theta, \delta_\varphi = 1/b_\varphi$, уравнение (12) переписывается в виде

$$\begin{aligned} \delta_\theta \dot{x}_2 &= \delta_\theta \ddot{\theta} = \delta_\theta f_1(\mathrm{x}) + \delta_\theta \lambda_1(\mathrm{x},t) + u_\theta \\ \delta_\varphi \dot{x}_4 &= \delta_\varphi \ddot{\varphi} = \delta_\varphi f_2(\mathrm{x}) + \delta_\varphi \lambda_2(\mathrm{x},t) + u_\varphi \end{aligned} \tag{14}$$

Если сила Ампера используется для управления только угловом движением θ, то функция ошибки и скользящая поверхность определяются следующим образом

$$\begin{aligned} e &= x_1 - x_{1d} \\ s &= ce + \dot{e} \end{aligned} \tag{15}$$

где $x_{1d} = \theta_d$ -ожидаемое значение угла θ, c - коэффициент управления. Если коэффициент δ_θ не определен, а известна лишь его оценка $\hat{\delta}_\theta$, то запишем функцию Ляпунова в виде

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2}\delta_\theta s^2 + \frac{1}{2\xi}\tilde{\delta}_\theta^2 \\ \tilde{\delta}_\theta &= \hat{\delta}_\theta - \delta_\theta \end{aligned} \tag{16}$$

Производная функции Ляпунова по времени имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \delta_\theta s\dot{s} + \frac{1}{\xi}\tilde{\delta}_\theta\dot{\hat{\delta}}_\theta \\ &= s\left[\delta_\theta c\dot{e} + \delta_\theta(\dot{x}_2 - \ddot{x}_{1d})\right] + \frac{1}{\xi}\tilde{\delta}_\theta\dot{\hat{\delta}}_\theta \\ &= s[\delta_\theta c\dot{e} + \delta_\theta f_1(\mathrm{x}) + \delta_\theta\lambda_1(\mathrm{x},t) + u \\ &\quad - \delta_\theta\ddot{x}_{1d}] + \frac{1}{\xi}\tilde{\delta}_\theta\dot{\hat{\delta}}_\theta \end{aligned} \tag{17}$$

Из (17) следует, что функция Ляпунова положительно определена. Тогда управление u_θ примет вид

$$u = \hat{\delta}_\theta(\ddot{x}_{1d} - c\dot{e} - f_1(\mathrm{x})) - k_s s - \eta\,\mathrm{sgn}(s) \tag{18}$$

где k_s, η -коэффициенты управления. С учетом (18) выражение (17) примет вид

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s[(\hat{\delta}_\theta - \delta_\theta)(\ddot{x}_{1d} - c\dot{e} - f_1(\mathrm{x})) \\ &\quad + \delta_\theta\lambda_1(\mathrm{x},t) - k_s s - \eta\,\mathrm{sgn}(s)] + \frac{1}{\xi}\tilde{\delta}_\theta\dot{\hat{\delta}}_\theta \end{aligned} \tag{19}$$

Причем коэффициент $\hat{\delta}_\theta$ определяется из дифференциального уравнения

$$\dot{\hat{\delta}}_\theta = -\xi s(\ddot{x}_{1d} - c\dot{e} - f_1(\mathrm{x})) \tag{20}$$

Если $k_s > 0, \eta > \delta_\theta D_1$, то производная функции Ляпунова примет вид

$$\dot{V} = \delta_\theta \lambda_1(\mathrm{x}, t) - k_s s^2 - \eta|s| \le -k_s s^2 \le 0 \qquad (21)$$

что обеспечивает асимптотическую устойчивость при применении предлагаемого метода управления.

B. Управление угловым движением φ

При управлении движением по углу φ используется релейный закон управления тягой двигателей:

$$F_c = \begin{cases} F_{\max}, & \text{если } \dot{\varphi} > 0 \text{ и } \varphi > \varphi_{\max} \\ -F_{\max}, & \text{если } \dot{\varphi} < 0 \text{ и } \varphi < -\varphi_{\max} \\ 0, & \text{по-другому} \end{cases} \qquad (22)$$

где величина $\varphi_{\max}$ определяет зону нечувствительности релейного закона, $F_{\max}$ -максимальная возможная тяга. Тяга (22) обеспечивает соответствующий момент силы, влияющий на колебания по углу φ. При использовании управления (22) угол φ изменяется в пределах небольшой амплитуды, а время работы двигателей малой тяги мало, что отражено в результатах моделирования.

V. Моделирование управляемого движения ЭДТС

При моделировании были приняты параметры тросовой системы, приведенные в таблице I.

ТАБЛИЦА I. Параметры тросовой системы и начальные условия движения

m_1, m_2	30 кг,6000 кг
r	3 км
Номинальные начальные условия $\theta_0, \dot{\theta}_0$; $\varphi_0, \dot{\varphi}_0$	0, 0.01рад/с 0, 0
Возмущенные начальные условия $\theta_0', \dot{\theta}_0'$; $\varphi_0', \dot{\varphi}_0'$	4град, 0.00005рад/с -3град, 0.00002рад/с
ϑ_0, ω_{r0}	0, 0
A_0, e_0	6878км,0.005
Номинальные, возмущенные и оценочные значения наклонения $i_0, i_0', \hat{i}_0$	40град, 45град, 40град
Максимальная тяга $F_{\max}$	0.5Н

Для характеристик, приведенных в таблице 1, система будет иметь начальную ошибку в положении более значительную, чем в работе [1]. Амплитуды колебаний по углам θ и φ без управления составляют около 15 и 6 град на экваториальной орбите. На наклонных орбитах (40-45 град) без использования управления амплитуда колебаний по углу φ составляет около 20 градусов. Наклонение орбиты в возмущенном случае составляет 45 град, а номинальный и оценочные значения наклонения равны 40 град. Отличие возмущенного значения наклонения от номинального приводит к различным распределениям магнитного индукции и, таким образом, влияет на движение системы. Предлагаемое замкнутое управление должно обеспечить стабилизацию системы относительно номинальной траектории при наличии ошибок в начальном состоянии и при действии рассматриваемых возмущений.

A. Перевод во вращении с помощью «прямого» метода

Здесь используется номинальный закон управления (7), который требует довольно больших величин тока. Критические величины тока рассчитываются по формуле (10). Коэффициенты управления приводятся в таблице II.

ТАБЛИЦА II. Коэффициенты замкнутого уравнении по «прямого» метода

Номинальный ток $I_{\max}$	4.51А
Наибольший ток для замкнутого управления I_{limit}	6.5А
Коэффициенты скользящего режима управления	$c = 1, \eta = 1$
Адаптивные коэффициенты	$k_s = 1, \xi = 10$

На рисунках 2-3 показаны результаты моделирования. Из рисунка 2 следует, что при использовании «прямого» метода система переходит во вращение через 2 часа. Начальная ошибка по углу θ компенсируется за ервые 0.3 часа, а ошибка по углу φ ограничена в пределах 2 градусов и конечная ошибка не превышает 1 градуса. Реактивная тяга, осуществляющаястабилизацию по углусоответствует релейному закону (22). Адаптивный алгоритм успешно изменяет обратной связи, и влияние не оминальных распределений магнитной индукции из-за отклонения наклонения не является значительным. Параметры орбиты меняются незначительно. Трос всегда натянут, а значит не провисает.

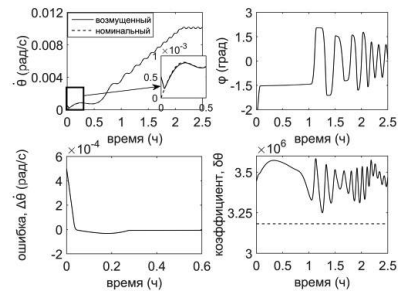


Рис. 2. Характеристики движения системы для «прямого» метода

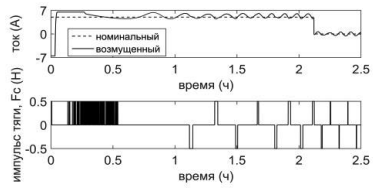


Рис. 3. Ток в тросе и тяга для «прямого» метода

Здесь необходимо отметить, что значения коэффициента $\delta_\theta = 1/b_\theta$ есть величины порядка 10^6, а это значит, что коэффициент b_θ является величиной порядка 10^{-7}. Основная причина такого большого значения δ_θ - малые значения модуля вектора магнитной индукции Земли (10^{-5}). Такие большие значения δ_θ оказывают большое влияние на величину управления. Поэтому тщательный подбор коэффициентов c и η является очень важным.

B. Перевод во вращениес помощью «прямого» метода

Величина тока задается в соответствии с законом (11), который требует значительно меньше амплитуды тока. Параметры закона управления приводятся в таблице III.

ТАБЛИЦА III. КОЭФФИЦИЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МЕТОДА «КАЧАНИЯ»

Номинальный ток $I_{\max}$	2A
Наибольший ток для замкнутого управления I_{limit}	3A
Коэффициенты скользящего режима управления	$c = 1, \eta = 0.2$
Адаптивные коэффициенты	$k_s = 1, \xi = 10$

На рисунках 4-5 показаны результаты моделирования.

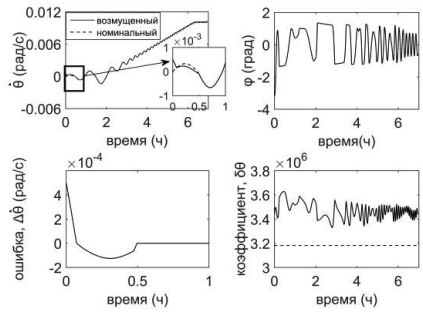


Рис. 4. Характеристики движения системы для метода «качания»

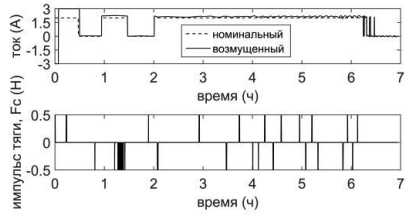


Рис. 5. Ток в тросе и тяга для метода «качания»

Из рисунков 4,5 следует, что при использовании метода «качания» система переходит во вращение через 6 часа после 2 колебаний. Тяга эффективно регулирует угловое движение по углу φ, и начальная ошибка по углу θ компенсируется за первые 0.5 часа. Адаптивный алгоритм успешно изменяет оценочное значение δ_θ в соответствии с сигналами обратной связи. Параметры орбиты меняются незначительно. Трос всегда натянут. Большие значения δ_θ также имеют место, поэтому необходимо тщательно подбирать значения коэффициентов c и η, как и для «прямого» метода.

По методу «качания» система переходит во вращение за существенно большее время, чем для «прямого» метода, а требования к величине тока снижаются на 44%. Ток может быть еще более уменьшен, если время перехода во вращение не ограничено, но это может привести к ослаблению троса в некоторые моменты времени.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе предлагается управление движением электродинамической тросовой системой при переводе ее во вращение из начального вертикального положения. Для номинальных траекторий перехода предлагаются два метода: «прямой» и метод «качания». Предлагается адаптивное управление скользящего режима, которое обеспечивает регулирование при начальных ошибках и при действии других возмущений. Эффективность предлагаемых алгоритмов управления подтверждается результатами моделирования.

В качестве развития работы можно отметить необходимость более тщательного исследования влияния изгибной деформации троса от действия распределенной нагрузки сил Ампера на качество управления. Существенное отличие формы троса от прямолинейной может привести к потере его устойчивости и провисанию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Van Pelt, M. Space tethers and space elevators. Springer Science & Business Media, 2009.

[2] Aslanov V. S., Ledkov A. S., Dynamics of tethered satellite systems – Woodhead Publishing Ltd, 2012.

[3] Ismail, N. A., Cartmell N. P., Three dimensional dynamics of a flexible Motorised Momentum Exchange Tether // Acta Astronautica. 2016. №120. – с. 87-102.

[4] Lu H., Wang C., Zabolonov Yu. M., Li A., Optimal Control of Payload Tossing Using Space Tethered System // IFAC-PapersOnLine. 2016. №49 (17). – с.272-277.

[5] Zabolotnov Yu. M. Dynamics of the Formation of a Rotating Orbital Tether System with the Help of Electro-thruster // Procedia Engineering. 2017. №185. – с. 261-266.

[6] Zhong R., Zhu Z., Optimal control of nanosatellite fast deorbit using electrodynamic tether // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2014. № 37(4). – с. 1182-1194.

[7] Chen Y., Huang R., He L., Ren X., Zheng B., Dynamical modelling and control of space tethers: a review of space tether research // Nonlinear Dynamics. 2014. № 77(4). - с. 1077-1099.

[8] Williams P. Optimal Control of Electrodynamic Tether Orbit Transfers Using Timescale Separation // Journal of Guidance Control & Dynamics. 2012. №33(1). – с. 88-98.

[9] Vas I. E., Space Station Reboost with Electrodynamic Tethers // Journal of Spacecraft & Rockets. №. 37(2). - с. 154-164.

[10] Levin E. M. Dynamic analysis of space tether missions. American Astronautical Society, 2007.

[11] Williams P., Dynamics and Control of Spinning Tethers for Rendezvous in Elliptic Orbits // Journal of Vibration and Control, 2006. №12(7). - с. 737-771.

[12] Hong, A. A. T., Varatharajoo, R., Romli F., Analytic solutions for Tethered Satellite System (TSS) subject to internal and external torques undergoing a spin-up and spin-down maneuvers. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2015. №87(6). - с. 737-771.

[13] Lu H., Aijun L., Changqing W., Zabolotnov Yu. M. Impact analysis and adaptive sliding mode control for cislunar payload transportation using spinning tether system // Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2018. №90(8). - с. 1168-1179.

[14] Белецкий В.В, Левин- М., Динамика космических тросовых систем. Наука, 1990.

[15] Воеводин П. С., Заболотнов, Ю. М., Моделированиеи и анализ колебаний электродинамической тросовой системы на орбите спутника Земли // Матем. Моделирование, 2017. №29(6). – с. 21–34.

[16] Lu H., Wang C., Li A. Ge Y.. Low Orbit Debris Mitigation Using Momentum Exchange Tether System // Journal of Beijing Institute of Technology, 2016. №25(2). – с. 31-36.

Идентификация динамических моделей управления в пространстве состояний для инженерных приложений

Хранилов В.П.
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Российская Федерация
hranilov@nntu.ru

Андреев В.В.
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Российская Федерация
vyach.andreev@mail.ru

Мисевич П.В.
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Российская Федерация
p_misevich@mail.ru

Панкратова Е.Н.
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Российская Федерация
pen_nntu@mail.ru

***Abstract* — the problem of using a dynamic control model is the identifying the models which must represent the original processes or objects in the spaces of parameters orstates. The studies in the paper make it possible to expand the use of operator identification procedures for operators of mathematical models converting them into the applied representation in spaces of states. Then in the paper,It is proposed to use the theoretical set model of the details as the object of design. This approach is used to simulate the process of controlling the array of technological and design parameters if the variants are available. Also in the articleare considered agent and scenario-situational approaches to the problem of designing and supporting technical systems. The mathematical model, which takes into account the influence of agents on the process of implementation of scenario of technical systems functioning under changing conditions, is proposed. The approaches are used for developing tools of support scenarios in software. In the article are described models, which are used for developing various applications in such subject areas as: information support of the life cycle (CALS-technologies) of electronic products, mechanical engineering, instrument making, design of information systems, including CAD and the systems of monitoring states and situational management.**

Ключевые слова - автоматизированное проектирование, математическая модель, агрегат, динамическая модель, агентный подход, сценарный подход, техническая система

I. Введение

Ведущей проблемой при использовании динамических моделей (ДМ) управления является идентификация исходной модели процесса или объекта в форме их представлений в пространствах параметров (ПП) и состояний (ПС).

Использование таких моделей позволит активно применять достижения математической теории систем для исследования поведения сложных технических и человеко-машинных систем

II. Модели

Техническая система (ТС) рассматривается как множество взаимосвязанных агрегатов, описываемых независимо от функциональных особенностей обобщенными математическими моделями (ММ) вида

$$\mathbf{\Sigma}=\{\mathbf{T},\mathbf{\Xi},\mathbf{Y},\mathbf{\Omega},\mathbf{\Psi},\mathbf{\Gamma},\mathbf{\Phi},\mathbf{H}\}[1],$$

где **T** – множество моментов времени,

X – множество состояний системы,

U –множество мгновенных значений входных воздействий,

Ω – множество допустимых входных воздействий,

Y – множество мгновенных значений выходных воздействий, определяющих выходные характеристики системы,

Γ – множество допустимых выходных воздействий,

Φ – оператор переходов, устанавливающий функциональную связь между состояниями,

H– оператор, устанавливающий связь между состоянием системы и ее выходной характеристикой, предопределяемой множеством **Γ**.

Такая кибернетическая модель определяет проектируемую ТС как «черный ящик», имеющий входы, выходы и внутреннюю конструкцию. Решающее значение для обеспечения адекватности таких моделей имеет корректное описание операторов, задающих функциональные связи между состояниями и определяющими их параметрами (**Φ**), а также способы преобразования входных воздействий в выходные характеристики (**H**).

Рассмотрим задачу проектирования распределенной ТС **Q**, состоящей из объектно-ориентированных модулей–наборов (ООН) $\mathbf{Q}_i$, реализующих процессы управления на рабочих станциях$\mathbf{V}_j$[2].

Для идентификации ММ в пространстве состояний процесс формирования ООН описывается отображением **Γ**:**M**→**Q**.При описании операций передачи модулей между базовым множеством **M**, множеством маршрутов **V** и множеством ООН – **Q** исходное отображение **Γ**:**M**→**Q**целесообразно разбить на два уровня: $\mathbf{\Gamma}_1$:**M**→**V**и$\mathbf{\Gamma}_2$:**V**→**Q**.

Доказывается [2], что универсальным математическим аппаратом для описания состояний

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

элементов проектируемой ТС $m_i \in \mathbf{M}$ с учетом неопределенности условий вхождения в различные ООН является нечеткое множество (НМ) $\tilde{A}$, заданное на базовом множестве **M** и образованное прямым отображением Г: **M→Q**:

$$\tilde{A}(\mu_l)=\{<\mu_{\Theta l}(\mu_l),\Theta>\}=\{\mu_{\Theta l}(\mu_l)/\Theta_1;$$

$$\mu_{\boldsymbol{\Theta} l}(\mu_l)/\boldsymbol{\Theta}_2;\ldots\ \mu_{\boldsymbol{\Theta} l}(\mu_l)/\boldsymbol{\Theta}_i;\ldots\ \mu_{\boldsymbol{\Theta} l}(\mu_l)/\boldsymbol{\Theta}_\mu\},$$

где $\mu_{Q_i}(m_i)$ – степень принадлежности m_i к ООН $\mathbf{Q}_i$; $n=|\mathbf{M}|$; $m=|\mathbf{Q}|$.

Состояния элементов $m_i \in \mathbf{M}$в наборах $\mathbf{V}_j$ описываются НМ:

$$\tilde{B}(\mu_l)=\{<\mu_{\varsigma\varphi}(\mu_l),\varsigma>\}=\{\mu_{\varsigma\varphi}(\mu_l)/\varsigma_1;$$

$$\mu_{\boldsymbol{\varsigma}\varphi}(\mu_l)/\boldsymbol{\varsigma}_2;\ \ldots\ \mu_{\boldsymbol{\varsigma}\varphi}(\mu_l)/\boldsymbol{\varsigma}_i;\ \ldots\ \mu_{\boldsymbol{\varsigma}\varphi}(\mu_l)/\boldsymbol{\varsigma}_\mu\},$$

где $\mu_{V_j}(m_i)$ – степень принадлежности элемента $m_i \in \mathbf{M}$ к модулю $\mathbf{V}_j$.

Состояния модулей-наборов $\mathbf{V}_j \subset \mathbf{V}$описываются НМ:

$$\tilde{B}(\varsigma_\varphi)=\{<\mu_{\Theta l}(\varsigma_\varphi),\Theta>\}=\{\mu_{\Theta l}(\varsigma_\varphi)/\Theta_1;$$

$$\mu_{\boldsymbol{\Theta} l}(\boldsymbol{\varsigma}_\varphi)/\boldsymbol{\Theta}_2;\ \ldots\ \mu_{\boldsymbol{\Theta} l}(\boldsymbol{\varsigma}_\varphi)/\boldsymbol{\Theta}_i;\ \ldots\ \mu_{\boldsymbol{\Theta} l}(\boldsymbol{\varsigma}_\varphi)/\boldsymbol{\Theta}_\mu\},$$

где $\mu_{Q_i}(\mathbf{V}_j)$ – степень принадлежности модуля $\mathbf{V}_j$ к ООН $\mathbf{Q}_i$.

Геометрической интерпретацией варианта объекта в пространстве параметров при идентификации ММ в пространстве параметров является точка в n-мерном Евклидовом пространстве внутренних параметров, в котором для каждой из n управляемых переменных выделена соответствующая координатная ось.

При моделировании процесса управления массивом конструкторско-технологических параметров в условиях наличия вариантов в качестве основы для ММ САПР предлагается использовать теоретико-множественную модель детали как объекта проектирования [3]: **P=H (X, Z, V)**.

Это дает возможность задавать описание способа преобразования параметров детали, заданных совокупностью описаний множества ее поверхностей, с целью исследования модели на предмет выявления в ней возможностей введения элементов автоматического управления, способных реализовать в формализованном виде процедуры автоматизированного проектирования для САПР.

При таком представлении проектируемой ТС, ей соответствует агрегат

$$\Sigma=[\mathbf{T, S, X, Z, \Omega, P, \Gamma, V, \Phi, H}],$$

где **T** – множество моментов времени;

S = $\{s_0,s_1,s_2,\ldots,s_n\}$ – множество дискретных состояний системы**,** представляющее множество вариантов назначения массива параметров детали со своими фиксированными наборами значений параметров;

X – множество мгновенных значений входных воздействий;

Z – множество технико-экономических требований, установленных техническим заданием;

Ω – множество допустимых входных воздействий;

P –множество параметров системы;

Г – множество допустимых выходных параметров;

V – множество внешних факторов;

Ф – оператор переходов, устанавливающий функциональную связь между параметрами;

H – оператор, устанавливающий связь между состояниями системы и ее выходной характеристикой, предопределяющей множество **Г.**

Оператор **Ф**, устанавливающий функциональную связь между параметрами, определяется с использованием регрессионных или корреляционных зависимостей, получаемых методами планирования эксперимента, либо при помощи моделей, построенных на основе искусственных нейронных сетей.

Оператор **H** задаетсятеоретико-множественным соответствием q= **[X, Z, V, P, H]** с учетом определения разных способов осуществления этого соответствия в виде процедур, реализующих зависимости

$$P_i=f_i(x_1, x_2, x_3, \ldots, x_m).$$

В работе [4,5] рассматриваются агентный и сценарно-ситуационный подходы к проблеме построения и поддержки ТС и предлагается ММ, в которой учитывается влияние агентов на процесс реализации сценария её функционирования при изменении ситуационной обстановки.

Сценарно-ситуационный подход основан на трех положениях [5].

Положение первое. Процессы в предметной области описываются при помощи категорий:

1) типовая задача (задача, которая воспроизводится в предметной области построения автоматизированной системы (АС) и ею решается);
2) сценарии (типовые и рабочие), которые конструируются из элементов порождающего сценарии множества событий. Каждое событие реализует комплекс процедур в предметной области построения АС [5].

В общем случае, каждой типовой задаче предметной области соответствует множество типовых сценариев ее решения. Каждый типовой сценарий конструируется из типовых элементов, входящих в состав порождающего сценарии множества событий.

Он поддерживает конкретный способ решения типовой задачи.

В процессе функционирования автоматизированной системы типовой сценарий трансформируется в рабочий сценарий, который «подстраивается» под постоянно изменяющиеся факторы во внешней и внутренней среде АС.

Введенные категории в совокупности описывают сценарную часть предлагаемого подхода.

Положение второе. Каждой введенной выше концептуальной единице (событие, типовой и рабочий сценарий, типовая задача) соответствует описание ситуации. В данной работе под категорией «ситуация» будем понимать структурированное множество параметров, совокупность которых позволяет:

1) провести анализ (ситуационный, логистический и другие) состояния автоматизированной системы;
2) определить, какие процедуры необходимо инициировать в АС для достижения поставленных целей.

Описание ситуации осуществляется при помощи специально разработанного теоретического примитива ситуационного портрета (СП) [5].

Атрибуты СП описания внешней среды автоматизированной системы отображают состояние программно-аппаратных элементов, которые в совокупности составляют интерфейс между АС и предметной областью ее функционирования (датчики, клавиатура, манипуляторы, порты, элементы сети и другие).

Описание в СП внутренней среды включает в себя атрибуты, участвующие в решении сформулированного выше множества внутрисистемных задач (статистика, протоколирование, интерпретация последовательности событий сценария и другие). По атрибутам описания внутренней среды производится оценка состояния автоматизированной системы с целью определения степени готовности выполнения текущих задач.

Положение третье. Рекомендуется в состав множества целей ситуационного анализа включать элемент логистического анализа процесса функционирования АС.

Для этого каждой концептуальной единице (типовой задаче, типовому или рабочему сценарию, событию, причинно-следственной связи) в ситуационном портрете выделяется множество атрибутов отображения логистической цепочки формирования исходных данных в АС. По этой логистической цепочке осуществляется определение неверно формируемых параметров.

В Древней Греции термин «логистика» означал «искусство рассуждения и выполнения расчётов». С течением времени смысл категории менялся. Сегодня «логистика» - это искусство и наука определения потребностей, а также приобретения, распределения и содержания в рабочем состоянии в течение всего жизненного цикла всего того, что обеспечивает эти потребности [5].

Логистика применима в предметных областях, где есть потоки (товаров, финансов и другие). Объектом логистического анализа в данной работе стал информационный поток. Информация формируется процедурами событий интерпретируемого рабочего сценария.

Каждое событие является «потребителем» входных параметров. В процессе выполнения процедур события генерируются параметры, которые являются промежуточными или окончательными результатами (относительно цели функционирования АС).

Применительно к нашей предметной области принцип логистики формулируется так: «Каждый востребованный и корректно сформированный параметр - в требуемое время и в необходимом месте памяти или БД» [4,5].

Некорректное или несвоевременное формирование параметра приводит к нарушению основного принципа логистики и к невозможности корректной реализации процедур события.

Факт формирования некорректных данных будем интерпретировать как «аварийную ситуацию» в автоматизированной системе. Оснащение АС средствами логистического сопровождения процессов генерации и интерпретации последовательности событий сценария преследует цель исключить «аварийные ситуации».

В рамках логистического подхода АС интерпретируется как логистическая система, целью которой является корректное формирование данных, обеспечивающих реализацию процедур интерпретируемого в данный момент события сценария. Символом **S** обозначим порождающее сценарии множество событий.

Информационное обеспечения этого типа строится на «Логистическом паспорте». Каждый паспорт ставится в соответствие каждому элементу $s_i \in S$. В нём отображено: множество идентификаторов входных параметров события, множество идентификаторов выходных параметров события $s_i \in S$, множество идентификаторов процедур проверки корректности формирования входных параметров события (по одной процедуре на входной параметр).

«Логистический паспорт» [5] события хранит совокупность данных, достаточных для:

1) выявления некорректно сформированного входного параметра события;
2) идентификациипроблемныхсобытий.

В рассматриваемой предметной области коррекция осуществляется при помощи событий специального сценария. «Логистический паспорт события» является своеобразным скелетом информационной структуры – инструментария, с помощью которого осуществляется логистический анализ сценария.

Описание алгоритмов логистической поддержки сценария приводится в [5]Логистический анализ

процесса функционирования автоматизированной системы преследует целый ряд целей.

Во-первых, он ориентирует рабочий сценарий АС на постоянное изменение, учет ситуации во внешней и внутренней среде.

Во-вторых, логистический анализ является эффективным средством отладки и сопровождения АС. Проблемы, возникающие в процессе функционирования автоматизированной системы, диагностируются в форме указателей-дескрипторов, которые определяют, в каких событиях надо искать причины проблем.

В-третьих, логистическое обеспечение автоматизированных систем, во многом, снимает проблему выделения некорректных действий со стороны пользователя (такой комплекс мер в литературе называется «защитой от дурака»).

Ошибочные действия пользователей приводят к появлению некорректных звеньев в логистических цепочках, а процедура анализа выделяет их и позволяет формировать корректирующие сценарии [6].

В-четвертых, логистическое обеспечение направлено на поддержку жизненного цикла сценария и является ключевым фактором успеха проекта в целом.

Работу такой системы описывает следующая модель. Каждому событию s_k сопоставляется функциональный модуль – элемент m_k, реализующий некоторое множество операций o_k. При своем функционировании элемент m_k использует множество исходных данных $D\_Input^{s}_{k}$.

При срабатывании модуля m_k генерируются данные-результаты $D\_Outnput^{s}_{k}$. Каждому событию s_k ставится в соответствие оператор на вход которого подаются исходные данные, а на выходе генерируются выходные данные.

Таким образом, ММ системы сводится к последовательному применению операторов-событий s_k. Сценарий формируется заданием на элементах множества событий причинно-следственных связей. Процесс функционирования ТС опишем рекуррентной сценарно-ситуационной моделью

$$\begin{cases} s^{l}_{k+1} = \xi_k(.) + \delta_k \times f(s^{\psi}_{k}, r_{j^{\psi}_{k}}) & (1) \\ r_{j^{\psi}_{k}} = \varphi(s^{\psi}_{k}, D^{k}_{system}) & (2) \\ D^{k+1}_{system} = C(s_{j^{\psi}_{k}}, D^{k}_{system}) & (3) \\ o_k = \lambda(s^{\psi}_{k}) & (4) \end{cases}$$

Переход из одного события сценария в другое описывается уравнением (1). Значение $r_{j^{\psi}_{k}}$ в (1) формируется при помощи процедур анализа ситуации (2). Динамику изменения ситуации описывает уравнение (3), которое отображает изменение в дискретные моменты времени множества параметров ситуационного описания D^{k}_{system}. Каждое событие $s^{\psi}_{k} \in S$ инициирует в предметной области функционирования ТС некоторое множество операций o_k. В модели элемент o_k связан с событием $s^{\psi}_{k} \in S$ функционалом λ (4).

Во введённой системе уравнения (1) и (2) описывают сценарную часть АС. Для описания динамики ситуационных параметров используется система (3), которая отображает изменение в дискретные моменты времени состав множества D^{k}_{system}. Использование функций $\xi_k(.)$ и $\delta_k(.)$ позволяет учитывать включение агентов в процесс реализации сценария (1), и принимают бинарные значения [0,1].

Предложенная модель (1–4) удовлетворяет аксиомам Калмана [1] и является частным случаем динамической модели описания работы, автоматизированной ТС. Особенностью предложенного математического аппарата является наличие трех составляющих, описывающих сценарную, ситуационную и логистическую составляющую процессов функционирования ТС. Эта динамическая модель отображает процессы и преследует практическую цель создания и сопровождения средств интеллектуальной поддержки ТС.

III. Пример

Задача обеспечения безопасности и защиты информации (ИБ) при использовании информационных технологий в настоящее время весьма актуальна. Рассмотрим метод разграничения доступа пользователей компьютерной сети, построенный в интерактивном режиме с элементами адаптации на основе алгоритма распределения ресурса ИБ отдельных программных модулей, с учетом потенциальных (в смысле безопасности) характеристик пользователей и параметров требуемой защищенности модулей.В качестве исходного множества **M** (ПОН) рассматривается множество проблемно-ориентированных функциональных программных модулей локальной вычислительной сети (ЛВС). В соответствии с предложенной модельюПОН отображается в множество **Q,** представляющее собой совокупность объектно-ориентированных наборов программных модулей (ООН), предназначенных для решения конкретных задач пользователей рабочих станций ЛВС и полностью соответствующих выдвинутым требованиям и ограничениям по ИБ.

Операция отображения легко описывается при помощи ориентированного взвешенного графа, вершинам и дугам которого ставятся в соответствие управляющие переменные задачи, выражающие ресурсы ИБ программных модулей и потенциал ИБ пользователей на рабочих станциях ЛВС. Факт

обращения к программному модулю или его использование соответствуют вершинам графа, факт передачи (действие) – дугам, ориентация которых соответствует последовательности выполняемых действий. Будем считать, что принятие решений, связанных с формированием системы объектно-ориентированных программных модулей на рабочих станциях ЛВС, соответствующей требованиям ИБ, аналогично распределению ресурсов безопасности отдельных программных модулей с учетом характеристик потенциальной безопасности пользователей и параметров требуемой защищенности модулей. Цель процесса распределения ресурсов – гибкое адаптивное разграничение доступа пользователей к программным модулям ПОН путем выполнения в интерактивном режиме заданного комплекса взаимосвязанных работ таким образом, чтобы при заданных характеристиках ресурсов ИБ модулей и потенциала ИБ пользователей оптимизировать выбранную целевую функцию, выражающую меру эффективности системы ИБ [6].

Алгоритм формирования модулей ООН базируется на обработке результатовоценки работоспособности и ИБ отдельных элементов при имитации процесса управления, реализуемого отдельными маршрутами **V**j. Такой способ взаимодействия процессов в предлагаемой модели позволяет рассматривать процедуруформирования ООН ЛВС в динамическом режиме. При этом становится возможным зафиксировать события добавления и исключения отдельных элементов из состава формируемого модуля ООН **Q**i при передаче их из **V**i , а при наличии альтернативных путей – события выбора, определенные заданными условиями и обработкой результатов имитации интерактивного процесса управления. Решающее значение при выборе способа формального описания предложеннойпроцедуры имеют учитываемые условия неопределенности процесса формирования маршрута **V** из исходного множества М.

Состояние элементов формируемой системы $m_i \in \mathbf{M}$с учетом неопределенности условий вхождения в различные ООН, обусловленной изменяющимися условиями управления, может быть описано нечетким множеством $\tilde{\mathbf{A}}(m_i)$, заданным на базовом множестве **Q**и образованным прямым отображением $\mathbf{\Gamma: M \to Q}$

При анализе альтернатив возможных вариантов проектного решения [6] неизбежно возникает проблема, связанная с необходимостью расчета, сравнения и распределения ресурсов ИБ отдельных элементов и модулей в структуре ЛВС. Параметры ИБ модулей и пользователей в принятой математической модели принадлежат к векторам управляемых переменных **P** и выходных характеристик **Y**. Идентифицируем параметры ИБ и компоненты векторов **P**и**Y**одного модуля$m_i \in \mathbf{M}$для случая обращения к нему *j*-го пользователя при попытке сформировать маршрут $\mathbf{V}_i$:

-p_1– параметр ИБ модуля (категория секретности);

-p_2 – параметр потенциала ИБ пользователя (форма допуска),

-p_3 – стаж работы пользователя;

-p_4 – индивидуальные характеристики пользователя, выражающие степень доверия работодателя (досье);

-$y_j = F(m_i, v_i, q_i, p_1, p_2, p_3, p_4, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4)$.

Входные параметры, формирующие функцию выходной характеристикиy_jи определяющие текущее состояние модулей относительноформируемого ООН, используются для определения $\mu(m_i)$.

Предлагается следующий вариант нахождения числовых характеристик параметров ИБ распределяемых программных модулей: каждому виду данных (в зависимости от степени его конфиденциальности) при помощи метода экспертной оценки присваивается своя числовая характеристика, определяемая безразмерным числом, находящимся в нормированном диапазоне [0…1].

Потенциал ИБ пользователей может оцениваться на основе сложившегося опыта защиты информации государственными органами безопасности и специальными режимными подразделениями предприятий. В качестве составляющих параметров потенциала ИБ пользователя рассматриваются:

-категория допуска;

-стаж работы пользователя;

-индивидуальные характеристики пользователя, выражающие степень доверия работодателя (досье).

Числовые значения потенциала ИБ определяются также при помощи метода экспертной оценки присвоением характеристик, определяемых в нормированном диапазоне [0…1].

С использованием значений параметров можно сформировать следующие критерии ИБ системы:

-критерий разрешения модуля к использованию (включению в набор-маршрут v_i) – $K^+ = (p_2 - p_1) \geq 0$;

-аддитивный критерий безопасности –$K_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)$;

-мультипликативный критерий безопасности –$K_\Pi = \prod_{i=1}^{n} (p_1 * p_2 * p_3 * p_4)$;

-критерий эффективности – $K_\Delta = \sum_{i=1}^{n} |(p_2 - p_1)|$.

Основным показателем, определяющим $\mu_{Qj}(m_i)$по критериям ИБ, аналогично задачам формирования ИС по иным критериям [2-6], можно считать f – частоту обращения к модулю (при условии его свободной передачи) и f^+ – частоту использования (при передаче в случае выполнения условия $(p_2 - p_1) \geq 0$). При этом$f = n_{Qj} / n$, а $f^+ = n^+_{Qj} / n$, где n_{Qj} – количество передач модуля на станцию пользователя; n^+_{Qj} – количество передач модуля на станцию пользователя при выполнении условия $(p_2 - p_1) \geq 0$; n – общее суммарное количество передач модуля на этапе опытной эксплуатации (имитации) работы системы

путем формирования промежуточных (пробных или технологических) наборов $\mathbf{V}_j$.

Таким образом, формирование значений μ(mi)производится на основе обработки частных значений f, f^*, K_Σ, K_Π, K_Δ. Основной операцией при вычислении μ(mi) является приведение ее значений в единый диапазон изменения безразмерных величин [0…1] – нормировка. Для выполнения нормировки могут использоваться разнообразные нормирующие преобразования (функции) [3,6], выбор которых определяется условиями поставленных задач.

Представляемая модель распределения ресурса ИБ позволяет сделать выводы о работоспособности предлагаемого метода гибкого разграничения доступа пользователей к ЛВС. Относительная гибкость и способность адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования системы обеспечиваются:

-интерактивным режимом формирования программного обеспечения станций сети с активным участием пользователя;

-применением теоретико-множественного описания в сочетании с методами векторной оптимизации;

-определением адекватной структуры параметров безопасности системы, ориентированной на существующие законодательные нормы в области безопасности информации;

-применением специально разработанных способов математической обработки этих параметров, обеспечивающих сопоставимость разнородных показателей безопасности;

-применением математического аппарата нечетких множеств, позволяющего внести в процесс принятия решений необходимую гибкость и способность адаптироваться к изменяющимся условиям обеспечения информационной безопасности.

Применение разработанной модели и метода разграничения прав доступа пользователей, в отличие от используемых в современных ТС, позволяет проводить адаптацию системы ИБ в интерактивном режиме без влияния на текущие процессы функционирования пользователей и без грубого вмешательства в их производственную деятельность.

IV. Заключение

Предложенные методы формализации процесса управления проектированием сложных ТС, использующие ДМ с идентификацией внутренних операторов, нашли применение при разработке различных приложений, предназначенных для реализации технологий непрерывной информационной поддержки жизненного цикла (CALS-технологий) изделий радиоэлектронных средств [2], в приборостроении [2,3], в машиностроении [3], при проектировании информационных систем [2–6], в том числе САПР [3] и систем мониторинга состояний и ситуационного управления [4,5], а также адаптивного управления разграничением прав доступа пользователей к вычислительной сети с целью защиты информации [6].

Список литературы

[1] Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем / под. ред. Я.З. Цыпкина.– М.: Мир, 1971.– 400 с.

[2] Хранилов В.П. Классификация состояний в динамических дискретных системах распределения вычислительных ресурсов информационных систем // Материалы международного симпозиума INTELS`2010; под. ред. К.А. Пупкова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С.90-94.

[3] Хранилов В.П., Тесленко Е.В., Андреев В.В. Анализ динамической модели управления конструкторско-технологическим взаимодействием в САПР // Труды НГТУ. №5(102). 2013. С.177-182.

[4] Мисевич П.В. Динамическая модель функционирования автоматизированной системы // Системы управления и информационные технологии, 2008, 3.1(33). С.175-179.

[5] Мисевич, П.В. Сценарно-ситуационный подход к проектированию средств интеллектуальной поддержки процесса функционирования автоматизированных систем // Системы управления и информационные технологии.2007. N2.1(28). - С. 166-171.

[6] Хранилов В.П. Интерактивное распределение доступа пользователей к программным модулям вычислительной сети/ В.П. Хранилов, Д.В. Прохоров // Вопросы защиты информации. 2007. №2.С.51-59.

Разработка базы знаний для интеллектуальной поддержки принятия решений в процессе управления инновационным проектом

Черняховская Л.Р.
Уфимский государственный авиационный технический университет
Уфа, Российская Федерация
lrchern@yandex.ru

Низамутдинов М.М.
Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук
Уфа, Российская Федерация
marsel_n@mail.ru

***Abstract* — The paper deals with a problem of organizing the intellectual decision making support in innovative projects management based on the knowledge base. The urgency of the task directed on managing the economic systems innovative development in current competitive market conditions is substantiated. Existing approaches and tools to modeling and decision support in strategic management of the developed territorial systems are considered. The paper also introduces an approach to the knowledge base development for intellectual decision support in innovative project management, based on the ontological analysis of knowledge acquisition from various sources. The effective tools to forming the strategic planning innovative system at the regional level, which could ensure the integration of potential innovative projects and programs in the existing model of the reproduction process are presented. One of the main properties of knowledge management systems is emergence, due to which the interaction between specialists based on formalization of knowledge representation and processing in intellectual components development (ontology, knowledge base) contributes to the creation of new knowledge. An advantage of the ontology-based approach to innovation process management is the semantic integration of data and knowledge for the decision support system. It is proposed on the basis of ontological engineering to form a comprehensive tool to development of an integrated model for representing and processing of knowledge at various stages of the innovative projects management process. Further study logic involves development of an integrated ontology that combines a set of ontologies formed to describe the various fields of specialists knowledge in the field of innovative project management, which will provide a clear understanding of the subject concepts, as well as the rules and cases of decision-making based on them. The proposed approach to organizing the intellectual decision support system is focused on the use of public administration in determining the parameters of medium-term development of Russian Federation, as well as in development of measures and mechanisms for social, economic and budgetary policy. Increasing the degree of scientific validity and accuracy of the forecast estimates will reduce the risks in adoption and implementation of management decisions. In theoretical aspect is proposed to develop at the regional level the territorial systems management models and to form the scientific foundation for further development and comprehensive utilization technology of adaptive management and imitation based on modern intelligent information technologies applied for solving the problem of strategies and programs justification in innovative development in Russian regions.**

Ключевые слова — стратегическое управление, инновационное развитие, инновационный проект, поддержка принятия решений, база знаний, онтологический анализ

I. Введение

Стратегическая для субъектов Российской Федерации задача выхода на инновационную модель развития на сегодняшний день вряд ли может быть решена без масштабного использования передовых технологий и новаций, обеспечивающих перехода на новый технологический уклад, основанный на производстве товаров и услуг с высоким уровнем добавленной стоимости. Другая приоритетная задача – построение собственно инновационно ориентированной системы стратегического планирования, способной обеспечить интеграцию инновационных проектов и программ в имеющуюся, весьма инерционную модель воспроизводственного процесса, оценивать воздействие инновационных компонент на развитие экономики в целом, взаимно адаптировать и синхронизировать данные процессы в пределах рассматриваемого цикла стратегического планирования.

Таким образом, актуализируются проблемы разработки методов планирования инновационного развития, позволяющих учитывать данные особенности. На текущий момент решение задачи связано с множеством негативных факторов практического свойства, в том числе, несогласованностью целей и задач, недостаточной системностью осуществляемой экономической политики, потребностью в применении полнофункциональной системы анализа и эффективного применения фактографической информации и аккумулированных знаний, а также имеющимися пробелами в методическом обеспечении задач стратегического планирования на уровне субъектов Российской Федерации. В результате имеет место неудовлетворительное качество разрабатываемых прогнозных оценок по ключевым показателям развития регионов, включая программы и стратегии инновационного развития, что определяет необходимость их многократной корректировки непосредственно в рамках практической деятельности региональных органов власти и управления.

В сложившихся условиях последующее совершенствование подходов к стратегическому планированию территориального развития нуждается в качественном переосмыслении, обусловленного необходимостью учета перманентных изменений

Исследование проводится при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-00-00345 (18-00-00238).

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

характеристик и условий в рамках глобальной конкурентной среды, их воздействия на инновационное развитие. В данных условиях, разработка инновационных программ не только на долгосрочный, но и на среднесрочный период нуждается в применении алгоритмов учета интересов и адаптации стратегий функционирования экономических субъектов различного уровня, использования процедур согласования, а далее – совместной реализации, мониторинга и корректировки ключевых показателей развития региона.

В рассматриваемом контексте, действенным инструментарием развития методов стратегического планирования могут выступить перспективные технологии поддержки принятия решений (ППР) на базе методов инженерии знаний и имитационного моделирования, обеспечивающие эффективную информационную поддержку в ходе разработки и реализации программ инновационного развития на уровне субъектов Российской Федерации.

II. Анализ подходов и инструментальных средств

Исследование текущего уровня разработок по изучаемому вопросу подразумевает комплексный анализ подходов к стратегическому планированию территориального развития, проблем развития инновационной экономики и созданию систем поддержки принятия решений (СППР). Вместе с тем, отдельно необходимо выделить аспекты формирования экономико-математических моделей (ЭММ), используемых в данных сферах и являющихся, в некоторой мере, связующим звеном.

В отдельности, указанные направления имеют уже наработанную научную основу. В частности, теория инновационной экономики была заложена еще в начале прошлого века Й. Шумпетором, предложившим базовое определение и классификацию типов инноваций. Инновационным процессам отводится важное место в исследованиях длинных волн Кондратьева, диффузий инноваций К. Фримена и др. Сегодня лидирующие в научно-технической сфере государства мира, сформировали постиндустриальное общество, с доминированием инновационной экономики.

Также следует отметить теорию технологических укладов, рассматриваемую во взаимосвязи с проблемами инновационного развития страны (С.Ю. Глазьев, Д.С. Львов, К. Перес, Ю.В. Яковец и др.). Обращает на себя внимание, что проводимые в этой области исследования носят в существенной мере характер лишь качественного описания инновационных процессов, и зачастую не направлены на количественное обоснование параметров взаимовлияния инноваций и социально-экономического развития региона и, в том числе, построения соответствующих стратегических прогнозов и планов развития.

На сегодняшний день становится очевидным, что с технологической позиции решение этой задачи невозможно без разработки специальных методов ППР, включая системы класса DSS (ERP, OLAP, DataMining, CRM и т.д.). Но и в данном случае существующие разработки ориентированы на решение проблем микроэкономического уровня, в том числе, в рамках задачи обеспечения функционирования отдельных компаний – начиная от планирования ресурсов организации и управления проектами, до организации ППР в работе со слабоструктурированными данными. В рамках макроэкономической проблематики, в частности, для разработки планов инновационного развития субъектов Российской Федерации, данные системы фактически не использовались. Проводимые единичные исследования в рассматриваемой области (например, информационно-аналитическая система поддержки принятия решений по управлению инновационной деятельностью в регионе [1], СППР по стратегии инновационного развития региона [2] и т.д.) не в полной мере отражают весьма существенное свойство региональной системы как адаптивность поведения базовых экономических агентов. Кроме того, имеется ряд работ, носящих сугубо теоретический и/или отраслевой характер [3], и не адаптированных для использования в реальной практике стратегического планирования на макроуровне.

В рамках проблематики моделирования развития региональных систем аналогично рассматриваются различные подходы, в том числе модели общеэкономического равновесия; модели, ориентированные на применение вероятностно-статистических методов; имитационные модели; модели, базирующиеся на применении различного типа интеллектуальных информационных технологий. В основном, модели, применяемые на практике, интегрируют различные подходы. В мировой науке и практике примерами моделей, основанных на балансовом и эконометрическом методах, являются модель «LIFT», «Уортонская годовая модель экономики США», «Модель налогово-бюджетной политики США», «Брукингская модель экономики США» и др.

В числе отечественных моделей можно отметить модельно-программные комплексы «СИРЕНА» и «СИРЕНА-2» (ИЭОПП СО РАН), модельный комплекс «ПОЛИГОН-2» (Новосибирский государственный университет), модель «Russian Interindustry Model» (ИНП РАН), «Эконометрическая модель экономики России», «CGE-модель социально-экономической системы России со встроенными нейронными сетями» (ЦЭМИ РАН), «Модель региона Российского Севера» (Сыктывкарский государственный университет), модель «Губернатор», «Агент-ориентированная модель г. Москвы» (ЦЭМИ РАН) и др. Многие комплексные информационно-аналитические системы базируются на применении методов имитационного моделирования, включая широко применяемый в практике государственного и муниципального управления информационно-аналитический комплекс «Прогноз» (ЗАО «Прогноз»).

Одновременно с этим следует отметить, что представленные модели, во многих случаях, не в полной мере воспроизводят особенности инновационного развития субъектов Российской Федерации, так как не включают описания характеристик инновационной деятельности как управляемого адаптивного процесса. Вместе с тем, ряд моделей, построенных, в том числе, на основе регрессионных уравнений, утрачивают свои прогностические возможности в условиях трансформации экономики в связи с недостаточным

учетом адаптивных свойств элементов территориальной системы, а, следовательно, не могут выступать в качестве основы для разработки СППР. В связи с этим, несмотря на значительное количество исследований по рассматриваемой тематике, до сих пор не решены в полной мере проблемы, связанные с методическими и практическими вопросами организации ППР, в частности, в части системного моделирования инновационных процессов на региональном уровне, более эффективного использования интеллектуальных информационных технологий на базе методов инженерии знаний.

III. РАЗРАБОТКА БАЗЫ ЗНАНИЙ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

В последние годы большое внимание уделяется становлению "экономики знаний", как высший этап инновационной экономики [4]. Проблемы поддержки принятия решений на основе применения баз знаний рассматриваются в научных исследованиях российских и зарубежных ученых В.А. Виттиха, С.Н. Васильева, Б.Е. Федунова, Н.И. Юсуповой, Т.А. Гавриловой, В.И. Васильева, Н.К. Загоруйко, A. Aamodt, Hart A. [5-10]. Приобретение и накопление знаний особенно важно для реализации инновационных технологий. Инновационный процесс, наряду с формальными механизмами управления, обеспечивает основу для интеграции неформальных механизмов координации, целью которой является интеграция существующих явных и неявных знаний, а также их накопление и использование для обоснования управленческих решений. Одним из основных свойств систем управления знаниями является эмерджентность, благодаря которой взаимодействие специалистов на основе формализации представления и обработки знаний при разработке интеллектуальных компонентов (онтологии, базы знаний) способствует созданию новых знаний. Ключевыми аспектами процесса накопления знаний являются совместное получение знаний партнерами, сотрудничество и/или борьба за использование знаний. Люди делают знания явными и обобщают опыт выполнения различных инновационных проектов.

Разработка баз знаний предполагает сбор и анализ знаний, полученных из различных источников: стандартов управления проектами, документов, регламентирующих процесс управления проектом, знаний и опыта экспертов, а также формализация этих знаний в соответствии с определенной моделью представления знаний. В области искусственного интеллекта разработаны различные модели представления знаний и способы разработки баз знаний (табл. 1).

Участники проекта (заказчик, руководитель проекта, проектировщик, подрядчик, консультант), а также представители финансовых, юридических, государственных организаций реализуют различные интересы в процессе осуществления проекта, формируют свои требования в соответствии со своими локальными целями и оказывают влияние на реализацию проекта. Поэтому одним из факторов неопределенности в процессе принятия решений является несогласованность субъективных оценок альтернатив специалистами, обладающими разными компетенциями [11].

Дальнейшая логика исследования предполагает разработку интегрированной онтологии, объединяющей комплекс сформированных онтологий для описания различных областей знаний специалистов в области управления инновационными проектами, которая позволит обеспечить однозначное понимание концептов в рассматриваемой предметной области, а также построенных на их основе правил и прецедентов принятия решений.

ТАБЛИЦА I. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗНАНИЙ

Интерпретация знаний из различных источников	**Методы извлечения знаний**		
Приобретение экспертных знаний	***Коммуникативные методы извлечения знаний***		***Визуальное моделирование обработки знаний***
	Пассивные методы	***Активные методы***	
	Приобретение знаний в диалоге с экспертами Наблюдение Получение и обработка экспертных оценок	Мозговой штурм Метод Дельфи Метод сценариев Анкетирование Экспертные игры	Объектно-ориентированный анализ и моделирование Когнитивные карты Структурированный анализ сценариев
Интеллектуальный анализ данных	***Методы индуктивного обучения***	***Методы поиска ассоциаций***	***Классификация и кластерный анализ***
	Индукция правил на основе примеров с применением алгоритма ID3 Построение деревьев решений с применением алгоритмов C4.5	Регрессионный анализ Поиск ассоциативных правил Причинно-следственные модели	Нейронные сети, метод k-ближайших соседей Байесовский классификатор CART (Classification and Regression Tree)
Формализация знаний на основе текстов	***Автоматизированный лингвистический анализ текстовых документов***		
	Морфологический анализ	Синтаксический анализ	Семантический анализ
Формирование знаний на основе прецедентов проблемных ситуаций	Создание базы прецедентов Классификация прецедентов	Поиск ближайших прецедентов	Адаптация решений и занесение новых прецедентов в базу знаний
Онтологический анализ проблемно-ориентированных областей знаний и создание онтологий, включающих полученные фрагменты знаний			
Разработка интегрированной онтологии			

Разрешение сложных проблемных ситуаций требует соответствующих методов и алгоритмов поддержки принятия коллективных решений, от эффективности которых во многом зависит качество результатов проектирования [12]. Предложен способ принятия коллективных решений с применением управления знаниями в области инновационной деятельности, включающий применение комплекса моделей, методов и средств информационно-аналитической поддержки на основе технологий инженерии знаний, системного сочетания знаний и опыта экспертов

IV. Заключение

В рамках предложенной методологии решается задача интеграции моделей и методов поиска решений в базе знаний с применением методов оптимизации и интеллектуального анализа данных, представленных в онтологии, с целью обеспечения обоснованности и точности принимаемых решений. Для системной интеграции предложенных методов и моделей предполагается разработка интегрированной онтологии, удовлетворяющей информационные потребности инновационного проекта в целом. Оценка эффективности применения разработанной базы знаний реализуется с применением методов имитационного моделирования в том числе, для экспериментальной оценки эффективности принятия решений с применением разработанных средств интеллектуальной поддержки принятия решений.

В целом, предложенный подход к организации интеллектуальной системы поддержки принятия решений ориентирован на использование органами государственного управления в рамках определения параметров среднесрочного развития субъектов Российской Федерации, а также при разработке мер и механизмов социальной, экономической и бюджетной политики. Повышение степени научной обоснованности и точности прогнозных оценок позволит снизить риски при принятии и реализации управленческих решений. В теоретическом аспекте предложенные разработки систематизируют накопленный отечественный и мировой опыт в области разработки моделей управления территориальными системами регионального уровня и формируют научный задел для дальнейшей разработки и комплексного использования технологий адаптивного управления и имитационного моделирования на базе современных интеллектуальных информационных технологий применительно к решению поставленной задачи обоснования стратегий и программ инновационного развития регионов России.

Список литературы

[1] Палюх Б.В., Какатунова Т.В. Нечеткая когнитивная карта как инструмент моделирования инновационной деятельности на региональном уровне // Программные продукты и системы. 2012. № 4. С. 128–131.

[2] Захарова А.А. Некоторые аспекты разработки информационной системы поддержки принятия стратегических решений об инновационном развитии региона // Современные наукоемкие технологии. 2007. № 9. С.27-29.

[3] Антамошкин А.Н., Антамошкина О.И., Ходос Д.В. Моделирование основных этапов формирования программы инновационного развития// Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. 2010. №4(30). С. 204-206.

[4] В.Л. Макаров. Экономика знаний: уроки для России. Вестник Российской Академии Наук . том 73 № 5 стр. 450 (2003).

[5] Виттих В. А. Интеграция знаний при исследованиях сложных систем // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 1998. № 5.

[6] Васильев С.Н., Жерлов А.Б., Федосов Е.А., Федунов Б.Е. Интеллектное управление динамическими системами. – М.: Физико-математическая литература, 2000. – 152 с..

[7] Методические аспекты искусственного интеллекта [Электронный ресурс]: [монография] / М. Б. Гузаиров, Н. И. Юсупова [и др.]. — Электронные текстовые данные - Москва: Машиностроение, 2014..

[8] Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учеб. пособие. – М.: радиотехника, 2009. -392 с.

[9] Гаврилова Т. А., Кудрявцев Д. В., Муромцев, Д. И. Инженерия знаний. Модели и методы: учебник. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 324 с.

[10] Amodt, A. & Plaza, E. Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches. AI Communications, 7(i). 1994. pp 39-59.

[11] Искусственный интеллект: Кн. 1. Системы общения и экспертные системы. Справочник / под ред. Э.В. Попова. – М.: Радио и связь, 1990. – 464 с.

[12] Поддержка принятия решений при стратегическом управлении предприятием на основе инженерии знаний / Под ред. Л. Р. Черняховской. – Уфа: АН РБ, Гилем, 2010. – 128 с.

Трехмерное цифровое моделирование в технологиях санации загрязненной углеводородами геосреды, как базис управления техногенными системами

Чертес К.Л.
Кафедра ХТ и ПЭ
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
Самара, Российская Федерация
chertes2007@yandex.ru

Пыстин В.Н.
Кафедра ХТ и ПЭ
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
Самара, Российская Федерация
vitaliy.pystin@yandex.ru

Петренко Е.Н.
Кафедра ХТ и ПЭ
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
Самара, Российская Федерация
SHN.007@mail.ru

Abstract - The problem of modeling of open, multicomponent and non-stationary natural and man-made system, represented by geomedium, oil lens and structures, are considered in this paper. This system is open and evaluated by a wide range of parameters. It is necessary to have reliable information about the current state and relationships of all main elements to manage such complex systems.

The information about the genesis, dynamics of parameters allows not only to assess the state of the system, but also help to predict its changes in space and time. In this connection, recommendations are given for the study, assessment of the state and migration of accumulated hydrocarbons in the geological environment using the methods of numerical and digital modeling. Currently, modeling is used for oil production enterprises in assessing the reservoir capacity and flow rate at natural hydrocarbon deposits. It should be noted the considered system differs significantly from natural deposits of oil. Therefore, the authors introduce parametric adjustments to the description of the natural and man-made system. In addition, the man-made lens makes a negative impact on the environment. It sets the task of not only tracking the behavior of the lens in the geomedia and the use of accumulated hydrocarbon resources, but also the cleaning of rocks after the recovering of the useful product.

Physico-chemical method of purification of geological environment from the pollutants of oil origin with the use of surfactants was proposed to reduce man-induced load exerted by the lens hydrocarbons. The selection of conditions for injection of reagents into the geomedium, the parameters of their migration, the locations of injection wells was also determined by the solution of the problem of modeling the system of elements in the geomedium, oil lenses and structures. This methods make it possible to predict of the behavior of the system and to develop a plan of measures for its liquidation.

Ключевые слова — управление системой, цифровое моделирование, очистка геосреды.

I. Введение

Геосреда является сложной совокупностью элементов в составе почво-грунтов, пород зоны аэрации, подземных и поверхностных вод, ландшафтов. Каждый из этих элементов, включая десятки субэлементов, охватывающих различные типы горных пород, видов инженерно-экологических элементов и их геоэкологических особенностей, а также отдельные геоморфологичесие показатели, включая формы рельефа, фаций и урочищ формируют природную составляющую геотопа. Техногенная часть представлена объектами капитального строительства, технологическими установками, сооружениями централизованного водоснабжения.

Многообразие элементов, входящих в состав геосреды, делает её сложной, многопараметрической системой. Усложнению структуры и свойств природно-техногенной системы способствуют воздействия хозяйственной деятельности, приводящие к формированию специфических горизонтов в том числе нефтяных линз и структурно-слоевых элементов таких как проливы сырья и продукта, деградация грунтов, механические элементы, измененные формации, зоны разгрузки поверхностных и подземных вод.

Все классические методы оценки состояния нарушенных техногенных систем подразумевают под собой определение формы, протяженности, состава, степени деградации для последующего восстановления геологической среды. Методы оценки предполагают использование инженерно-геодезических, инженерно-геологических и инженерно-экологических, изысканий. При этом наряду с замерами поверхности используют конвертное бурение загрязненной горной толщи с отбором аналитических образцов с последующей камеральной обработкой. Как показывает опыт затраты на изыскания и оценку состояния геотопа составляют до 30-40% всех вложений на очистку. Кроме того, известные методы изысканий трудоемки, используют устаревшие методы и длительны по времени, а также осложнены аналитической обработкой полученных данных. Для снижения затрат на исследование природно-техногенной системы и совершенствования процесса анализа и интерпретации полученных данных предполагается широкое внедрение трехмерного цифрового моделирования нарушенной геосреды. Данное направление выступает базисом управления техническими и техногенными системами на всех этапах работы с ними:

- рекогносцировочное и аналитическое исследование системы и входящих в неё элементов;
- анализ и структуризация данных, полученных в результате изысканий;
- интерпретация с учётом целей изысканий;
- подбор методов ликвидации загрязнения;
- прогноз состояния изучаемой системы;

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

Таким образом модель системы позволяет предсказать характер, структуру загрязнения конфигурацию загрязненных фрагментов и прогноз их перемещения во времени и пространстве.

II. Моделирование в смежных областях

Трехмерное цифровое моделирование применяется для полигонов ТКО, где наряду с графиками температуры, влажности, зольности, плотности свалочного грунта составляются и широко используются матрицы состояния полигона [1].

Статическое моделирование применяют для оценки шламонакопителей [2, 3, 4], а также для выявления наиболее эффективных методов рекультивации накопителей шламов водного хозяйства. Примеры подобных профилей на рисунке 1.

Представленные на рисунке профили фрагментов нарушенной геосреды строились с использованием методов обработки многомерных данных. Кроме того, трехмерное цифровое моделирование позволяет получать хемометрические профили, а следовательно, не только выделять нарушенные неоднородные фрагменты геосреды, но и намечать методы восстановления, логически соответствующие характеру загрязнений. В качестве примеров можно привести кондиционирование, консолидирование, упрочнение скелета, биодеструкцию в аэробных и анаэробных условиях. Данные технологии являются авторскими [5, 6, 7, 8]. Воздействию технологий подвергаются горные породы в диапазоне глубин 1-8 метров.

Данные зоны распространены при техногенном восстановлении почв и грунтов зоны аэрации и предполагают механическое извлечение грунтов с вывозом на специализированные площадки или гомогенизацию без извлечения. Такая глубина соответствует длине вылета стрелы экскаватора. Моделирование в условиях средних глубин залегания

Нефтяные линзы под площадками НПЗ, образовались в результате аварийных проливов с последующей инфильтрацией нефтепродуктов.. Центрами деградации геосреды выступают резервуарные парки, трассы нефте- и продуктопроводов, нефтебазы и другие объекты нефтегазового комплекса. Линейное распределение загрязнение происходит на десятки километров от источника загрязнения. Глубина инфильтрации составляет десятки-сотни метров, что значительно больше, чем при полигонном захоронении отходов. Водная составляющая способствует миграции нефтяной линзы в сопредельные горизонты.

Воздействие на грунты начинается с глубины более 10 метров и до глубины 2-3 го горизонтов водоупора. В таких условиях невозможно и нецелесообразно извлекать загрязненные породы. Поэтому лидирующим способом является обустройство нагнетательных скважин и последующая закачка реагентов через толщу без нарушения сплошности среды до горизонтов водоупоров. Сохранение структуры геосреды позволяет определять и предсказывать поведение загрязнений в толще, что обуславливает необходимость проведения оценки состояния объекта с использованием трехмерного цифрового моделирования.

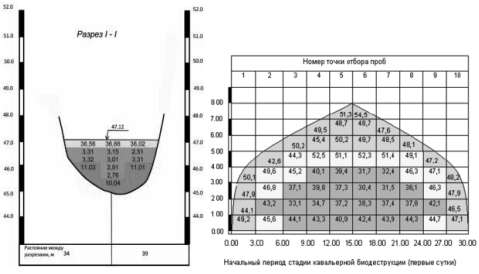
Воздействие на поллютант с использованием системы нагнетательных скважин требует создания не просто статической трехмерной модели, а динамической, которая позволит контролировать процесс санации. В связи с этим, требуется адаптация существующих подходов и программ для оценки динамического состояния нарушенной геосреды на глубинах до 100 метров, которая не мыслима без использования суперкомпьютера [9]. Именно на такие глубины распространяется вертикальная составляющая фронта перемещения нефтепродуктов.

Численные методы математического моделирования природных месторождений предполагают рассмотрение и интерпретацию природно-техногенной системы как фильтрационную, компрессионную модель.

Моделирование строится в два этапа по аналогии с природными месторождениями нефти. Первый этап представляет собой построение геологической модели, а второй этап – гидродинамической.

В основе первой лежат геологические, фильтрационные характеристики среды, такие как стратиграфическое распределение пластов, расположение эксплуатационных и наблюдательных скважин с привязкой к координатам, рельеф, мощность пластов, включая слой нефтепродуктов и др. На основании данных геологической модели получают данные о запасах углеводородов в техногенной залежи, которые позволяют оценить экономическую целесообразность дальнейшей разработки и создаёт граничные условия к подбору методов эксплуатации или ликвидации линзы.

шурф	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
абс. отм.												
70.00	0,79									0,71		
69.00	0,63	0,74							0,76	0,67		
68.00	0,59	0,70	0,64					0,68	0,70	0,56	0,60	
67.00	0,50	0,57	0,55	0,56			0,60	0,56	0,59	0,55	0,57	
66.00	0,49	0,54	0,54	0,54	0,52	0,54	0,54	0,53	0,55	0,54	0,54	0,52
65.00	0,49	0,41	0,54	0,46	0,55	0,50	0,59	0,58	0,52	0,53	0,41	0,47
64.00	0,44	0,49	0,44	0,58	0,42	0,47	0,49	0,46	0,41	0,45	0,48	0,57
63.00	0,32	0,48	0,47	0,43	0,40	0,49	0,49	0,49	0,49	0,34	0,50	0,46
62.00	0,23	0,27	0,22	0,26	0,24	0,35	0,28	0,30	0,28	0,38	0,34	0,26
61.00	0,24	0,37	0,37	0,24	0,38	0,34	0,23	0,26	0,32	0,33	0,35	0,35



а) Матрица коэффициента свалочного тела, м/сут (красным – аэробная зона, , желтым – переходная, голубым – анаэробная) [2]
б) Цифровая матрица состояния: содержание минеральной и органической части в техногенном образовании [3]
в) Температурная модель состояния компостной смеси (зелёным – зона аэробиоза, желтым – замедленного аэробиоза, серым – анаэробная [4]

Рис. 1. Примеры моделей

Построение гидродинамической модели основано на основных характеристиках углеводородного флюида: качественный и количественный состав, плотность, его вязкостные характеристики, а также параметры среды такие как водо- и нефтенасыщенность, определяющие движение нефтепродуктов в геологической среде. Так же такая модель позволяет увязать геологическую систему, содержащую в себе техногенную залежь с поверхностными водными объектами, артезианскими водозаборами и подземными водами в целом.

Гидродинамическая модель позволяет:

- моделировать поведение углеводородных флюидов в геологической среде с учётом внешних факторов;
- интерпретировать и предсказывать направление и скорость движения линзы в сторону областей разгрузки;
- предлагать и обосновывать расширение или сокращение сети наблюдательных и добывающих скважин;
- предлагать оптимальные периоды и режимы извлечения нефтепродуктов;
- выбирать рациональные условия и режимы для увеличения объёмов добычи нефти и закачки реагентов для восстановления нарушенной геологической среды;
- подбирать составы реагентов в соответствии с их химическими свойствами и пространственными характеристиками.

Всё это позволяет оценивать текущее состояние природно-техногенной системы, определять основные параметры, от которых оно зависит. Моделирование сложных систем позволяет работать на перспективу: прогнозировать генезис техногенной залежи, а значит оценивать риски её дальнейшего распространения и своевременно принимать обоснованные решения по её контролю и управлению. Понимание граничных условий исследуемой системы, лимитирующих факторов позволяет выбрать те из них, которые наиболее просто поддаются контролю, управлению и экономически целесообразны.

На основании данных фондовых материалов, изысканий, а так же результатов мониторинга, который продолжается в настоящее время, была создана геологическая трёхмерная модель (представлена на рисунке 2).

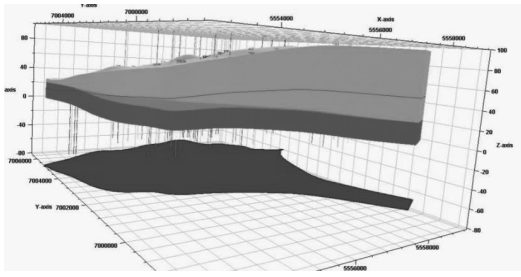


Рис. 2. Трехмерная модель

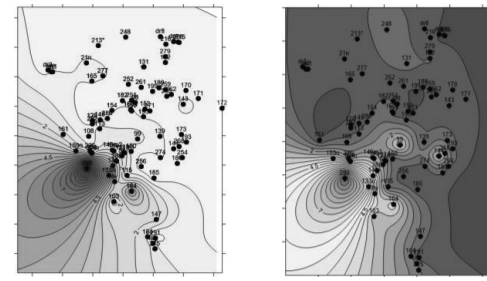
Задача построения трёхмерной модели нефтяной линзы осложнена необходимостью адаптации программного обеспечения, предназначенного для природных месторождений нефти. Среди значительных отличий природных и техногенных залежей можно выделить: давления и температура в условиях пласта, геологическая природа и состав пластов, глубина залегания нефтеносного горизонта и его состав. Самой главной особенностью рассматриваемого объекта является гидрологическая связанность с поверхностным водным объектом, подземными водами, артезианскими водозаборами и техногенными нагрузками на территорию.

III. Техногенная линза как система вынужденных колебаний

Подход к техногенной линзе как к фильтрационной системе не достаточно полно описывает предлагаемую систему, так как она находится в верхних частях геосреды и подвержена влиянию не только природных объектов, но и техногенных.

Изменение режима водопотребления, а так же сезонные изменения уровня воды в паводково-меженный период приводит к колебанию линзы, как по вертикальному профилю, так и её пульсации в горизонтальной плоскости. С учётом воздействия со стороны элементов разгрузки подход можно предложить как адаптацию существующих программа под условия залегания техногенной залежи, так и рассматривать нефтяную линзу как систему вынужденных колебаний. В отличие от природных сырьевых месторождений загрязнение техногенной геологической системы должны оцениваться своими амплитудами, частотами, периодами и фазами колебаний.

Пример цифровой модели линзы нефтепродуктов как колебательной системы представлен на рисунках 3 и 4.



Апрель 2015 Апрель 2016

Рис. 3. Горизонтальная составляющие колебаний

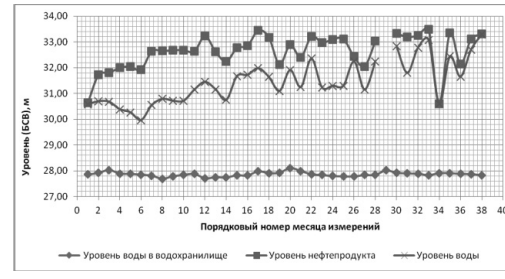


Рис. 4. Вертикальная составляющая колебаний (на примере одной из скважин)

Рассмотрение техногенной залежи как элемента системы вынужденных колебаний позволяет выбрать временные интервалы наиболее продуктивного извлечения углеводородов из недр и рассматривать объект исследования как источник ресурса. С другой стороны данный подход выявляет необходимость постоянного контроля уровней нефтепродуктов и воды в поверхностных и подземных водных объектах для контроля риска миграции линзы в сторону водных объектов, что влечёт за собой значительные экологические риски. Поэтому знание о неблагоприятных гидрогеологических условиях позволяют создать план мероприятий для снижения и предотвращения загрязнения окружающей среды и эффективно проектировать сооружения гидротехнической защиты

IV. Заключение

Комплексный подход к проблеме формирования техногенных залежей представляет собой сложную междисциплинарную задачу, требующую внедрения в рабочую группу специалистов как инженерных специальностей (геологи, гидрогеологи, геофизики, нефтехмики, экологи) так и других направлений.

Сбор и обработка сведений о генезисе, динамике параметров позволяет не только оценить состояние системы, но и прогнозировать её изменения в пространстве и времени. В связи с этим представлены особенности исследования, оценки состояния и миграции накопленных углеводородов в геологической среде с помощью методов численного и объёмного моделирования. В настоящее время такое моделирование применяется на предприятиях по добыче нефти при оценке мощности пласта и дебита на природных месторождениях углеводородного сырья, однако предлагаемые подходы способствуют адаптации имеющихся инструментов для техногенных залежей.

Трёхмерное моделирование природно-техногенных систем позволяет не только оценивать текущее состояние, но и прогнозировать благоприятные условия и опасные явления. Получаемые в результате анализа модели позволяют выявлять критерии и параметры, которые поддаются контролю и позволяют управлять системой.

Подход к управлению техническими и техногенными системами с использованием колебательных и трехмерных моделей позволяет оценить и выбрать сооружения гидротехнической защиты в составе дренажной системы, завес типа «стена в грунте», оптимизировать добычу продукта из техногенной залежи и указать потенциальные места размещения сооружений для мониторинга. В отдельных случаях анализ цифровой модели позволяет изменить направление движения линзы в сторону артезианского водозабора и водоёмов питьевого и рыбохозяйственного назначения. Важно отметить, что полученные в результате моделирования сведения могут быть использованы для подбора наиболее эффективных методов очистки геосреды, а так же прогнозировать изменения природно-техногенной системы во времени и пространстве.

Список литературы

[1] Савельев А.А. Принципы управляемого восстановления территорий размещения отходов/ А.Д. Потапов, О.В. Тупицына, А.Н. Сухоносова и др. // Известия высших учебных заведений. Строительство. – №4. –2014. – С. 98-108

[2] Чертес К.Л. Обработка осадков сточных вод нефтегазового комплекса / К. Л. Чертес, Н. В. Гвоздева, В. Н. Пыстин, В. Д. Назаров, Д. Е. Быков, А. М. Штеренберг // Нефтегазовое дело. – № 4. –2012. – С. 267-273

[3] Самарина О.А. Совершенствование технологии обработки высококонцентрированных сточных вод накопителей нефтехимических предприятий : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.23.04 / Самарина Оксана Алексеевна;. - Пенза, 2011. - 20 с.

[4] Зеленцов Д.В. Обработка осадков нефтесодержащих сточных вод / Д.В. Зеленцов, О.В. Тупицына, Б.М. Гришин и др. – Самара: Самар.гос.техн.ун-т., 2012. - 112 с.

[5] Способ переработки нефтешламов и очистки замазученных грунтов: пат. 2250146 Рос. Федерация: МПК7 B09C1/10 / Быков Д.Е., Бурлака В.А.,Чертес К.Л., Шинкевич М.Ю.; заявитель и патентообладатель Быков Д.Е., Бурлака В.А.,Чертес К.Л., Шинкевич М.Ю. – № 2004101583/15; заявл. 19.01.2004; опубл. 20.04.2005, Бюл. № 11. – 6 с.

[6] Состав для очистки почвы от нефтяных загрязнений и способ очистки почвы от нефтяных загрязнений: пат. 2175580 Рос. Федерация: МПК7 B09C1/10 / Быков Д.Е., Бурлака В.А.,Чертес К.Л., Шинкевич М.Ю. [и др.]; заявитель и патентообладатель Быков Д.Е., Бурлака В.А.,Чертес К.Л., Шинкевич М.Ю. [и др.] – № 99127092/13; заявл. 27.12.1999; опубл. 10.11.2001, Бюл. № 31.

[7] Способ обработки и утилизации органосодержащих отходов: пат. 2249580 Рос. Федерация: МПК7 C05F 3/00 Чертес К.Л., Быков Д.Е., Тупицына О.В.; заявитель и патентообладатель: К.Л. Чертес, Д.Е. Быков, О.В. Тупицына [и др.] № 2003101872/12; заяв. 23.01.2003; опубл. 10.04.2005,бюл. № 10. – 5 с.

[8] Способ переработки нефтешламов и очистки замазученных грунтов: пат. 2450873 Рос. Федерация: МПК7 B09C1/10 / Быков Д.Е., Чертес К.Л.,Тупицына О.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель: БыкоГосударственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Самарский государственный технический университет – № 2010134446/05; заявл. 17.08.2010; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14. – 12 с.

[9] Официальный сайт программы «Petrel». URL: http://sis.slb.ru/products/petrel/ (Дата обращения 30.01.2019)

Многокритериальная оптимизация управления совмещенными технологичесими процессами кабельных производств

Чостковский Б.К.
Самарский государственный технический университет
Самара, Российская Федерация
bChostkovskiy@mail.ru

Митрошин В.Н.
Самарский государственный технический университет
Самара, Российская Федерация
vmitroshin@mail.ru

Денисов В.Ю.
АО «РКЦ «Прогресс»
Самара, Российская Федерация
vladenisov@gmail.com

***Abstract* — Scientific problem of improving the quality of manufactured communication cables is stated. The method of its solution by constructing optimal systems of automatic control of their production technological process is shown. The results of research have shown the ineffectiveness of applying standard optimum criteria including integral quadratic ones. New optimum criteria of control are proposed. Their minimization provides achievement of significantly greater regularity of communication cables without upgrading technological equipment.**

Ключевые слова — кабели связи; производство; показатели качества; управление; критерии оптимальности; иерархические системы

I. Введение

Рассматривается комплекс задач автоматического управления совмещенными технологическими процессами производства длинномерных кабельных изделий, осуществляемых «на проход», когда исходная заготовка (жила) протягивается через последовательно расположенные датчики ее параметров и исполнительные устройства комплекса локальных систем автоматического управления, обеспечивающих автоматическое управление и стабилизацию технологических режимных параметров работы оборудования и параметров качества производимого кабеля.

Выстраиваемая автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) приобретает иерархическую многоуровневую структуру. Ее нижний уровень содержит комплекс локальных систем автоматической стабилизации (ЛСАС), каждая из которых в многосвязной системе автоматического регулирования (МСАР) образует сепаратный канал регулирования (СКР).

Выходные воздействия комплекса СКР определяют первичные и вторичные параметры качества кабельной продукции $P_i(x)$, изменяющиеся по длине x кабеля случайным образом. Будем называть их частными параметрами качества, которые формируют обобщенный показатель качества $q(x)$ как взвешенную сумму частных параметров.

Характер изменения случайной функции $q(x)$ в соответствии с уравнениями Максвелла определяет величину вводимого обобщенного показателя качества кабеля $Q_{ср}$ являющегося и эксплуатационным показателем изготавливаемых кабелей той или иной конструкции, прежде всего кабелей связи и кабелей для передачи данных (LAN-кабелей).

Для достижения наилучших эксплуатационных показателей качества необходимо использовать математическую модель, связывающую данные показатели с параметрами законов автоматического регулирования, при оптимизации параметров цифровых регуляторов, которыми оснащено оборудование.

II. Актуальность решаемых задач

Максимальная пропускная способность кабелей связи достигается при отсутствии так называемых нерегулярностей, под которыми понимаются вариации первичных и вторичных параметров кабеля, которые назовем частными параметрами качества $P_i(x)$.

Наличие возмущающих воздействий окружающей среды обусловливает стохастический характер технологических процессов, а потому все частные и обобщенные показатели качества имеют характер случайных функций длины кабеля x. Недостаточный учет взаимосвязи случайного характера формирования параметров качества изготавливаемых кабелей и алгоритмов функционирования систем автоматического управления технологическими процессами кабельного производства обусловило отсутствие значимых научных результатов в теории нерегулярных кабелей связи [1-5] и определяет актуальность работ в данной области.

Научной основой данной работы является стохастическая модель нерегулярного кабеля, показавшая, что эксплуатационные характеристики кабельной продукции полностью определяются корреляционно-спектральными характеристиками ее частных и обобщенных параметров и показателей качества, оцениваемых на этапе предварительного обследования автоматизируемого процесса. Данная модель и определила вводимые частные и обобщенные параметры и показатели качества управления [6].

При выборе в качестве показателя качества функции волнового сопротивления коаксиального кабеля $Z(x)$ обобщенный показатель качества $Q(f)$ имеет смысл модуля входного коэффициента отражения кабеля и его частотной характеристики коэффициента стоячей волны напряжения, которая измеряется в ходе приемо-сдаточных испытаний.

При выборе в качестве показателя качества $q(f)$ коэффициента электромагнитной связи на ближнем конце симметричного кабеля $N_{12}(x)$ обобщенный показатель качества $Q(f)$ является передаточной функцией влияния на ближнем конце $K_0(f)$ [1-3]:

Работа поддержана грантом РФФИ 18-08-00506-а

©2019 ИПУСС РАН, СамГТУ, IEEE

$$K_0 = \frac{1}{2}\int_0^l N_{12}(x)e^{-2\gamma x}dx, \qquad (1)$$

и описывается тем же функционалом, как и для коаксиального кабеля:

$$Q(f) = \int_0^l q'(x)e^{-2\gamma(f)x}dx \qquad (2)$$

Здесь $q'(x)$ – функция изменения обобщенного параметра; $\gamma(f)$ – частотно-зависимый коэффициент распространения; l– длина кабеля.

Модель процесса формирования обобщённого показателя качества управления $Q_{\text{ср}}$ удобно представить в виде иерархической модели (рис. 1) [7].

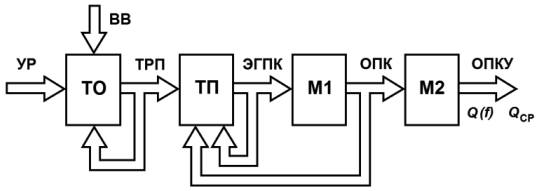


Рис. 1. Иерархическая модель, формирования обобщённых параметров и показателей качества управления

Технологические режимные параметры ТРП формируются технологическим оборудованием ТО под действием уставок режима УР и возмущающих воздействий ВВ. В результате протекания технологического процесса ТП при конкретных значениях технологических режимных параметров происходит формирование электрических и геометрических параметров кабеля ЭГПК. Модели М1 и М2 прогнозируют величины обобщенных параметров эксплуатационного качества готового кабеля ОПК, по которым оцениваются обобщенные показатели качества управления ОПКУ – $Q(f)$ и $Q_{\text{ср}}$.

То обстоятельство, что как параметры передачи, так и параметры влияния определяются решением обобщенной системы телеграфных уравнений, допускает возможность формирования обобщенного выражения показателя качества $Q(f)$ как для коаксиальных, так и симметричных кабелей связи согласно выражению (2).

Если

$$q'(x) = \frac{1}{2Z_0}Z'(x), \qquad (3)$$

то обобщенный показатель качества $Q(f)$ представляет собой частотную зависимость входного коэффициента отражения кабеля.

Соответственно, вариации обобщенного параметра, выражающиеся через центрированные значения частных параметров $\overset{\circ}{P}_i(x)$ и чувствительности k_i обобщенного параметра и данному регулируемому частному параметру, записываются:

$$\overset{\circ}{q}(x) = \sum_{i=1}^{n} k_i \overset{\circ}{P}_i(x). \qquad (4)$$

В этом случае обобщенный показатель качества управления технологическим процессом производства кабеля связи примет вид:

$$Q_{\text{ср}} = \frac{1}{f_2 - f_1}\int_{f_1}^{f_2} Q(f)\,df, \qquad (5)$$

где f_1 и f_2 – нижняя и верхняя частоты передаваемых по кабелю сигналов.

III. Оптимизация многосвязных систем автоматического регулирования

Задача построения оптимальных систем, минимизирующих уровень нерегулярности волнового сопротивления кабелей, возникает либо при необходимости улучшить качество кабелей, выпускаемых на имеющемся технологическом оборудовании, либо при необходимости увеличить производительность оборудования, не ухудшая качества, либо при разработке нового оборудования с высокими эксплуатационными характеристиками. Методика синтеза и оптимизации систем в каждом из перечисленном случаев имеет свои особенности, связанные с возможностью получения априорной информации.

При автоматизации существующего технологического оборудования первым этапом является его обследование статистическими методами с целью определения источников нерегулярности, корреляционно-спектральных характеристик возмущений, а также частотных характеристик оборудования по возможным управляющим воздействиям [8]. Если целью автоматизации является повышение производительности, на данном этапе исследуется влияние производительности на указанные характеристики [9].

Следующий этап – формирование критериев оптимальности и оптимизация систем, обеспечивающих максимальную пропускную способность изготавливаемых кабелей. При автоматизации существующего оборудования и наличии априорной информации используются вероятностные минимаксные критерии, обеспечивающие минимизацию максимального уровня отражений, и интегральные критерии, ядро которых не является функцией фазовых координат системы, а формируется из частотных характеристик системы, возмущений и коэффициента, зависящего от мерной длины кабеля и частоты. Интегральные критерии обеспечивают минимизацию среднего уровня отражений в заданной полосе частот. При отсутствии априорной информации оптимизация системы ведётся до получения монотонной амплитудно-частотной характеристики системы максимальной ширины, либо до получения монотонного переходного процесса типа “плавного перехода” минимальной длительности [4-6].

Рассмотрим локальную САУ, осуществляющую стабилизацию i – ого частного параметра качества p_i, схемы которой показаны на рис. 2 и 3 [10-16].

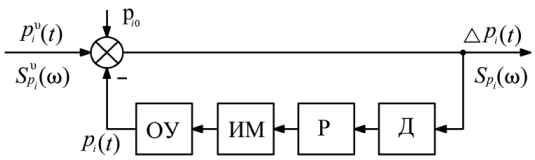


Рис. 2. Функциональная схема i - ой локальной САУ

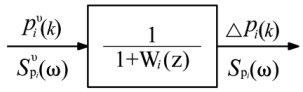


Рис. 3. Структурная схема i - ой локальной САУ

На рис. 2: Д – датчик контролируемого параметра, Р – цифровой регулятор, ИМ – исполнительный механизм, ОУ – объект управления. Задающее воздействие p_{i0} постоянно и равно заданному номинальному значению параметра. Цель управления – минимизация влияния входного возмущающего воздействия $p_i^{\upsilon}(k)$ на ошибку стабилизации $\Delta p_i(k)$, которая и определяет остаточную нерегулярность кабеля по i – ому параметру. Здесь $\Delta p_i(k) = p_i^{\upsilon}(k) - p_i^{\upsilon}(k-1)$, а k– момент отсчета.

Датчик параметра Д должен быть установлен на минимально возможном расстоянии от места формирования контролируемого параметра для уменьшения величины транспортного запаздывания в системе, отрицательно влияющего на ее динамику. Измеряемые параметры должны быть адекватны контролируемой физической величине с учетом ее пространственной распределенности [17, 18].

Цифровой регулятор Р синхронизируется от датчика тактовой длины [19,20] тактовым сигналом, генерируемым через одинаковые расстояния по длине кабеля.

Как показано в [6,21] качество управления полностью описывается видом спектральной плотности $S_{pi}(\omega)$ на отрезке частот $[\omega_1,\omega_2]$, определяемом нижней и верхней частотами сигналов, для передачи которых предназначается кабель, согласно выражению

$$\omega = \frac{4\pi\upsilon_T f}{\upsilon}, \qquad (6)$$

где υ_T – скорость движения кабельного изделия в ходе технологического процесса;υ– фазовая скорость.

Обозначив аналоговую передаточную функцию цепи обратной связи, согласно схеме, показанной на рис. 2, через $W_i(p)$ можно записать выражение для спектральной плотности i – ого параметра, формируемого i – ой локальной САУ в виде:

$$S_{p_i}(\omega) = \left|\frac{1}{1+W_i(j\omega)}\right|^2 S_{p_i}^{\upsilon}(\omega) = A_i^2(\omega) S_{p_i}^{\upsilon}(\omega), \qquad (7)$$

где $A_i(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика системы по возмущающему воздействию.

Система, предназначенная подавлять входное возмущающее воздействие, для эффективного функционирования должна на отрезке частот $[\omega_н,\omega_в]$ иметь $A^2_i(\omega)<<1$, при этом $|W_i(j\omega)|>>1$ и можно записать [13,14,16]:

$$S_{p_i}(\omega) \approx \frac{1}{|W_i(j\omega)|^2} S_{p_i}^{\upsilon}(\omega). \qquad (8)$$

Кроме того, эффективно работающая система должна придать спектральной плотности выходной величины вид [6]:

$$S_{p_i}(\omega) = c\omega^{-\frac{3}{2}}, \ \omega \in [\omega_н, \omega_в], \qquad (9)$$

где c – коэффициент, который должен иметь, возможно, меньшее значение.

При такой форме спектральной плотности ошибки нерегулярность i – го параметра обусловливает одинаковый вклад в дисперсию коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН) кабеля на всех частотах рабочего диапазона. Минимизация коэффициента "c" обеспечивает улучшение среднего уровня качества.

Из последних двух равенств следует зависимость для желаемой амплитудно-частотной характеристики разомкнутого контура системы, определяющей настройки регулятора:

$$A_{pi}^2(\omega) \approx |W_i(j\omega)|^2 \approx \frac{1}{c}\omega^m S_{p_i}^{\upsilon}(\omega) >> 1, \qquad (10)$$

где m=3/2, если следует учесть частотную зависимость затухания.

Выражение (10) при различных "c" определяет возможность построения границ равного качества управления на плоскости АЧХ управляющей цепи системы и желаемый вид АЧХ, к которому следует стремиться при оптимизации частотными методами.

При оптимизации локальных систем в соответствии с желаемым видом (9) следует оценивать эффективность оптимизации и по влиянию системы на средний уровень качества кабеля.

Как показано [6,21], характеристики нерегулярного кабеля определяются дисперсией обобщенного показателя качества управления (входного коэффициента отражения)

$$\sigma_\Gamma^2 = \frac{\pi^2(4-\pi)}{32 z_0^2} \frac{1-e^{-4\alpha l}}{\alpha} g^2 S_z(g), \qquad (11)$$

где α – коэффициент затухания; $S_z(g)$ – спектральная плотность волнового сопротивления кабеля; g– пространственная частота, которая пропорциональна частоте передаваемого сигнала.

$$g = 2f/\upsilon. \qquad (12)$$

В свою очередь, спектр отражений i – ого параметра определяется спектральной плотностью возмущающего воздействия i – ой локальной САУ и ее АЧХ по данному воздействию $A_i(\varpi_i)$ Здесь ϖ_i – угловая частота, определяемая для i – ой локальной САУ в соответствие с (6) скоростью υ_{Ti} движения кабельного изделия в ходе технологического процесса. С учетом (6) и (12) можно записать

$$\varpi_i = 2\pi g \upsilon_{T_i}. \qquad (13)$$

Поэтому эффект введения i – ой локальной САУ предложено определять как отношение среднего уровня нерегулярности кабеля за счет i – того параметра без применения САУ к среднему уровню нерегулярности при использовании САУ, которая описывается амплитудно-частотной характеристикой по возмущающему воздействию:

$$E_i = \frac{\int_{f_H}^{f_B} f^m S_{p_i}^{\upsilon}\left(\frac{4\pi\upsilon_{T_i}}{\upsilon} f\right) df}{\int_{f_H}^{f_B} f^m A_i^2\left(\frac{4\pi\upsilon_{T_i}}{\upsilon} f\right) S_{p_i}^{\upsilon}\left(\frac{4\pi\upsilon_{T_i}}{\upsilon} f\right) df}, \qquad (14)$$

Эффективность автоматической стабилизации всех параметров p_i предложено оценивать по следующему обобщенному критерию:

$$E = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i E_i, \qquad (15)$$

где $E = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1$, а весовые коэффициенты λ_i выбираются на основе результатов предварительного оценивания уровня существующей нерегулярности кабеля с декомпозицией на составляющие, обусловленные параметрами p_i.

Аналогичным образом предложено оценивать эффективность некоторых технологических операций, например, калибровки изоляции. Так калибровка, производимая без оптимизации величины снимаемого верхнего слоя изоляции (припуска), может привести даже к ухудшению частотных характеристик кабеля.

Параметрический синтез систем осуществляется путём частотной и временной оптимизации параметров внутриконтурных регуляторов и межконтурных систем координации.

Из-за ограничений, накладываемых требованиями устойчивости систем, наиболее общим решением является оптимизация локальных САУ и всей многоконтурной АСУ ТП путём минимизации некоторых обобщённых показателей качества управления (критериальных функционалов).

Предложен обобщённый критериальный функционал, минимизация которого приводит к построению систем, оптимальных с точки зрения минимизации нерегулярности производимых кабелей. Для i – ой локальной САУ данный критерий выражается через АЧХ замкнутой системы $A_i(\varpi_i)$:

$$J = \sum_{i=1}^{n} J_i = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \int_{\varpi_H}^{\varpi_B} A_i^2(\varpi_i) \varpi_i^{\mathrm{m}} S_{\mathrm{p}_i}^{\upsilon}(\varpi_i) d\varpi_i, \qquad (16)$$

где λ_i – весовые коэффициенты, которые, на основе результатов предварительного обследования технологических процессов, отражают соотношение требований к уменьшению вкладов управляемых параметров кабеля в его нерегулярность; ϖ_i – угловая частота, определяемая скоростью υ_{Ti} i – ой технологической операции; m– показатель степени.

С учётом возможного введения внутриконтурных и межконтурных регуляторов критерий имеет следующий общий вид:

$$J = \int_{\omega_H}^{\omega_B} \mathrm{F}\{A_i^2(\omega), A_{ij}^2(\omega), S_{\mathrm{p}_i}^{\upsilon}(\omega)\}\, \omega^{\mathrm{m}} d\omega, \qquad (17)$$

где первый сомножитель подынтегрального выражения представляет собой спектральную плотность обобщенного параметра кабеля, выраженную, через характеристики возмущающих воздействий и регуляторов многоконтурной системы, как внутриконтурных, так и межконтурных; $A^2_{ij}(\omega)$ – АЧХ межконтурной системы.

Для оценки эффективности разработанных критериев было проведено сравнение с оптимальным управлением объекта, обладающим максимальной величиной транспортного запаздывания, который подвергается возмущающему воздействию, имеющему характер белого шума.

Оптимальные значения настроек регулятора находятся из условия минимизации критерия, характеризующего средний уровень отражений в заданном диапазоне частот:

$$J = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{1-\exp\left(-4\alpha(\omega)\ell\right)}{\alpha(\omega)} \omega^2 A_i^2(\omega) S_{p_i}(\omega) d\omega \approx \approx \mathrm{c} \cdot \int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega^{\frac{3}{2}} S_{\mathrm{p}_i}(\omega) d\omega. \qquad (18)$$

Оптимизация систем управления по критерию (18) приводит к настройкам регуляторов, существенно отличающимся от оптимальных настроек, соответствующих минимуму квадратичной интегральной оценки [1, 22, 23].

Как и при использовании критерия минимума квадратичной интегральной оценки, рассмотрена оптимизация контура стабилизации параметра кабельного изделия, когда учитывается только запаздывание τ. Принято, что возмущающее воздействие имеет характер белого шума. Критерий оптимизации (18), обеспечивающий минимум среднего значения

дисперсии модуля входного коэффициента отражения на интервале частот f_1-f_2 , имеет вид:

$$J = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{\omega^{3/2}}{K^2\left(1+T_и^2\omega^2\right)+T_и^2\omega^2+2KT_и\omega\left(T_и\omega\cos\omega\tau-\sin\omega\tau\right)}d\omega, \quad (19)$$

где K и $T_и$ – настройки ПИ-регулятора; ω_1 и ω_2 рассчитываются по граничным частотам сигнала f_1 и f_1 в соответствии с выражением (6).

На рис. 4 на плоскости параметров ПИ-регулятора показаны линии равных значений критерия (19) при ω_1 = = 0,1; ω_2 = 0,2; τ = 5с. Показана также граница устойчивости системы. Так как уменьшение критерия достигается при уменьшении постоянной времени изодрома $T_и$ и увеличении коэффициента передачи регулятора K, то оптимальные настройки регулятора достигаются на границе устойчивости в точке А, где K= 3, $T_и$ = 0,34τ. На рисунке показана также точка В, показывающая определённые ранее настройки, соответствующие минимуму интегральной квадратичной оценки, который обеспечивается настройками K= 0,48; $T_и$ = 0,6τ [20]. В точке А значение критерия равно 0,000993, а в точке В оно равно 0,06. Это значит, что использование разработанного критерия, учитывающего влияние управляемых параметров на частотные характеристики кабеля, обеспечивает в 60,4 раз более низкий уровень отражений проходящего по кабелю сигнала, чем при оптимизации по стандартному критерию.

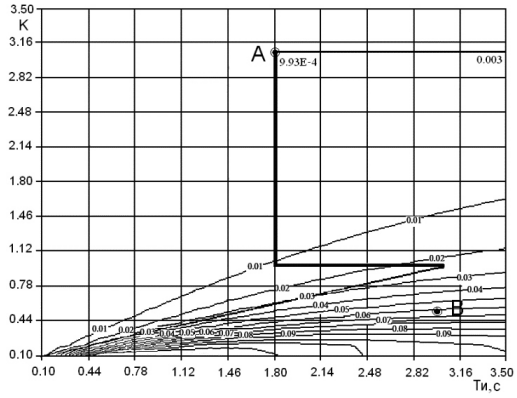


Рис. 4. Результаты оптимизации

Аналогичные построения показали значительную зависимость поверхности $J(K,T_и)$ от параметров ω_1, ω_2 и τ. Так, при ω_1 = 0,1; ω_2 = 10,1 она становится многоэкстремальной. Однако при выбранных простейших моделях объекта и возмущающего воздействия точка оптимальных настроек оказывается также на границе устойчивости, в точках, аналогичных точке А.

Следует отметить, что результаты оптимизации существенно зависят от частот f_1, f_2 передаваемых по кабелю сигналов.

Так на рис. 5 и 6 показаны поверхности отклика построенные для настроек пропорционально-интегрального регулятора для случаев, когда верхняя частота равна 1,5 МГц и 8,5 МГц.

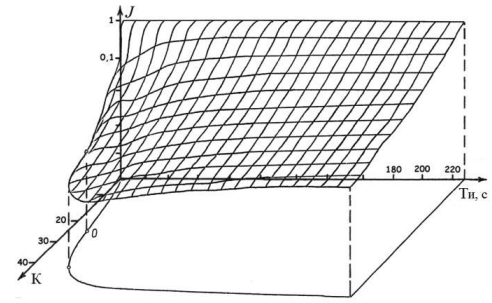


Рис. 5. Поверхность отклика $J(K,T_и)$; $f_в$=1,5 МГц

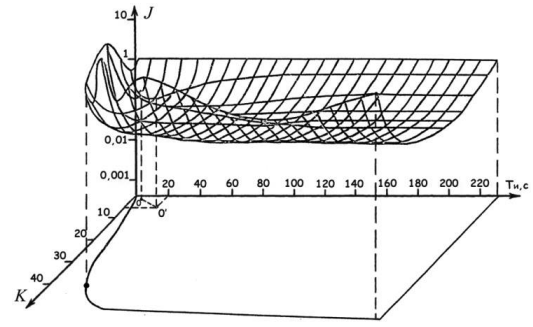


Рис. 6. Поверхность отклика $J(K,T_и)$; $f_в$=8,5 МГц

Очевидно, что при тех же возмущающих воздействиях и модели объекта управления оптимальные настройки регулятора находятся в разных точках плоскости (K,$T_и$).

Описанный эффект нерегулярного электрического кабеля связи можно определить на примере коаксиального кабеля как “пространственно-временной резонанс”, когда вероятностные характеристики эксплуатационных показателей качества нерегулярного кабеля на частоте передаваемого сигнала f_i определяются величиной спектральной плотности волнового сопротивления $Z(x)$ на пространственной частоте g_i которая определяется значениями амплитудно-частотных характеристик локальных систем стабилизации параметров кабеля на частоте ϖ_i.

IV. Заключение

При большом разнообразии выпускаемых электрических кабелей связи (коаксиальных, симметричных с парной или четвёрочной скруткой) их общие свойства, определяемые их длинномерностью и общностью физических принципов канализации электромагнитной энергии, позволили ввести обобщённые показатели качества кабелей и связать их с характеристиками законов управления локальных и многоконтурных систем автоматического управления технологическими процессами.

Совмещённый же характер технологических процессов, объединяющих ряд технологических операций, выполняемых одновременно “на проход”, требует использования нового подхода к синтезу локальных систем автоматической стабилизации

технологических режимных параметров и конструктивных параметров кабеля.

Данный подход предполагает расчленение технологических процессов на составляющие их технологических операций, определения целей управления с учетом совместного влияния технологических операций на первичные и вторичные параметры передачи изготавливаемых кабелей и дальнейшую оптимизацию настроек всего комплекса регуляторов по обобщённым показателям качества управления.

Комплексное применение предлагаемых методов и средств автоматизации позволяет реализовать максимально возможное качество управления, обеспечивающее наилучшее возможное качество кабелей связи, заложенное в их конструкции и качестве используемых материалов.

Описанные методы и алгоритмы являются основой создания математического обеспечения иерархических автоматизированных систем управления технологическими процессами кабельных производств.

Список литературы

[1] Белоруссов Н.П., Гроднев И.И. Радиочастотные кабели. - М.: Энергия, 1973. -328 с.

[2] Андреев В.А. Временные характеристики кабельных линий связи. - М.: Радио и связь, 1986. -104 с.

[3] Андреев В.А. Теория электромагнитных влияний между цепями связи. - М.: Связь, 1999. -320 с.

[4] Гальперович Д.Я., Павлов А.А, Хренков Н.Н. Радиочастотные кабели. - М.: Энергоатомиздат, 1990. -256 с.

[5] Гальперович Д.Я., Гречков В.И., Коржакова Т.В., Чостковский Б.К. Сверхпроводящие коаксиальные пары для кабеля связи // Электросвязь, 1990. №1. – С.38-41.

[6] Чостковский Б.К. Методы и системы оптимального управления технологическими процессами производства кабелей связи - М.: Машиностроение, 2009. -189 с.

[7] Chostkovskiy B.K., Mitroshin V.N. System Approach to the Control and Monitoring Automation Problems in Communication Cables Production Processes // IEEE Xplore, International Russian Conference (RusAutoCon), 2018, pp. 1-7.

[8] Mitroshin V.N., Kuleshova D.I. The System for Stabilization of Screw Extruder Productivity // IEEE Xplore, International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2018, pp. 1-5.

[9] Cazac V. The drive system optimization of single screw extruder to control thickness of insulation // IEEE Xplore, International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN), 2017, pp. 501-505.

[10] Олссон Г., Пиани Дж. Цифровые системы автоматизации и управления. - СПб.: Невский диалект, 2001. -557 с.

[11] Изерман Р. Цифровые системы управления. - М.: Мир, 1984. -542с.

[12] Бесекерский В.А. Цифровые системы управления. - М.: Мир, 1984. -548 с.

[13] Бесекерский В.А., Небылов А.В. Робастные системы автоматического управления. - М.: Наука, 1983. -240 с.

[14] Вейцман К. Распределенные системы мини- и микро-ЭВМ. - М.: Финансы и статистика, 1983. -382 с.

[15] Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. - М.: Энергия , 1973. –440 с.

[16] Наместников А.Н. Разработка имитационных моделей в среде MATLAB: Методические указания для студентов специальностей 01719, 357400. - Ульяновск: УлГТУ, 2004. -72 с.

[17] Abeykoon C. Soft sensing of melt temperature in polymer extrusion // IEEE Xplore, European Control Conference (ECC), 2016, pp. 340-345.

[18] Abeykoon C., Kelly A.L., Martin P.J., Li K. Dynamic modelling of die melt temperature profile in polymer extrusion // IEEE Xplore, 52nd IEEE Conference on Decision and Control, 2013, pp. 2550-2555.

[19] Chostkovskii B.K., Mitroshin V.N. Automation of Extrusion of Porous Cable Products Based on a Digital Controller // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2017. Vol. 53, №. 4.- pp. 371-378.

[20] Чостковский Б.К., Колпащиков С.А. Робастное регулирование непрерывного процесса изготовления длинномерного изделия // Математическое моделирование систем и процессов управления: Сб. науч. тр. – Самара: СамГТУ, 1997. - С. 39-47.

[21] Чостковский Б.К. Структурно-параметрический синтез систем оптимального управления совмещёнными технологическими процессами производства кабелей связи по эксплуатационным критериям качества: Дис. … д-ра. техн. наук. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2007. -265 с.

[22] Колесников К.Д. Некоторые аспекты применения теории инвариантности и оптимального управления при проектировании систем автоматического управления непрерывными технологическими процессами кабельного производства // Автоматическое управление непрерывными технологическими процессами: сборник научн. тр. - Куйбышев, 1976. - С. 3-12.

[23] Чостковский Б.К. Автоматизированный контроль и управление качеством кабелей для систем кабельного телевидения. // Состояние и перспективы развития кабелей связи в XI пятилетке: Тез. доклада Всесоюзной научно-технической конференции. - Одесса, 1982. - С. 28-30.

Индекс авторов
Author index

А

Абакумов, А.М. 161
Абакумов, О.А. 161
Абрамкин, С.Е. 165
Абрамов, А.Д. 169, 173
Абрамова, Е.Н. 177
Айкашев, П.В. 121
Айцзюнь, Ли 515
Алешкин, А.С. 181, 343
Алиферов, А.И. 187
Андреев, В.В. 522
Аньшаков, А.С. 187
Афиногентов, А.А. 191, 276

Б

Бааке, Э. 111
Бабин, М.С. 364
Багдасарова, Ю.А. 191
Барабанова, П.С. 195
Барсегян, В.Р. 117
Батищев, В.И. 199
Батурин, О.В. 205, 376
Бойков, И.В. 121
Бондалетов, Д.Н. 443
Бондаренко, Д.Н. 211
Бондарь, А.С. 211
Богачев, Е.А. 429
Бородулин, Б.Б. 349
Бочкарев, А.В. 467
Будник, С.А. 400
Булдакова, Т.И. 216, 221

В

Васильева, Н.С. 462
Вдовин, В.А. 187
Веселова, М.Д. 226
Венгер, К.Г. 392
Воеводин, П.С. 232
Волков, А.А. 370, 382
Волков, В.Г. 238
Воронухин, М.Е. 127

Г

Гаврилова, Т.Е. 334
Галимов, Р.Р. 242
Галицков, К.С. 246
Галицков, С.Я. 246
Гашенко, Ю.В. 252
Гвоздев, В.Е. 242
Глазков, Т.В. 447
Гнутикова, М.И. 419
Гольдштейн, В.Г. 462
Горячкин, Е.С. 370, 423
Грачев, В.В. 392
Губанов, Н.Г. 252
Губарева, К.В. 257
Гузаиров, М.Б. 242

Д

Давлиева, А.С. 242
Данилушкин, А.И. 66, 70, 262
Дедов, Н.И. 266
Демидович, В.Б. 270
Демьянов, Д.Н. 238
Денисов, В.Ю. 536
Денисов, О.В. 443
Денисова, Л.В. 443
Деревянов, М.Ю. 276
Дилигенская, А.Н. 132
Дмитриев, Д.Н. 382
Душин, С.Е. 165
Дьяконов, А.И. 74

Е

Егоров, И.Н. 370, 376
Елаков, Е.Б. 429
Еремин, А.В. 282
Ермак, Д.О. 343
Есимова, Н. 458
Ефимушкина, Н.В. 288

Ж

Жежеря, А.А. 309

З

Заболотнов, Ю.М. 232, 515
Забродина, К.А. 226
Зайцев, В.Ю. 313
Зангиев, С.А. 318, 324
Засов, В.А. 127, 195
Зверев, Г.И. 388
Зеленцов, Д.В. 292
Зимин, Л.С. 78
Золин, А.Г. 199
Зубанов, В.М. 370, 382

И

Ивлева, А.И. 296
Ильина, Н.А. 136
Ильясов, Б.Г. 300
Исуткина, В.Н. 266

К

Камальдинова, З.Ф. 292
Капустина, А.В. 74
Клеблеев, Р.М. 282
Клочкова, Н.Н. 82
Коваленко, А.В. 358
Козлов, В.Н. 142
Кокунько, Ю.Г. 505
Колесников, И.П. 490
Колесникова, С.И. 304
Колмакова, Д.А. 205
Кондратьев, О.И. 309, 471
Коновалов, В.В. 313
Корнеева, А.И. 423
Котенев, А.В. 318, 324
Котенев, В.И. 318, 324
Крайнова, И.В. 400
Краснов, Д.В. 505
Краснова, Н.П. 257
Кривошеев, И.А. 330
Кривошеева, Д.А. 221
Кривцов, А.В. 205
Кувалдин, А.Б. 86
Кувшинова, О.А. 458
Кудинов, И.В. 334
Кузищин, В.Ф. 146
Кузнецов, Г.В. 338
Куркина, Е.В. 353

Л

Лавендел, Ю. 458
Леоненко, А.С. 78
Лесько, С.А. 181, 343
Лившиц, М.Ю. 349
Любимов, В.В. 353

М

Макарова, И.С. 98
Максименко, Г.Н. 334
Максимова, М.А. 70
Мандра, А.Г. 276
Мартинов, Г.М. 358
Мартинова, Л.И. 364
Мартышкин, А.И. 226
Марчуков, Е.Ю. 370, 376
Матвеев, В.Н. 382
Медведев, С.Н. 483
Медведева, О.А. 483
Мельникова, Д.А. 252
Меньших, В.В. 388
Мерзликина, Е.И. 146
Миннигуллова, А.А. 433
Мисевич, П.В. 522
Митрошин, В.Н. 536
Михайлов, А.П. 151
Михеева, Г.В. 334
Мостовой, А.П. 70
Мощенский, Ю.В. 405
Мышляев, Л.П. 392
Мязитов, А.А. 205

Н
Немченко, В.И. 396
Ненарокомов, А.В. 400
Ненашев, А.В. 349
Нечаева, И.Н. 410
Нечаев, А.С. 405, 410
Низамутдинов, М.М. 528
Новикова, Ю.Д. 382, 423
Носов, Н.В. 173
Нурбосынов, Д.Н. 415
Нурбосынов, Э.Д. 415

О
Обухова, А.В. 82
Овсянников, В.Н. 490
Орлов, С.П. 288

П
Паис, М.А. 309
Панкратова, Е.Н. 522
Пащенко, Д.В. 226
Пащенко, Д.И. 419
Перевалов, Ю.Ю. 270
Петренко, Е.Н. 532
Петров, Н.М. 443
Плешивцева, Ю.Э. 29, 276
Пименов, А.А. 276
Пиявский, С.А. 155
Попов, А.В. 92
Попов, А.И. 257
Попов, Г.М. 376, 423
Посашков, М.В. 396
Прокофьев, Г.И. 270
Просунцов, П.В. 429, 443
Проценко, А.Н. 82, 98
Пыстин, В.Н. 433, 532
Пучкова, У.Н. 226

Р
Рандин, Д.Г. 161
Рапопорт, Э.Я. 29
Рассадин, Ю.М. 439
Ревизников, Д.Л. 400
Резник, С.В. 177, 443
Решмин, С.А. 447
Римша, А.С. 453
Римша, К.С. 453
Роганов, В.Р. 458
Рогачев, Г.Н. 101
Рогачев, Н.Г. 101
Родионов, Ю.В. 313
Рожков, К.Е. 330
Романов, В.С. 462

С
Савельева, Ю.О. 349
Саитова, Г.А. 300
Сайфуллин, Р.Т. 467
Самарина, О.А. 471
Самохвалов, О.В. 246
Сарапулов, С.Ф. 106
Сарапулов, Ф.Н. 106
Сафронова, В.С. 226
Синев, М.П. 226
Симонов, Н.Б. 330
Сирота, Д.Д. 165
Смирнова, Л.Н. 475
Смирнов, С.В. 296
Смольянов, И.А. 106, 501
Соколов, С.В. 364
Солодуша, С.В. 479
Сорокин, А.Г. 78
Сорокина, А.М. 483
Спиряев, В.А. 479
Стариков, А.В. 490
Стефанюк, Е.В. 334
Стрельцова, О.В. 211
Сухоносова, А.Н. 471
Суятинов, С.И. 221
Сызранцев, В.Н. 496
Сызранцева, К.В. 496
Сыродой, С.В. 338

Т
Табачникова, Т.В. 415
Таиров, Э.А. 479
Танаев, А.В. 98
Тарасов, Д.А. 313
Тарчуткин, Н.В. 501
Ткачев, В.К. 257, 282
Трокоз, Д.А. 226
Трубицын, К.В. 257

У
Уткин, А.В. 505, 509
Уткин, В.А. 509

Ф
Фан, И.А. 191
Федин, М.А. 86

Х
Хонши, Лу 515
Хранилов, В.П. 522
Хрисанов, Н.Н. 288

Ц
Циряпкина, А.В. 392

Ч
Чебаков, Е.В. 400
Чередниченко, В.С. 187
Черняховская, Л.Р. 528
Чертес, К.Л. 292, 532
Чмиленко, Ф.В. 211
Чостковский, Б.К. 536

Ш
Швецкова, Л.В. 415
Швыдкий, Е. 111
Шерстобитов, Д.Н. 433
Шмаков, Е.И. 501

Я
Якимов, В.Н. 199
Якубович, Е.А. 173
Янковский, С.А. 338

B
Baake, E. 3, 39
Baldan, M. 14, 43
Birjukovs, M. 48

C
Cetin, M. 43

D
Dey, A.K. 54
Dietrich, A. 59

E
Ebel, W. 39

F
Felcis, I. 48

J
Jakovic, A. 3, 48
Jegorovs, A. 48

K
Klokovs, A. 48

N
Nacke, B. 14, 43, 59
Nikanorov, A. 14, 39, 43

R
Rudnev, V. 24

S
Spitans, S. 3

Научное издание

Труды XXI Международной конференции

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

3-6 сентября 2019, Самара, Россия

Редакторы:
С.А. Никитов, Д.Е. Быков,
С.Ю. Боровик, Ю.Э. Плешивцева

Proceedings of the XXI International Conference

COMPLEX SYSTEMS: CONTROL AND MODELING PROBLEMS

September 3-6, 2019, Samara, Russia

Editors:
S.A. Nikitov, D.E. Bykov,
S.Yu. Borovik, Yu.E. Pleshivtseva

Подписано в печать _____г.
Формат 70x100/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Объём 44,2 усл. печ. л. Тираж 300 экз. Заказ № _____.

Издательство ООО «Офорт».
443080, Самара, ул. Революционная, 70, лит. 3, оф. 405-02.
Тел.: 973-70-80, 973-70-55
e-mail: ofort-samara@mail.ru

Отпечатано в типографии ООО «Офорт».