Российская академия наук
Самарский научный центр
Институт проблем управления сложными системами

Труды XVI Международной конференции

Proceedings of the XVI International Conference

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

COMPLEX SYSTEMS: CONTROL AND MODELING PROBLEMS

30 июня - 03 июля 2014, Самара, Россия

June 30 – July 03, 2014, Samara, Russia

Редакторы:

академик Е.А. Федосов

академик Н.А. Кузнецов

профессор В.А. Виттих

Editors:

academician E.A. Fedosov

academician N.A. Kuznetsov

professor V.A. Vittikh

Проблемы управления и моделирования в сложных системах: *Труды XVI Международной конференции* (30 июня – 03 июля 2014 г. Самара, Россия) / Под ред.: акад. ***Е.А. Федосова***, акад. ***Н.А. Кузнецова***, проф. ***В.А. Виттиха***. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2014. - 756 с.
ISBN 978-5-93424-703-5

В сборнике содержатся труды XVI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», распределенные по направлениям: теория оптимального управления и её применения; интеллектуальные технологии в сложных системах; процессы управления в обществе (в социальных, экономических и политических системах); перспективные методы и средства управления космическими полётами; управление в сложных технических системах; измерения, контроль и диагностика в экстремальных условиях.

ISBN 978-5-93424-703-5

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук, составление, оформление, 2014
© Все права принадлежат авторам публикуемых работ, 2014

The XVI International Conference "Complex Systems: Control and Modeling Problems" (CSCMP'2014), was held on June 30 – July 03, 2014 in Samara (Russia) by the International Association for Mathematics and Computers in Simulation (IMACS), National Committee of Automatic Control of Russia, Samara Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Institute for Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences (ICCS RAS) with the participation of the Volga Region University of Telecommunications and Informatics and Smart Solutions Company (Samara, RF).

The Conference was funded according to the project № 14-08-06032 of Russian Foundation for Basic Research.

The conference reports were presented on the following sections:

- Theory of Optimal Control and its Applications;
- Intellectual Technologies in Complex Systems;
- Management Processes in the Society (in Social, Economical and Political Systems);
- Promising Methods and Means of Aerospace Flights Control;
- Control in Complex Technical Systems;
- Measuring, Control and Diagnostics in Extreme Conditions.

The scientists from universities and research institutes of Great Britain, Germany, the Netherlands, Portugal, Switzerland, Bulgaria, Belarus participated at the conference. The Russian participants represented the Russian Academy of Sciences, research institutes, universities, research and development centers, enterprises and governmental authorities.

XVI Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (ПУМСС-2014) проводилась в г. Самаре (Россия) с 30 июня по 03 июля 2014 года Международной ассоциацией по математическому и компьютерному моделированию (IMACS), Российским Национальным комитетом по автоматическому управлению, Самарским научным центром Российской академии наук, Институтом проблем управления сложными системами Российской академии наук (ИПУСС РАН) при участии Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, а также научно-производственной компании «Разумные решения» (г. Самара).

Конференция получила финансовую поддержку Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-06032).

На конференции были представлены доклады по следующим направлениям:

- теория оптимального управления и её применения;
- интеллектуальные технологии в сложных системах;
- процессы управления в обществе (в социальных, экономических и политических системах);
- перспективные методы и средства управления космическими полётами;
- управление в сложных технических системах;
- измерения, контроль и диагностика в экстремальных условиях.

В конференции приняли участие ученые из университетов и научных учреждений Великобритании, Германии, Нидерландов, Португалии, Швейцарии, Болгарии, Беларуси. Отечественные ученые представляли Российскую академию наук, научно-исследовательские институты, вузы, научно-производственные объединения и промышленные предприятия страны, органы государственной власти.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

1. *Федосов Е.А.* - академик РАН, председатель Программного комитета
2. *Виттих В.А.* - д.т.н., заместитель председателя, ИПУСС РАН, г. Самара
3. *Боровик С.Ю.* - д.т.н., ученый секретарь Программного комитета, ИПУСС РАН, г. Самара
4. *Аншаков Г.П.* - член-корреспондент РАН
5. *Васильев С.Н.* - академик РАН
6. *Золотухин Ю.Н.* - д.т.н, Институт автоматики и электрометрии СО РАН г. Новосибирск
7. *Инден У.* - профессор Кельнского университета, г. Кельн, Германия
8. *Кузнецов Н.А.* - академик РАН
9. *Лупи С.* - профессор Падуанского университета, г. Падуя, Италия
10. *Наке Б.* - директор Института электротехнологии Университета им. Лейбница, г. Ганновер, Германия
11. *Новиков Д.А.* - член-корреспондент РАН
12. *Рапопорт Э.Я.* - д.т.н., ИПУСС РАН, г. Самара
13. *Ржевский Г.А.* - профессор Открытого университета, г. Лондон, Великобритания
14. *Себряков Г.Г.* - член-корреспондент РАН
15. *Смирнов С.В.* - д.т.н., ИПУСС РАН, г. Самара
16. *Соловьев В.А.* - член-корреспондент РАН
17. *Филимонов Н.Б.* - д.т.н., МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва
18. *Шорин В.П.* - академик РАН

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

1. *Виттих В.А.* - д.т.н., председатель Организационного комитета, ИПУСС РАН, г. Самара
2. *Смирнов С.В.* - д.т.н., заместитель председателя Организационного комитета, ИПУСС РАН, г. Самара
3. *Моисеева Т.В.* - к.э.н., ученый секретарь Организационного комитета, ИПУСС РАН, г. Самара
4. *Андреев В.А.* - д.т.н., Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара
5. *Бааке Е.* - академический директор Института электротехнологии Университета им. Лейбница, г. Ганновер, Германия
6. *Гриценко Е.А.* - заместитель министра социально-демографической и семейной политики Самарской области - руководитель департамента организации социальных выплат и развития информационных технологий
7. *Ильясов Б.Г.* - д.т.н., Уфимский государственный авиационный технический университет
8. *Клещев А.С.* - д.ф.-м.н., Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток
9. *Кузнецов С.В.* - зам. директора ИПУСС РАН, г. Самара
10. *Лазарев Ю.Н.* - д.т.н., Самарский научный центр РАН
11. *Матюшин М.М.* - к.т.н., начальник отдела РКК «Энергия», г. Москва
12. *Плешивцева Ю.Э.* - д.т.н., ИПУСС РАН, г. Самара
13. *Скобелев П.О.* - д.т.н., НПК «Разумные решения», г. Самара
14. *Форзан М.* - профессор Падуанского университета, г. Падуя, Италия
15. *Чекалов Л.Л.* - к.т.н., ООО «Транс-Мобил-Спедишн», г. Самара

CONTENTS
СОДЕРЖАНИЕ

Plenary Papers
Пленарные доклады

1. *G. Rzevski*
Managing complexity 3

2. *В.А. Виттих*
Эволюция идей организации процессов управления в обществе: от кибернетики к эвергетике 13

3. *В.Ф. Меньшиков*
Энергетическая стратегия и устойчивое развитие цивилизации 20

4. *A.C. Bijl*
Renewable energy and energy efficiency for the Russian Federation 29

Theory of Optimal Control and its Applications
Теория оптимального управления и её приложения

1. *E. Baake, A. Nikanorov*
Approaches for numerical simulation of high frequency tube welding process 37

2. *B. Nacke, B. Niemann, D. Schlesselmann*
Heat and mass transfer in inductive skull melting of glasses and oxides 45

3. *А.В. Ванин, Е.М. Воронов, А.А. Карпунин*
Синтез оптимального управления двухуровневой многоканальной системы управления летательного аппарата на основе координированных стабильно-эффективных компромиссов 52

4. *А.Н. Дилигенская*
Современные методы оптимизации в обратных задачах теплопроводности 61

5. *Ю.И. Еременко, Д.А. Полещенко, А.И. Глущенко*
Об универсальности применения нейросетевого оптимизатора для настройки параметров ПИД-регулятора при управлении динамическими объектами с запаздыванием 68

6. *Н.В. Коплярова, А.В. Медведев*
О непараметрической идентификации нелинейной динамики при разнотипной априорной информации 75

7. *М.Х. Лапицкая*
Численное моделирование температурного поля стальной цилиндрической заготовки в процессе периодического индукционного нагрева 81

8. *И.С. Левин*
Синтез оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева металла под обработку давлением в условиях ограниченной неопределенности характеристик объекта 86

9. *Ю.Э. Плешивцева, А.В. Попов, А.И. Дьяконов*
Модельные задачи оптимального управления процессами индукционного нагрева по типовым критериям качества 95

10. *Э.Я. Рапопорт*
Проблема управляемости в системах с распределенными параметрами 105

11. *С.П. Сетин*
Оптимизация процесса первичной переработки нефти на установке атмосферно-вакуумной трубчатки 120

Intellectual Technologies in Complex Systems
Интеллектуальные технологии в сложных системах

1. *B. Madsen, А.В. Царев, И.В. Майоров, Д.С. Очков*
Мультиагентная система управления цепочками поставок 129

2. *А.Е. Баранович, Д.Б. Ханковский*
О некоторых аспектах аксиоматизации теории многоместных отношений 143

3. *В.И. Батищев, Н.Г. Губанов, А.В. Чуваков*
Интеллектуальные методы многоуровневого моделирования крупномасштабных систем транспортной инфраструктуры 154

4. *А.А. Белоусов, П.О. Скобелев, В.Г. Матюхин, Н.А. Кузнецов*
Управление логистикой РЖД в реальном времени 160

5. *Н.М. Боргест, Б.К. Келдибаев, С.В. Смирнов*
Информационное и функциональное моделирование работы офиса научного журнала на основе онтологий 167

6. *А.С. Боровский*
Модели, методы и алгоритмы проектирования систем физической защиты критических объектов на основе экспертных знаний 175

7. *И.Д. Виноградов*
Извлечение онтологий из реляционных баз данных для представления нечетких запросов 182

8. *А.В. Вохминцев, А.В. Мельников*
Семантический поиск в аннотированных базах данных изображений на основе фактографического анализа данных 190

9. *В.Е. Гвоздев, О.Я. Бежаева*
Принципы и подходы к проектированию требований к программным продуктам и программным проектам 196

10. *В.Е. Гвоздев, Л.Р. Черняховская, А.И. Малахова, Н.И. Ровнейко*
Интеллектуально-аналитическая поддержка принятия коллективных решений при управлении программными проектами 204

11. *Н.В. Коплярова, Н.А. Сергеева , В.И. Орлов, В.В. Федосов*
О компьютерной системе диагностики электрорадиоизделий 213

12. *А.И. Малахова*
Метод управления знаниями при разработке программных проектов 220

13. *В.П. Офицеров, В.С. Смирнов, С.В. Смирнов*
Метод альфа-сечения нестрогих формальных контекстов в анализе формальных понятий 228

14. *П.О. Скобелев, А.С. Вылегжанин, Я.Ю. Шепилов, Д.Н. Казанская, Д.В. Павлова, О.И. Храмова*
Мультиагентная система SmartFactory для поддержки принятия решений по согласованному управлению цехами предприятий 245

15. *П.О. Скобелев, А.Н. Лада, Д.С. Рыбак, И.А. Пустовой, Д.Г. Пейсахович*
Smart Logistics: мультиагентная система управления сборными грузами для внутрирегиональных развозок 253

16. *П.О. Скобелев, П. Лейтао, Д.Н. Казанская, Я.Ю. Шепилов*
Холоническая архитектура мультиагентной системы управления ресурсами предприятия 262

17. *П.О. Скобелев, И.В. Майоров, Е.В. Симонова, А.В. Царев*
Об одном подходе к оценке степени адаптивности мультиагентной системы для управления ресурсами в реальном времени 270

18. *К.А. Стуликова, Д.Ю. Полукаров*
Обработка потока данных на основе онтологической модели области маршрутизации 282

19. *В.А. Филимонов*
Концепция портала «Ген-Гуру-Кон» для моделирования поведения интеллектуальных систем в условиях конфликта 286

20. *В.М. Шпаков*
Формализация и использование знаний о развитии процессов 290

Management Processes in the Society
(in Social, Economical and Political systems)
Процессы управления в обществе
(в социальных, экономических и политических системах)

1. *M. Konstantinov, G. Pelova, K. Yanev*
Plain and 2D apportionments 299

2. *В.А. Виттих*
Распределение персональных ответственностей 305

3. *В.А. Виттих, Т.В. Моисеева*
Интерсубъективное управление в обучении 308

4. *Б.Н. Герасимов*
Игровое моделирование управленческих процессов 316

5. *В.Б. Гусев*
Модели автономного управления в саморазвивающихся системах 323

6. *Б.Г. Ильясов, И.Б. Герасимова, Л.Н. Мухамедрахимова*
Формирование отношений в малой научной группе с учетом особенностей структуры личности 330

7. *Б.Г. Ильясов, И.В. Дегтярева, Е.А. Макарова, Т.А. Ефтонова*
Методология исследования и системного моделирования динамики инвестиционного процесса на макроуровне 337

8. *Б.Г. Ильясов, ЕА. Макарова, Е.Ш. Закиева*
Проблемы оценки и управления качеством жизни 352

9. *Г.А. Крыжановский, В.В. Купин*
Подходы к моделированию и оценке доминирующей мотивационной тенденции операторов транспортных систем 358

10. *А.Ю. Нестеров*
Коммуникация и целеполагание: принцип Aequitas Hermeneutica 365

11. *О.В. Павлов*
Динамические модели планирования производства с учетом эффекта обучения 369

12. *А.Р. Сабилов, Е.Н. Тарчинская*
Математическое моделирование развития хозяйственной инфраструктуры автономного планетного поселения (АПП) как сложной трансформирующейся системы 376

13. *С.Ф. Сергеев*
Методологические проблемы проектирования сложных эргатических систем 386

14. *И.А. Степановская*
Облачный сервис прогнозной аналитики в управлении инновационным развитием 394

15. *А.И.Тимофеев*
Цивилизация и технические мыслящие системы 402

16. *М.В. Цапенко, М.Ю. Лившиц, А.Н. Давыдов*
Идентификация взаимосвязей соответствия наукоёмкой продукции приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники 408

17. *Л.Л. Чекалов*
Информационное описание индивидуального сознания субъекта и типов взаимодействия субъектов в группе 416

Promising Methods and Means of Aerospace Flights Control
Перспективные методы и средства управления космическими полётами

1. *Т.Г. Вакурина, О.И. Лахин, Ю.С. Юрыгина, Е.В. Симонова, Д.Н. Коршиков, А.И. Носкова*
Корпоративная распределенная онтология для управления российским сегментом международной космической станции 435

2. *П.Н. Васильева, А.Г. Котов*
Многофункциональная информационная система для поддержки деятельности экипажа при разгерметизации 444

3. *А.В. Донсков*
Методика парирования аномальных ситуаций с использованием структурированных знаний для выбора рациональных решений 453

4. *В.В. Любимов, А.А. Василенко*
Моделирование вторичных резонансных эффектов в задаче спуска твердого тела с изменяемой малой асимметрией в атмосфере 464

5. *М.М. Матюшин*
Оперативное управление полетом космического аппарата как процесс целенаправленной переработки информации 470

6. *М.М. Матюшин, С.С. Огурцов, О.И. Лахин, Ю.С. Юрыгина, Д.Н. Коршиков, А.И. Носкова*
Адаптивный тренажер для подготовки специалистов главной оперативной группы управления полетом интегрированного российского сегмента международной космической станции 480

7. *Н.В. Мишурова*
Контроль состояния бортовых систем пилотируемых космических аппаратов с использованием современных технологий 488

8. *Д.В. Павлов, Д.С. Петров*
Настройка модели двигательной установки космического аппарата с использованием трехстадийного метода декомпозиции 495

9. *И.А. Рожкова, В.Ю. Никишов*
Бортовые тренировки по действиям в аварийных ситуациях как важная часть поддержания уровня подготовленности экипажа 500

10. *П.О. Скобелев, А.Б. Иванов, Е.В. Симонова, В.С. Травин, А.А. Жиляев*
Мультиагентное планирование сеансов связи между микроспутниками и сетью наземных станций 506

11. *П.О. Скобелев, А.Б. Иванов, Е.В. Симонова, В.С. Травин, А.А. Жиляев*
Концепция применения сервисно-ориентированной архитектуры при построении космических систем микроспутников 513

Control in Complex Technical Systems
Управление в сложных технических системах

1. *А.В. Банникова, А.А. Корнеева, М. Е. Корнет*
О непараметрических моделях и алгоритмах управления процессом кислородно-конвертерной плавки стали 521

2. *А.В. Банникова, А.А. Корнеева, М. Е. Корнет*
О непараметрических моделях и алгоритмах управления макрообъектом 528

3. *С.А. Белоконь, Ю.Н. Золотухин, К.Ю. Котов, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, М.А. Соболев, М.Н. Филиппов, А.П. Ян*
Управление квадрокоптером AR.DRONE при движении по заданной траектории с обходом препятствий 535

4. *А.В. Волынская, И.В. Сапожников*
Результаты компьютерного моделирования мультипараметрической модуляции 540

5. *С.С. Воротницкий*
Моделирование тягового электропривода, питаемого от аккумуляторных батарей для пассажирского транспортного средства 549

6. *В.А. Жмудь, А.Н. Заворин*
Метод проектирования энергосберегающих регуляторов для сложных объектов с частично неизвестной моделью 557

7. *Д.Я. Иванов, Э.В. Мельник*
Адаптивные методы децентрализованного диспетчирования в сетецентрических информационно-управляющих системах 568

8. *Б.Г. Ильясов, Г.А. Саитова, И.И. Сабитов*
Анализ устойчивости многосвязных систем автоматического управления с логическим регулятором 574

9. *А.А. Кацурин*
Разработка системы телеуправления мобильного робота с подвижной телекамерой 580

10. *А.Е. Колоденкова*
Моделирование процесса формирования требований к информационно-управляющим системам атомных станций на основе сетей Петри 586

11. *К.Ю. Котов, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, М.А. Соболев, М.Н. Филиппов, А.П. Ян*
Определение параметров сервопривода на основе экспериментальных данных 592

12. *А.Г. Куприн, А.В. Медведев*
Об исследовании и анализе непараметрического управления линейными динамическими процессами в обстановке помех 597

13. *Ю.Н. Лазарев*
Формирование многошагового управления при спуске аэрокосмического аппарата в атмосфере 604

14. *А.В. Медведев, Е.Д. Михов*
О непараметрическом моделировании и управлении Н-процессами 610

15. *О.Ф. Опейко*
Условия робастной оптимальности дискретно-непрерывной системы 617

16. *К.Е.Румянцев, С.В. Кравцов*
Спектральный анализ ошибок измерений бинокулярной системы технического зрения в задаче обоснования её параметров для мобильного робота 621

17. *Э.Г. Тумуров, В.И. Шелехов*
Определение требований к системе управления полетом квадрокоптера 627

18. *Д.К. Тюмиков*
Исследование структуры многомерных статистических связей в задачах идентификации сложных объектов 634

19. *А.Б. Филимонов, Н.Б. Филимонов*
Полиэдральные задачи упреждающего управления объектами с ресурсными и фазовыми ограничениями 640

20. *Л.Ю. Филимонюк*
Подход к обеспечению безопасности авиационно-транспортных систем путем парирования критических ситуаций 647

21. *А.Г. Ченцов, М.С. Кошелева*
Экстремальные задачи маршрутизации с ограничениями: динамическое программирование с элементами параллельной структуры 653

Measuring, Control and Diagnostics in Extreme Conditions
Измерения, контроль и диагностика в экстремальных условиях

1. *С.С. Анцыферов, К.Е. Русанов*
Время принятия диагностических решений в экстремальных условиях 667

2. *С.Л. Балабаев, Т.А. Корнилова, Е.Г. Лозовская, К.Е. Румянцев*
Стереоскопическая система контроля разновысотности головок тепловыделяющих сборок атомного реактора 673

3. *В.И. Батищев, И.И. Волков, А.Г. Золин*
Аппроксимационный подход к решению обратных задач восстановления сигналов в базисе экспоненциальных функций 678

4. *В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, П.Е. Подлипнов*
Аппаратно-программные средства автоматизации экспериментальных исследований семейств градуировочных характеристик систем измерения координат смещений торцов лопаток 682

5. *С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев*
Улучшение симметрии дифференциальной измерительной цепи с приближённым дифференцированием для преобразования индуктивностей одновитковых вихретоковых датчиков 687

6. *С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев*
Модель измерительной цепи с переменными во времени эквивалентными индуктивностями одновитковых вихретоковых датчиков 692

7. *С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев*
Результаты моделирования измерительных цепей с одновитковыми вихретоковыми датчиками и приближённым дифференцированием 697

8. *В.В. Гучук*
Аспекты взаимодействия программно-аппаратных средств регистрации потоков данных при испытании сложных объектов 704

9. *В.А. Засов*
Анализ устойчивости статистических методов разделения сигналов 710

10. *В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, В.В. Муратова*
Синтез и анализ методов оперативного измерения параметров периодических процессов на основе формирования дополнительных сигналов 717

11. *Ю.О. Растегаев*
Метод сглаживания температурного градиента в пьезогироскопе 723

12. *В.И. Орлов, В.В. Федосов, Е.А. Чжан*
О диагностике диодных матриц для космических аппаратов 730

Plenary Papers
Пленарные доклады

MANAGING COMPLEXITY

George Rzevski
The Open University, Milton Keynes, UK and
Multi-Agent Technology Ltd., London, UK
www.rzevski.net; george@rzevski.net
Tel: +44 7525 746 106

Key words: *complexity, complex systems, managing complexity, tuning complexity, self-organisation, adaptability*

Abstract
The seven key features of complexity are defined and discussed and applied to the Internet based global market. A method is described for managing external and internal complexity, suitable to both businesses and administrations. The paper contains examples of practical applications of managing complexity.

Introduction

Complexity of the Internet-based global market and social websites is relentlessly increasing. The globe is densely connected. We can talk, or exchange texts, or socialise over Facebook, or trade with more than half of all people who currently live in the world.

Defining Complexity

We all seem to have intuitive notions of complexity and yet there is no generally agreed precise definition. Many researchers in the field of Complexity Science find this to be a disappointment. On the contrary, this is how it should be. We can never have a precise definition of complexity because, well, Complexity is *Complex*. We don't have precise definitions of Knowledge, Intelligence, Emotion, or Creativity for the same reason, and yet the lack of precision does not prevent us from using these concepts effectively.

My broad definition of Complexity is as follows [1]:

Complexity is a property of an open system that consists of a large number of diverse, partially autonomous, richly interconnected components, often called Agents, has no centralised control, and whose behaviour emerges from the intricate interaction of agents and is therefore uncertain without being random.

Key notions here are openness (rich interaction with the environment); diversity, partial autonomy and interconnectedness of agents; lack of centralised control; and emergence.

The Seven Criteria of Complexity

I have identified seven key attributes that distinguish Complex Systems from Deterministic and Random [2]: *Connectivity, Autonomy, Emergence, Nonequilibrium, Nonlinearity, Self-Organisation and Co-Evolution*.

The Internet-based global market, perhaps the most interesting example of complexity [3], will be used here to illustrate the seven properties of complexity.

1) Connectivity

A complex system consists of a large number of diverse components, known as Agents, which are richly interconnected. Connections may vary in strength. Higher connectivity and weaker

connections, which can be easily broken and new formed, imply higher complexity. A complex situation is more like a cloud than a structure – there is no clear configuration and there is no clear boundary between the system and its environment.

This is exactly how we can describe the Internet-based global market: it consists of an exceedingly large number of suppliers, consumers, investors, lenders, savers, bankers, insurers, lawyers, accountants, consultants, etc. who are engaged with each other in trading. Connectivity, and therefore complexity, has increased beyond recognition with the widespread use of the Internet. Strength of the links between players is variable; some are almost permanent (long-term supplier-customer relations) but many links are very weak and they frequently change (some customers tend to change their orders/suppliers frequently).

2) Autonomy

Agents are not centrally controlled; they have a degree of autonomy but their behaviour is always subject to certain laws, rules or norms. Increased autonomy of agents implies higher complexity.

The global market has no central planning or control system and yet the "free market" is anything but free; market participants are subject to national and international laws, regulations, established norms of behaviour and many diverse undeclared pressures. The degree of autonomy of market participants affects the complexity of the market and can be adjusted by varying regulations to increase or decrease complexity as required.

3) Emergence

Global behaviour of a complex system emerges from the interaction of agents and, in turn, constrains agent behaviour. Emergent behaviour is unpredictable but not random; it generally follows discernible patterns (a new order). The emergent properties of a complex system are not present in the constituent agents.

Global distribution of supply to demand emerges from local transactions. It is unpredictable although certain patterns of behaviour can be detected (e.g., boom-bust cycles).

4) Nonequilibrium

Complex systems generate unpredictable disruptive events. As a rule, systems have no time to return to the equilibrium between two disruptive events and therefore their global behaviour is usually far from equilibrium. In cases where a system does manage to return to equilibrium, this will be an unstable equilibrium.

Beinhocker [3] states that markets clearly operate far from equilibrium; new transactions get done and previously agreed transactions get changed with such a frequency that the market has no time between two disruptive events to return to equilibrium.

5) Nonlinearity

Relations between agents are nonlinear (they exhibit properties such as: self-acceleration, self-amplification and even autocatalytic properties). Nonlinearity occasionally causes an insignificant input to be amplified into an extreme event (butterfly effect). More often, the accumulation of many insignificant inputs over time creates extreme disruptions (drift into failure). The point at which the accumulation of small disturbances is transformed into an extreme event is called the tipping point.

Extreme events in markets are exemplified by the financial crisis of 2008 [4]. Taleb [5] warns that as complexity of the Internet-based global market increases, extreme events may become more frequent and/or dangerous.

6) Self-Organisation

Complex systems self-organise, i.e., autonomously change their behaviour or modify their structure, to eliminate or reduce the impact of disruptive events (adaptability) or to repel attacks (resilience). However, after a disruption, a system may not fully recover, and in time its performance may deteriorate (systems tend to "drift into failure") due to the accumulation of small incremental changes.

The drift into failure may be stopped and reversed if constituent agents have propensity to spontaneously initiate self-organising activities aimed at improving performance whenever an opportunity presents itself (emergent intelligence, creativity). Some complex systems are capable of improving their performance by learning from experience.

Perpetual self-organisation is in evidence in the global market as participants react to any disruptive event by changing or cancelling transactions. Creativity is exercised when participants autonomously decide to initiate changes to improve their performance, i.e., by switching to a supplier offering higher quality services.

7) Co-Evolution

If we define the system environment as the set of all systems with which the system interacts, then we can postulate that complex systems are open, they adapt to their environments, and in turn, change their environments. The process is irreversible.

In other words, systems and their environments co-evolve. Co-evolution of the global economy, technology and society is well documented [1].

Negative and Positive Aspects of Complexity

I am interested in complexity primarily because it affects those who live and work in complex environments and therefore my research is directed towards discovering methods for managing negative features of complexity and taking advantage of features that are positive, from the point of view of those affected.

In general, frequent unpredictable disruptive events and nonlinearity, which causes extreme events, are the most difficult aspects of complexity to live with. Disruptive events include: ever changing patterns of demand, supply and competition; changes in previously agreed deals, orders and promises; delays, cancellations, failures and interruptions; security breaches, fraud, and hacking (1 billion of attacks were experienced in the 4th quarter of 2012).

Frequently occurring and unpredictable, disruptive events prevent us from sensibly planning our behaviour and acting upon our plans. Businesses and administrations have great difficulties in managing the allocation of resources to demands when the latter are volatile and impossible to forecast correctly.

Even more harmful are extreme events caused by nonlinearities in complex systems, such as a global financial crisis, on a large scale, or a sudden loss of an important client, on a smaller scale. A "drift into failure" due to the accumulation of many small servicing and administrative mistakes, which have resulted in at least one airline disaster [6] is a warning to executives and administrators who cannot master a switch to "complexity thinking" in spite of the overwhelming evidence that old paradigm does not work.

Self-organisation and co-evolution are, on the other hand, often considered to be positive sides of complexity.

Wouldn't it be useful, for example, to belong to a social, political and/or commercial organisation, which is capable of self-organising in reaction to an unpredictable disruption, and eliminating or, at least, reducing consequences of its impact? Spontaneously initiating performance improvements, or co-evolving in harmony with its environment?

A further extremely useful feature of complexity is the diversity of agents. It guarantees the survival of species. There are approx. seven billions of humans on the planet Earth, each one being unique and different from others. No attack, no epidemics will ever destroy all of us – diversity will ensure that the human race survives.

Examples of complex systems where the capacity to rapidly self-organise provides substantial resilience to strong external attacks include: epidemics, terrorist networks, human immune system and the Internet.

The relativity of notions “positive” and “negative” is highlighted by the above examples. The attribute of self-organisation for the propagation of a disease or of a terrorist network is positive for the disease and for terrorists, respectively, but is negative for their victims.

Finally, complexity is responsible for uncertainty and uncertainty creates opportunities. This paper aims at helping readers to exploit these opportunities.

Managing Complexity: Coping with External Complexity

Coping with complexity is defined here as a means of achieving desirable results under conditions of complexity that is not under our control (in other words, complexity of the environment in which we live and/or work).

The ability to cope with external complexity is very important, for example, for businesses that sell to global markets.

The best strategy for coping with complexity is to develop a capacity for self-organisation that will overcome or at least reduce consequences of disruptive events when they occur, in other words, to become *adaptive*.

As we said in the previous Chapter, building the capacity for self-organization into systems in which we live and work amounts to designing complexity into our life, which is counterintuitive. Common sense suggests we should attempt to simplify the complexity of the environment, which, of course, is not practical because by definition our environment is not under our control.

Managing Complexity: Tuning Internal Complexity

Tuning complexity is a process of modifying certain parameters of the complex system, which is under our control with the aim of decreasing or increasing its complexity.

Methods for tuning complexity are particularly important for those in charge of complex systems, for example, authorities that regulate financial services, healthcare, education, law and order, security and fraud detection as well as managers in charge of business processes such as logistics.

By experimenting with multi-agent models of complexity, we have identified key sources of complexity to be: *Connectivity, Connection Strength and Autonomy of constituent agents*.

The identification of sources of complexity is of great importance. It enables us to measure complexity and, in cases where we have a power to vary agent connectivity, inter-agent connection strength and agent autonomy, gives us a method for tuning complexity.

1) Connectivity

The Connectivity of agents denotes the degree to which an agent is connected to other agents in the system. If an agent is not connected to any other agent, its connectivity is 0. If an agent is connected to every other agent in the system, its connectivity is 1. In complex systems agent connectivity (C) is in the range of $0 < C < 1$.

The higher the connectivity of agents, the greater is complexity of the system.

Complex systems are by definition (see seven criteria of complexity) highly interconnected, which is an important reason for the uncertainty of their behaviour.

2) Strength of Connections

Strength of connections between agents denotes the degree of breakability of connections. The lack of connection has value of 0. The permanent connection has value of 1. In complex systems the strength (S) of inter-agent connections is in the range of $0 < S < 1$. Weaker connections are easier to break and make new connections, the feature that increases complexity and, therefore, the unpredictability of global behaviour.

The weaker the inter-agent connection, the greater is complexity of the system.

Weak connections that can be broken when the system self-organises to adapt to an event are an essential attribute of complexity. Strong connections resist self-organisation and very strong connections may prevent system from self-organising.

3) Autonomy

Autonomy of agents denotes the degree of freedom given to them to decide what to do. If an agent has no freedom of decision, its autonomy is 0. If an agent has full freedom to decide what to do, its autonomy is 1. In complex systems agent autonomy (A) is in the range of $0 < A < 1$.

The higher the autonomy of constituent agents, the greater is complexity of the system.

In complex systems the autonomy of agents is always restricted.

The relation between the connectivity and autonomy of agents, when the connection strength is kept constant, is shown in Fig. 1.

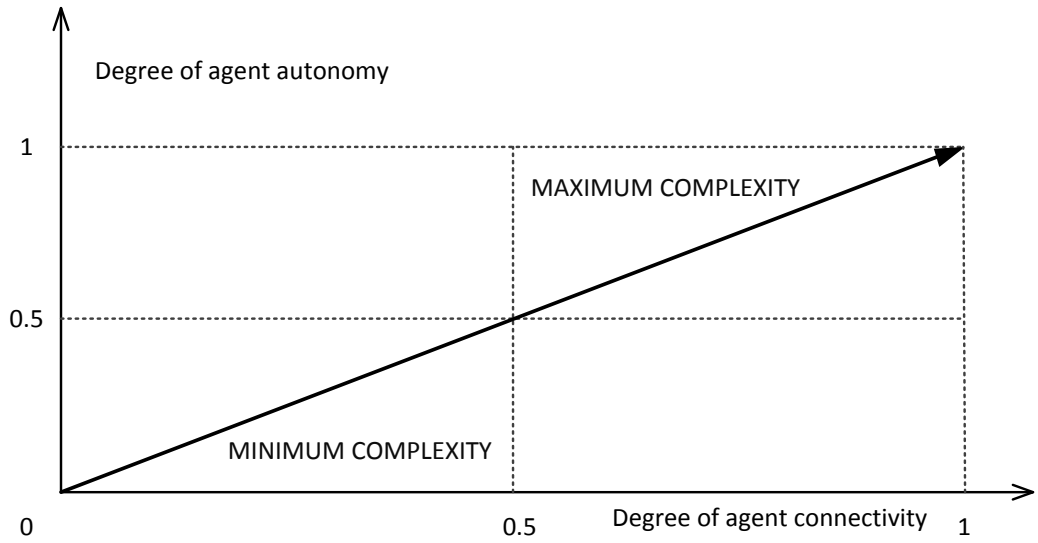


Figure 1 - Dependence of complexity on the degree of autonomy and connectivity of agents, when connection strength is constant

The relation between the inter-agent connection strength and autonomy of agents, when the connectivity is kept constant, is shown in Fig. 2.

Experiments with models of complex systems show that:

Greater agent autonomy, higher agent connectivity and weaker connection strength, i.e., greater complexity, fosters creativity, improves adaptability and resilience and increases the speed of recovery after extreme events.

On the other hand,

Restricted agent autonomy, reduced agent connectivity and greater connection strength, i.e., reduced complexity, enforces discipline, improves predictability, reduces probability of mistakes and fraud, reduces probability of extreme events, reduces creativity and reduces adaptability and resilience.

It follows that tuning complexity is a delicate process of balancing various complexity attributes with a view to achieving desired behaviour.

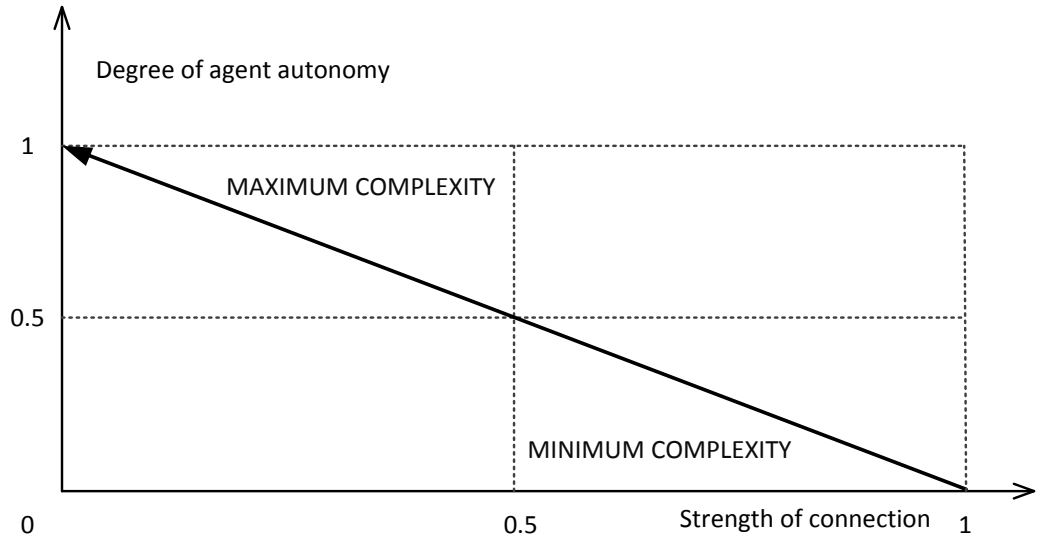


Figure 2 - Dependence of complexity on the degree of autonomy of agents and strength of inter-agent connections, when connectivity is constant

Whilst we cannot do much about complex physical and chemical systems, which are guided by natural laws, and about some social systems (like marriages), which are governed by social norms that are an inherent part of a culture (social norms do evolve but we don't know how to change them at will), we can certainly affect the behaviour of social, socio-technical, administrative and business systems that are guided by law, norms, constitutions, statutes, policies, rules and regulations.

Emergent behaviour of such systems can be kept within certain limits (attractors) by ensuring that regulations are sufficiently unambiguous to prevent random behaviour and yet sufficiently flexible to allow system certain freedom to experiment when facing new challenges.

The best strategy is to introduce variable regulations – tighter when the system operates in a normal mode and much looser when the system is recovering from effects of an extreme event.

It is interesting to note that this research conclusion is directly opposite to what those in charge attempted to do before and after the worldwide financial crisis of 2008.

Regulations cannot prevent system nonlinearities creating occasional extreme events. To reduce severity and frequency of extreme events we must tune agent connectivity and, possibly, adjust strength of connections between agents. It is often necessary to ensure that certain parts of a system are more complex than the others. To achieve uneven distribution of complexity over a network it is necessary to organise agents in regions, with high internal connectivity within each region and a sparse connectivity between regions, as shown in Fig. 3.

Low connectivity ensures that instabilities cannot propagate between regions whilst high connectivity inside regions enables high regional adaptability. Increasing the strength of inter-regional connections and weakening the strength of internal connections within regions, may also help. By redesigning financial services networks in this manner we would impede propagation of instabilities created in one region to other regions.

There exists a widespread misconception that complex systems cannot be designed. This is not correct. The design of complex systems is however quite different from the design of complicated systems; it is less precise and the final outcome cannot be predicted, only projected. Tuning complexity is an important part of designing complex systems.

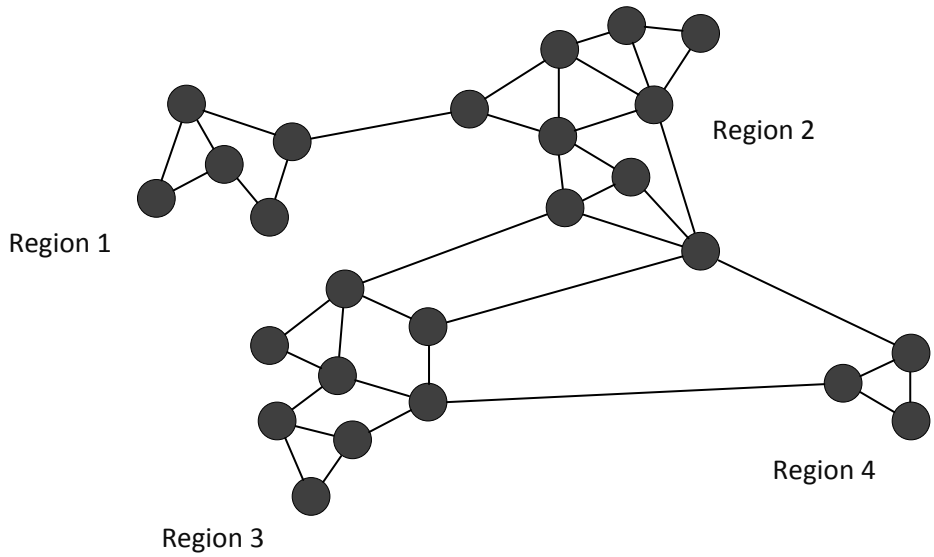


Figure 3 - Partitioning a large network into regions prevents propagation of extreme events

Modelling Complexity

There are conceptual difficulties in defining modelling if the situation, which is being modelled, is complex, and therefore: without clear boundaries, characterised by emergent behaviour, never in equilibrium, with nonlinear relations between agents, self-organising and evolving.

Modelling of complex "reality" is definitely more art than science. Our long experience in modelling of complex business situations and processes is outlined below. There are two key rules:

1) Models must have *Requisite Complexity*. Models of complex systems must be capable of adapting to changes experienced by the system that is being modelled, and the adaptation must be autonomous (without waiting for instructions from the modeller), which is only possible if *models are complex.*

2) Models must have *Requisite Granularity*. For example, if we model a transport business, it will be sufficient to assign an agent to each truck, but if we study the maintenance of transportation resources, it would be necessary to assign an agent to each component of a truck.

The key implication of this thesis is that current-generation computer programs cannot be used as models for complex situations because they are not adaptive. They cannot change by themselves - they must be instructed to do so by programmers. At present, only multi-agent software technology can support adaptation.

There are many complex issues where constituent components and their interactions can be identified and modelled by constructing a Network Model of requisite complexity and granularity. Most business situations and many social, economic, security and technological problems, as well as the evolution of urban systems, fall into this category. We refer to such issues as Large-Scale Complex.

Once a suitable Virtual World is constructed in complex adaptive software, it could be used to simulate behaviours of a complex issue in the Real World under different states of its environment, e.g., studying behaviour of a supply chain under varying market conditions [1].

Complexity of certain unresolved critical issues (such as global warming, poverty and population growth) is so high that we can expect, at best, to build much-simplified models of these issues with a view to gaining some insight into their resilience to our attempts to resolve them. Let us

refer to such issues as Exceedingly Complex Issues. Exceedingly complex issues nevertheless can be successfully modelled. A brilliant work on modelling of the population growth is done by Kapitza [7].

My investigation of systemic failures leading to the current worldwide financial crisis [4] belongs to the category of modelling exceedingly complex issues.

Adaptability

There is evidence that complexity of the world in which we live and work will continue increasing, at least in the near future. Therefore, for organisation and individuals who plan to survive and prosper under conditions of complexity, it is essential to become *Adaptive*. I can rephrase this assertion by saying that Adaptability is the key Success Factor for all who operate in the Internet-based global market, which is characterised by frequent occurrence of unpredictable disruptive events.

Adaptive Allocation of Resources

All problems discussed here have been formulated as *the allocation of resources to demands*, as this is one of the most difficult issues to resolve under conditions of complexity. For this purpose resources are classified into:

- Human (e.g., airline pilots, crew, service engineers, insurance assessors, software developers)
- Physical (e.g., machines, transport, storage, plants, buildings, land)
- Financial (e.g., working capital, investments, payment of invoices)
- Knowledge (e.g., patterns discovered in data or text)
- ERP (Enterprise Resource Planning) systems, which were developed for industrial economy characterised by stable market, work in batch mode (which was appropriate when the Economy of Scale was a key critical success factor) and handle human, physical and financial resources, without any reference to knowledge as a business resource. ERP systems are still considered the most important software component of every current enterprise although market conditions have changed beyond recognition.

It is our assertion that for enterprises that deliver to the current highly complex global market the allocation of resources must be adaptive and must include knowledge as a business resource.

Seven Criteria of Adaptability

From my experience in delivering adaptive systems for the allocation of resources to industry and administrations I have distilled the seven critical attributes of adaptability:

1) Real-Time Decision Making

Monitoring of disruptive events and deciding how to deal with an event before the next one occurs is done in real time, which means before the next disruption occurs. This usually involves re-scheduling of the previously agreed allocation of resources to demands between two consecutive disruptive events.

2) Delayed Commitment

After the decision on dealing with a disruptive event has been made, the implementation of the decision (sending of the new schedule to affected agents) is delayed as long as practical in order to allow time for schedule improvements. Due to repeated adaptations, complex systems tend to experience a deterioration of performance, often called “a drift into failure” and it is therefore necessary to design agents with propensity to initiate self-organising processes aimed at performance improvement and, by means of a delayed commitment, to ensure that there is a sufficient time for these processes to be performed.

3) Minimising Consequences of Disruptions

Any re-scheduling required to absorb or neutralise a disruptive event is limited only to the affected demands/resources.

4) Distributed Decision Making

Constituent agents are empowered to allocate resources to demands by a process of negotiation. Distributing decision-making and coordinating decisions by negotiation, rather than by controlling organisations top-down, ensures that requirements and preferences of all stakeholders are taken into account even when they are in conflict; the emergent final decision is based on trade-offs and conflict resolutions.

5) Anticipation

The future cannot be predicted but we can anticipate it. The trick is to employ the dynamic forecasting of disruptive events, where the term "dynamic" indicates that forecasts are regularly updated by taking into account actual occurrences of events.

6) Experimentation

In adaptive systems decision makers are given opportunities to experiment with novel methods for improving performance under conditions of frequent occurrence of disruptive events, whenever required.

7) Learning from Experience

An effective way of learning from experience is to dynamically discover patterns linking decisions to performance.

Adaptive Strategy

The key element of adaptability is *Adaptive Strategy*, a strategy that acknowledges the need for adaptation to complexity of the working environment, identifies complex features of the environment, outlines behavioural options conditioned on probable futures, and sets procedures for adaptive behaviour.

An important part of adaptive strategy is to establish a blueprint for an *Enterprise Knowledge Base* and to plan *Strategic Redundancy* of resources, an appropriate reserve of resources to support a variety of options, some of which may never be implemented, a feature that is important when one cannot predict which resource will be required and when.

This notion is in conflict with a generally accepted wisdom of designing "lean business processes" and "just in time" production. Adaptability requires a certain surplus of resources, just in case.

Note that the above attributes are equally effective when the system is electronically attacked (fraud or terrorism). Therefore an adaptive system is by definition *Resilient* to fraud and electronic attacks.

Adaptability can be achieved only by employing advanced technology. The scope of the problem and required speed of decision-making are beyond human capabilities. Software technology eminently suitable for implementing adaptability is described in the next chapter.

Conventional information technology is not capable of supporting Adaptability. Current schedulers and optimisers cannot handle dynamics of contemporary markets; they are designed to start from scratch whenever a change in data is detected and need hours to find the optimal operating point, which becomes obsolete even before it is computed.

Practical Applications

Method for managing complexity outlined in this paper has been applied in the course of the last 15 years to a very large number of practical problems in industry, as described in [1]. The list includes real-time scheduling of seagoing tankers, car rentals, road transport, supply chains, railways, swarms of satellites, service teams, etc.

Conclusions

Managing complexity is a new art, which is very different from deterministic problem solving and requires a new mindset. It is high time to start developing complexity management skills on a large scale.

References

[1] Rzevski, G., Skobelev, P., "Managing Complexity", WIT Press, Southampton, Boston, 2014.

[2] Rzevski, G., "A practical Methodology for Managing Complexity". Emergence: Complexity & Organization – An International Transdisciplinary Journal of Complex Social Systems. Volume 13, Nos. 1-2, 2011, ISSN 1521-3250, pp. 38-56.

[3] Beinhocker, Eric, "The Origin of Wealth: Evolution, Complexity and the Radical Remaking of Economics". Random House Business Books, 2007.

[4] Rzevski, G., "Using Tools of Complexity Science to Diagnose the Current Financial Crisis". ISSN 8756-6990, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2010, Vol.46, No. 2.

[5] Taleb, Nassim Nicholas, "The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable". Penguin Books, 2007.

[6] Dekker, S., "Drift into Failure", Kindle edition, Amazon, 2012.

[7] Kapitza, S., (2006). "Global Population Blow-Up and After: The Demographic Revolution and Information Society". *Report to the Club of Rome*, ISBN 3-9809723-5-6, 2006.

ЭВОЛЮЦИЯ ИДЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ В ОБЩЕСТВЕ: ОТ КИБЕРНЕТИКИ К ЭВЕРГЕТИКЕ

В.А. Виттих

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
vittikh@iccs.ru
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *кибернетика, эвергетика, развивающееся общество, процессы управления, принятие решений, постнеклассическая научная рациональность, человек культуры*

Abstract

Is being substantiated the necessity to create a science of management processes organization in a developing society, which is proposed to be called Evergetics (Greek *s* – benefactor) and to be based on postnonclassical scientific rationality. The birth of Evergetics is associated with an ongoing transformation of a survival society in a developing society, and of "the economic man" - in "the man of culture". The Evergetics proceeds from the fact that every member of a developing society is interested in augmenting his cultural heritage he is producing, which entails, with the help of the "invisible hand of the culture market (understood in a wide-sense)", a raise of cultural potential of the society as a whole and, as a consequence, an increase in moral and ethical managerial decisions and benevolent actions in public life.

Введение

На протяжении всей своей многовековой истории человечество боролось за выживание, используя для этого сначала традиции и авторитарные методы, а затем рыночную экономику [1]. В таком «обществе выживания» происходило расслоение людей на богатых и бедных, постоянные войны, экономические кризисы, нарастание экологических проблем, падение безопасности и многие другие беды, что не позволяет до сих пор говорить об удовлетворительном качестве жизни людей, населяющих нашу планету. Так, например, «в Соединённых Штатах почти 40 миллионов человек живут в бедности, а это в несколько раз больше населения Швеции. В мире из 192 стран 162 страны имеют население, не превышающее численности бедняков в США», - писал известный учёный, специалист по системному анализу, управлению и исследованию операций Расселл Л. Акофф [2]. По его мнению, «бедность стала социально наследуемой характеристикой во многих высокоразвитых капиталистических странах», а страны социализма, имеющие приоритетной целью распределение благ, чаще всего «заканчивали распределением бедности». Поэтому Р.Л. Акофф поставил вопрос о возможности такого «способа организации общества, который бы стимулировал большее общественное и индивидуальное развитие, чем это делают социализм и капитализм», и назвал его развивающимся обществом. Изложив своё видение организации развивающегося общества, автор статьи [2], тем не менее, полагал, что его «цель состоит не в том, чтобы завершить дискуссию, а в том, чтобы её начать». В продолжение начатой дискуссии в предлагаемой статье ставится задача обоснования необходимости создания науки об организации процессов управления в развивающемся обществе, которая должна иметь не только теоретическое, но и важное прикладное значение для практики государственного и корпоративного управления.

1 Винеровские ожидания результатов кибернетизации общественной жизни

В середине прошлого столетия Н. Винер в своей монографии «Кибернетика и общество» [3] сформулировал принципы организации управления в кибернетическом обществе, базирующемся на широком использовании средств вычислительной техники во всех сферах человеческой деятельности, и изложил своё видение результатов кибернетизации общественной жизни. Нужно заботиться о том, писал он, чтобы «новые возможности использовались на благо человека, в интересах увеличения его досуга и обогащения его духовной жизни, а не только для получения прибылей и поклонения машине как новому идолу». Н. Винер видел в кибернетическом обществе развивающееся общество, которое (в отличие от общества, поддерживающего status quo) часть своих ресурсов резервирует для развития будущих поколений, поскольку «чем больше мы берём от мира, тем меньше мы оставляем в нём, и в конечном итоге мы вынуждены будем оплатить наши долги в тот самый момент, который может оказаться очень не подходящим для того, чтобы обеспечить продолжение нашей жизни».

В обществе, в котором автоматические устройства участвуют в процессах подготовки и принятия решений и «знают», как выполнять возложенные на них функции, Н.Винер пишет, что «есть ещё одна вещь – более важная, чем «знание, как делать», это «знание, что делать», под которым «мы имеем в виду не только то, каким образом достичь наших целей, но и каковы должны быть наши цели». И этот выбор целей, задач, критериев и ограничений должна делать не управляющая машина, а люди, которые, в зависимости от своих ценностных ориентиров, могут использовать достижения второй промышленной революции «как на благо человечества, так и для его уничтожения». «Час уже пробил, и выбор между добром и злом у нашего порога», - так завершается десятая глава монографии [3]. В этом выборе Н.Винер видел главную проблему, решение которой люди стараются, по возможности, отодвинуть «на потом»: «раз мы продолжаем притворяться, что в мире всё обстоит хорошо, значит мы затыкаем уши, чтобы не слышать голоса предков, пророчествующего войну». При этом он надеялся, что «корни добра прорастут», несмотря на то, что «впереди ещё много опасностей».
Однако успехи кибернетизации общества оказались в большей степени связанными не с тем, что «мир стал добрее», а с «инструментальной результативностью»: на передний план вышло широкомасштабное применение средств информатики и вычислительной техники, ставшее зачастую самоцелью. Например, тотальная компьютеризация школ вовсе не означает, что школьники, освоившие работу с компьютерами и получившие доступ в Интернет, стали более грамотными и воспитанными. Следует признать, что «поклонение машине как новому идолу» всё же произошло, несмотря на предупреждение Н.Винера, а *человек, с его насущными жизненными потребностями, духовными запросами, стремлением к безопасному существованию и творческому развитию, практически выпал из поля зрения создателей кибернетических систем*, которых интересовали в первую очередь технико – экономические показатели этих систем, а уж потом так называемый «человеческий фактор», выполняющий скорее (с их точки зрения) роль, препятствующую эффективному функционированию разработанных систем. И дело было не только (и даже не столько) в практике кибернетизации, сколько в теоретических основах и кибернетики, и управления, рассматривавших человека, разве что, как «поведенческую систему», преобразующую «стимул» в «реакцию». Поэтому *появилась потребность вернуть в теорию человека, наделённого сознанием, познающего и преобразующего мир во взаимодействии с другими людьми*, а для этого должна быть выбрана адекватная методологическая база.

2 Постнеклассический подход к науке об организации процессов управления в развивающемся обществе

В эпоху Просвещения, связанную с установлением капиталистических отношений, в обществе началось «победоносное шествие» рационализма, означающего веру в неограниченные возможности человеческого разума [4]. Механистическое миропонимание разрабатывалось на основе понятий ньютоновского естествознания в трудах Гольбаха и Дидро, а Гельвеций в объяснении движущего принципа поведения людей исходил из утилитаристской концепции разумного эгоизма, постулирующего, что в основе всех поступков и чувств человека лежит материальный интерес [5]. Адам Смит в своём «Исследовании о природе и причинах богатства народов» ввёл понятие «экономического человека», который, движимый мотивами личной выгоды, с помощью «невидимой руки» рынка «часто более действительным образом служит интересам общества» [1]. Произошедшая научная революция, по своей сути, состояла «в освобождении знания от этических ценностей» [6]: приобретаемое наукой знание не должно зависеть от моральных, нравственных норм и каких-то субъективных качеств человека – исследователя. И такая «объективистская» позиция стала играть тормозящую роль в развитии наук, прежде всего обществознания (в том числе науки о процессах управления в обществе), поскольку *общество является продуктом сознания и воли людей, его составляющих*, а не каким – то «квазиприродным» объектом, функционирующим «объективно», без участия субъектиного начала – людей.

В своей работе «Кризис европейских наук и трансцендентальная феноменология» Э. Гуссерль увидел основную причину болезненного состояния науки как раз в том, что расщеплённая *«объективная» наука потеряла из фокуса внимания человека* [7]. Поскольку для достижения объективности (как того требует классическая гносеология) субъект должен наблюдать объект со стороны, то люди должны быть «выведены» из общества, если оно является объектом их познания и деятельности. Но тогда это будет уже не общество. Ведь изначально оно представляет собой совокупность взаимодействующих индивидов, каждый из которых имеет свой субъективный взгляд на мир, т.е. по определению *общество является гетерогенным (неоднородным)*. И эта неоднородность является главной проблемой при изучении общества и организации в нём процессов управления. Чтобы решать её, используется методическиий приём, избавляющий исследователей от «неудобной» реальности, который полагает общество гомогенным (однородным).

Гипотеза об однородности общества, используемая в классическом менеджменте, *делает людей обезличенными*: каждый из них становится «человеком вообще» (a man). В этом случае субъект может посмотреть на объект – общество «со стороны», становясь «хозяином положения», который сводит социальные связи к предписанным им (субъектом) устойчивым правилам (например, устанавливает иерархические отношения между «начальниками» и «подчинёнными»). Более того, он может строить формализованные модели поведения людей, описывать правила коммуникации между ними и т.п. В основе социальной гомогенности лежит производительная, полезная деятельность, а человек, с точки зрения гомогенного общества, - всего лишь функция коллективного производства [8], критерии оптимальности которого, целевые функции, ограничения и т.п. определяет субъект, который видит себя на вершине управленческой иерархии, где он принимает решения.

Гетерогенное общество состоит из неоднородной совокупности людей, *каждый из которых – конкретный живой человек с его субъективными представлениями о мире (the man)*. Человек, коммуницирующий с другими людьми, осознаёт себя, вместе с ними, в одной или нескольких проблемных ситуациях, поскольку общество рассматривается как «калейдоскоп ситуаций». *Интерсубъективность сознания побуждает людей совместно искать выход из сложившейся ситуации*, для чего общими усилиями они должны создать разделяемую всеми «интеграционную платформу» знаний, используемую для принятия управленческих решений. При этом структура отношений между людьми строится на

принципе лоурархии (lowerarchy) [2], когда «нижестоящие» элементы являются источниками ресурсов и власти для «вышестоящих», в отличие от жёсткой иерархической организации «сверху вниз», исходящей из диктата верховной власти. Лоурархия придаёт структуре общества гибкость и является основой его развития. Таким образом, если гомогенная модель общества изначально превращает людей в «однородную массу», то *гетерогенное представление об обществе позволяет иметь дело с конкретным индивидом, являющимся одновременно и субъектом, и объектом управления, и учитывать его ценностные ориентиры и разнообразные интересы в процессах принятия решений об урегулировании проблемной ситуации, в том числе при выборе целей, задач, критериев и т.д.* Иными словами, при таком подходе науку об организации процессов управления в развивающемся обществе необходимо строить на основе *постнеклассической научной рациональности*, учитывающей «соотнесённость получаемых знаний об объекте не только с особенностью средств и операций деятельности, но и с ценностно – целевыми структурами», поскольку «современная наука на переднем крае своего поиска поставила в центр исследований уникальные, исторически развивающиеся системы, в которые в качестве особого компонента включён сам человек» [9]. Следует отметить, что принципы постнеклассической рациональности положены в основу построения теории интерсубъективного управления [10], которую можно рассматривать как один из первых шагов на пути создания науки об управлении развивающимся обществом.

3 Трансформация общества выживания в развивающееся общество

Одной из наиболее значимых проблем любого общества является проблема согласования индивидуальных и групповых интересов людей. Из каких соображений отдельно взятый человек, имеющий субъективное представление о мире и собственную шкалу ценностей, будет действовать в интересах группы, на благо общества, «вплетаясь» в социальную ткань? Адам Смит дал ответ на этот вопрос, *сформулировав концепцию «экономического человека» и постулировав, что в обществе выживания люди связаны разделением труда как единственным способом удовлетворения их потребностей*. Работая на себя, человек одновременно работает и на общество. Такой механизм согласования личных и общественных интересов И. Кант назовёт впоследствии «автоматом», обеспечивающим «патологически вынужденное согласие» в обществе, поставив задачу гуманизировать его, превратив в «моральное». Движение в этом направлении он будет считать основной целью всей истории человечества, которое будет вечно стремиться и приближаться к ней, но не имея шансов полностью достичь её [5].

Однако отсутствие надежды на осуществление мечты о вхождении в «светлое будущее» вовсе не означает, что к этой цели не нужно стремиться, поскольку в противном случае жизнь в человеческом обществе будет сопровождаться катастрофами и социальными потрясениями всё возрастающей силы. Процессы управления в обществе должны быть организованы таким образом, чтобы *исключать, по возможности, всякое проявление зла, чтобы принимаемые решения были направлены на достижение благих целей*, связанных с повышением качества жизни людей. А сделать это можно только *при условии повышения уровня культуры как отдельных людей, так и общества в целом*.

Культура – это «система исторически развивающихся надбиологических программ человеческой жизнедеятельности (деятельности, поведения и общения), обеспечивающих воспроизводство и изменение социальной жизни во всех её основных проявлениях» [5]. *В таком широком понимании культура включает в себя нравы и обычаи, язык и письменность, науку, технику, искусство, экономику, постановку воспитания, религию, общественно – политическое устройство общества и т.д.* [11]. Культура не только хранит и транслирует социальный опыт, передавая его из поколения к поколению, но и «генерирует новые программы деятельности, поведения и общения, которые, реализуясь в соответствующих

видах и формах человеческой активности, порождают реальные изменения в жизни общества» [5].

Человек, будучи творением культуры, вместе с тем является и её творцом. Он становится личностью только благодаря усвоению транслируемого в культуре социального опыта, но человек способен изобретать и новые образцы культуры, которые могут соответствовать социальным потребностям. В этом случае они включаются в культуру и начинают программировать деятельность других людей. Индивидуальный опыт превращается в социальный, и в культуре появляются новые состояния и феномены, закрепляющие этот опыт [4]. *Человека, который не только придерживается принятых в обществе культурных норм (что делает «культурный человек»), но и участвует в создании новых образцов культуры, будем называть «человеком культуры».* Человек культуры является ключевой фигурой в развивающемся обществе, находящемся «за пределами социализма и капитализма» [2]. Ведь чем динамичней общество, тем большую ценность обретает уровень культурного творчества, адресованный к будущему [4]. В таком обществе каждый человек культуры должен стремиться к преумножению производимого им персонального культурного наследия (а не просто к личному обогащению) и, как следствие, к повышению культурного потенциала общества в целом (а не только «богатства народов») с помощью «невидимой руки рынка культуры».

Последний тезис, по существу, представляет собой видоизменённую классическую формулу Адама Смита, которая работает и в современном мире, «где результатом и целью экономической жизни являются потребляемые всеми потоки товаров и услуг», хотя в «Богатстве народов» он «обращался к своей эпохе, излагая в этом труде доктрину, которая должна помогать при управлении империей» [1]. Если же заглянуть немного вперёд, то *можно увидеть всё возрастающую роль культуры (в широком смысле) в жизни общества*, которая выражается, в частности, в проявлениях инновационной активности практически во всех сферах человеческой деятельности. Это означает, что *общество выживания постепенно трансформируется в развивающееся общество, а «экономический человек» - в «человека культуры».*

4 Эвергетика

Как уже отмечалось в разделе 1, Н. Винер видел основные результаты кибернетизации общественной жизни в удовлетворении насущных потребностей человека и его духовных запросов, в творческом развитии человека и обеспечении его безопасности и т.п., которые, к сожалению, не были достигнуты, в большей степени, по причинам методического характера: исследования базировались на принципах классической научной рациональности, которая имеет ограниченные возможности при решении задач управления обществом. Постнеклассический подход открывает новые возможности построения науки об организации процессов управления в развивающемся обществе, «возвращая» человека в теорию, из которой он был исключён классической наукой об управлении, а это означает, что *новая наука должна быть связана с ответами на вопросы о смысле и назначении человеческого бытия, использовать в своём арсенале средств духовные и нравственные категории*. Главным «действующим лицом» этой науки должен стать человек культуры, устремлённый к совершению благих действий.

Исходя из изложенных соображений, науку об организации процессов управления в развивающемся обществе предлагается назвать эвергетикой, поскольку «эвергет» по-гречески означает «благодетель», и дать ей следующее определение: *эвергетика – наука об организации процессов управления в развивающемся обществе, каждый член которого заинтересован в преумножении производимого им культурного наследия, влекущего за собой повышение культурного потенциала общества в целом и, как следствие, увеличение доли нравстенных*

управленческих решений и соответствующих им благих действий в общественной жизни. Эта междисциплинарная наука должна опираться как на гуманитарные и социальные науки, так и на теорию управления, информатику и на некоторые другие дисциплины, относящиеся к разряду точных наук. Такая полипредметность связана с тем, что в эвергетике человек рассматривается, с одной стороны, как субъект, вооружённый методами и средствами исследования ситуаций и принятия решений по их урегулированию, а с другой стороны, - как объект воспитания, обучения, формирования мировоззрения и умения коммуницировать с другими людьми и т.п.

Здесь уместно отметить, что эвергетика могла бы базироваться на трудах ученого - обществоведа Карла Поланьи, ставившего своей целью «поиск «третьего пути», создание теоретической основы идеального общественного устройства, где человек является главной ценностью» [12]. К. Поланьи исходил из того, что люди взаимодействуют друг с другом на основе трёх принципов: дарообмена (реципрокности), централизованного перераспределения (редистрибуции) и рынка. Причём, если рыночные отношения предполагают взаимную калькуляцию выгод и издержек, то обмен дарами осуществляется без гарантий возмещения затрат в будущем (можно говорить только об ожидании каких – то возможных ответных действий). Тем не менее, как считал Поланьи, рыночная система для своего удовлетворительного функционирования требует соблюдения культурных (нерыночных) факторов – честности, трудолюбия, ответственности, доверия партнёров и т.п. Сама же рыночная система разрушает эти признаки культуры, доставшиеся ей от предшествующих социально – экономических формаций, способствуя нестабильности общества. Поэтому возможность обеспечения гуманного существования человечества Поланьи видел в «культурной революции, позволяющей подчинить экономику человеческому сообществу» [12].

Заключение

Правомерно задать вопрос: зачем вводить новую науку, когда есть её предшественница – кибернетика, которая ещё в середине прошлого века ставила подобные задачи по управлению обществом? Дело в том, что, первоначально возведённая в ранг новой философии и методологии науки, кибернетика не решила этих задач и не оправдала взятых на себя обещаний, что привело, в конечном счёте, к «крушению мифа о кибернетическом чуде, способном решать все мыслимые проблемы бытия», а кибернетика «была тихо предана забвению и незаметно ушла из стана научного познания» [13]. Поскольку многие проблемы управления обществом так и остались нерешёнными, предлагается начать исследования в рамках эвергетики – науки об организации процессов управления в развивающемся обществе, базирующейся на постнеклассической научной рациональности и ориентированной на «человеческое отношение к человеку», или, как писал Н. Винер в заглавии его книги, опубликованной в 1950 году, «The Human Use of Human Beings».

Благодарности

Автор выражает благодарности члену – корреспонденту РАН Д.А. Новикову, д.т.н. С.В. Смирнову, д.т.н. П.О. Скобелеву, д.т.н., профессору Н.Б. Филимонову за ценные советы и замечания, высказанные в процессе работы над статьёй, и к.филол.н., доценту Л.И. Шевченко за помощь, оказанную при выборе термина "эвергетика".

Список литературы

[1] Роберт Л. Хайлбронер. Философы от мира сего. – М.: Астрель: CORPUS, 2011. - 432 с.
[2] Расселл Л. Акофф. За пределами социализма и капитализма: развивающееся общество. – Проблемы управления в социальных системах, том 1, выпуск 1, 2009, с.112 – 140.
[3] Норберт Винер. Кибернетика и общество. – М.: Издательство иностранной литературы, 1958.
[4] Всемирная энциклопедия: Философия. – М.: АСТ, Мн.: Харвест, Современный литератор, 2001. – 1312 с.
[5] Новая философская энциклопедия (в четырёх томах). – М.: Мысль, 2010.
[6] С.Г. Кара – Мурза Кризисное обществоведение. Часть первая. Курс лекций. – М.: Научный эксперт, 2011. – 464 с.
[7] А.Ф. Зотов. Современная западная философия. – М.: Проспект,2010. – 608 с.
[8] Современный философский словарь. – Лондон, Франкфурт – на – Майне, Париж, Люксембург, Москва, Минск/ «ПАНПРИНТ», 1998.
[9] В.С. Степин, В.Г. Горохов, М.А. Розов. Философия науки и техники. – М.: Гардарики, 1996.
[10] В.А. Виттих. Введение в теорию интерсубъективного управления. – Сама-ра: Самарский научный центр РАН, 2013, - 64с.
[11] Философский энциклопедический словарь. – М.: ИНФРА – М, 1997. – 576 с.
[12] Н.А. Розинская, Ю.В.Латов. Введение. Труды и дни Карла Поланьи (1886–1964). – В сборнике ««Великая трансформация» Карла Поланьи: прошлое, настоящее, будущее» (под общей редакцией Р.М. Нуреева). – М.: ГУ–ВШЭ, 2007, с.11 – 21.
[13] Е.Д. Теряев, Н.Б. Филимонов, К.В. Петрин. Мехатроника как компьютерная парадигма развития технической кибернетики. – Мехатроника, автоматизация, управление, № 6, 2009, с. 2–11.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРАТЕГИЯ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ЦИВИЛИЗАЦИИ

В.Ф.Меньшиков

Центр экологической политики и культуры России
119991, Москва, ул. Вавилова, 26, Россия
ecopolicy@ecopolicy.ru
тел: +7 (495) 952-24-23, +7 (495) 952-30-07

Ключевые слова: *проектируемое будущее, устойчивое развитие, топливно-энергетический баланс (ТЭБ), экономика ТЭБ, структура современного мирового ТЭБ, углеродная энергетика, климатические изменения, энергопотребление, новая парадигма энергопотребления.*

Abstract
One of the most important factors in forecasting model for sustainable development of civilization - is the world energy balance (WEB), which is going under a transformation. State, constrains and a structure of WEB for now and for the period of the 21 century were considered. Also a scenario of reducing carbon dioxide gas as a major factor of climate change stabilization was considered.

Введение

Пока мир имеет фрагментарное проектирование будущего. Общее видение, риски в устойчивом развитии цивилизации, конструкцию глобальных рынков можно контурно сформулировать до 2030 г., хотя отдельные прогнозы имеются до 2100 г. Часть государств уже перешла от сценарно-альтернативного прогнозирования будущего к системному планированию. Будет ли повсеместно осуществлен переход от сценарного прогнозирования к нормативному планированию к 2030 г. — вопрос пока открытый.

Один из важнейших факторов в прогнозных моделях это мировой топливно-энергетический баланс (далее — ТЭБ). Отметим, что ТЭБ - объект не столько аналитики, сколько политики. Управление ТЭБ идет через мощное государственное вмешательство. Энергетика стала ключевым вопросом как внутренней, так и внешней политики, на нее направляется большая часть государственных расходов.

Международное энергетическое агентство (МЭА; англ. International Energy Agency, IEA) составляя прогноз энергетики на 2030 г. зафиксировало несколько основных трендов, которые будут определять направления развития сектора энергетики [3].

1 Углеродная энергетика

Все более очевидны ресурсные ограничения для углеродной энергетики, которая «обречена» на рост своей стоимости:

- пики добычи конвенционной, т.е. традиционной, нефти большинством стран уже пройдены;
- глобальный пик добычи угля планируется в ближайшие 10–20 лет, себестоимость его добычи возрастает;
- перспективы газа более благоприятны, в последние годы запасы газа существенно возросли, но преимущественно за счет неконвенционного — пока что значительно более дорогого — газа. В частности, несколько государств объявили о наращивании запасов за счет оценки залежей сланцевого газа. В число крупных обладателей сланцевого газа

наряду с США могут войти такие страны, как Польша, Великобритания, Франция, Германия и некоторые другие, в которых ведется геологоразведка;

- будет идти удорожание проектов добычи углеводородов, освоение все более глубоких пластов на океанских шельфах, в арктических зонах и пр.;
- тяжелая нефть значительно дороже легкой. Если рост стоимости ресурса продолжится, потребители будут стремиться ограничить потребление нефти;
- объемы по добыче углеводородов столь масштабны, что оплатить их в нынешней ситуации мирового кризиса можно будет только с привлечением государственных средств, что достаточно трудно, учитывая общую не простую ситуацию с государственными финансами.

Расчет полного «жизненного цикла» сверхкрупных неуглеродных технологических комплексов будет произведен не ранее 2020-х гг. Эти проекты настолько сложные, длительные в эксплуатации и масштабные по воздействию на экосистемы, что экономисты пока не в состоянии посчитать их реальную стоимость.

Для достоверного экономического расчета нужна полнота данных всего «жизненного цикла» энергетических комплексов. Первые расчеты «жизненных циклов» проводились в атомной энергетике, но оценка последствий аварий на АЭС «Фукусима–1», а также длительный тренд удорожания строительства АЭС говорит о том, что сейчас «ядерный ренессанс», провозглашенный в начале 2000-х гг., является скорее консервативным сценарием, в основе которого замещение выбывающих по исчерпанию ресурсов эксплуатации ядерных блоков. Атомная отрасль должна в короткие сроки приспособиться под новые условия — снизить стоимость и существенно повысить безопасность проектов. Повышение безопасности увеличивает стоимость проекта при новых требованиях к безопасности в конкретных странах и в целом, согласно рекомендациям МАГАТЭ. Конкретно, для России пересмотрена амбициозная государственная РФ программа «Развитие атомного энергопромышленного комплекса до 2020 г.». Выработка электроэнергии в нем определена на уровне 184,3 млрд кВт*ч, , общая мощность действующих АЭС – 28,1 ГВт, что ниже ранее установленных позиций.

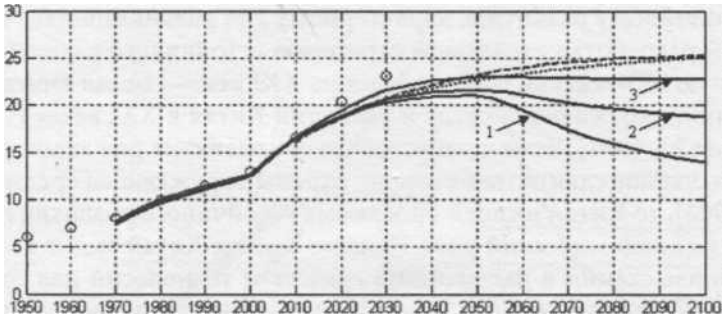
Гидроэнергетика пока практически не имеет оценок стоимости «жизненного цикла», однако очевиден конфликт крупных ГЭС и других отраслей хозяйства, претендующих на ресурсы, становящиеся главным «яблоком раздора» во многих развивающихся регионах, — воду и землю. Рост крупных ГЭС сейчас ограничивают также масштабы проектов, а малые ГЭС демонстрируют сравнительно низкую эффективность;

В ближайшие годы можно ожидать появления расчетов «жизненных циклов» углеродной энергетики, что для ряда ресурсов может означать существенный рост их стоимости. Прежде всего, будет произведена оценка стоимости выбросов углекислого газа для его эмитентов;

Единственный ресурс, для которого прогнозируется снижение цены генерации — возобновляемые источники. Пока оценка доступных ресурсов много превышает технологические возможности (есть ощущение безграничности, низкой стоимости или вовсе бесплатного ресурса — «солнечный свет ничего не стоит»). Сроки масштабирования генерации на возобновляемых источниках энергии (далее - ВИЭ) — ключевой фактор, который будет влиять на трансформацию существующего баланса в следующие 20–30 лет. Однако с массовым внедрением этих источников пока есть большие сложности: интегрировать ВИЭ в существующую энергосистему или строить альтернативные сети? Наступит ли на рубеже 2030-х гг. конкурентоспособность с традиционными источниками энергии? Как долго будут существовать системы государственной поддержки сектора ВИЭ в условиях высоких бюджетных дефицитов?

2 Структура современного мирового топливно-энергетического баланса (ТЭБ)

В работе [1,2] рассчитана динамика суммарной потребности в энергии, которая необходима человечеству для устойчивого развития XXI в. Динамика мирового энергопотребления представлена на рис. 1. Рост численности населения мира определен по трем моделям ООН на период до конца XXI века (N_t).



1 — при росте численности населения по модели с 5,2 млрд. человек
2 — при росте численности населения по модели с 7,4 млрд. человек
3 — при росте численности населения по модели с 9,1 млрд. человек

Рисунок1 - Динамика мирового энергопотребления (млрд. т. у. т.)

Видно, что пик суммарного энергопотребления приходится 2040-2050-е гг. и составляет около 21-23 млрд т.у.т. (тонн условного топлива), затем начинается постепенное снижение и стабилизация на различных уровнях к концу XXI в. Полученные расчетные данные мирового энергопотребления согласуются с имеющимися данными прогноза МАЭ до 2035 года, где определено на конечную дату 20,7 млрд т.у.т. для N_t = 5,2 млрд. человек и 22,2 млрд т.у.т. для N_t = 9,1 млрд. человек.

Пик энергопотребления для авангардных стран Запада и США остался в XX веке и дальнейший постепенный спад, и стабилизация ожидается после 2050 года. Энергопотребление США ожидается на уровне 2,0 млрд т.у.т. (в настоящее время примерно 2,5 млрд т.у.т.). Для других стран максимальное энергопотребление в 4 – 6 раз ниже.

Существенный вклад в мировое энергопотребление будут вносить развивающиеся страны (рис. 2). Динамика энергопотребления наиболее крупных из них, Китая и Индии, прогнозируется следующими уровнями: энергопотребление Китая будет монотонно возрастать в течение всего столетия, асимптотически приближаясь к уровню в 4,25 млрд т.у.т., а пик энергопотребления Индии приходится, примерно, на 2065 и составляет 4,25 млрд т.у.т., после чего наступает спад. При постепенном сокращении энергопотребления в развитых странах происходит стремительный рост потребления в развивающихся и переходных странах, переживающих период индустриализации экономики.

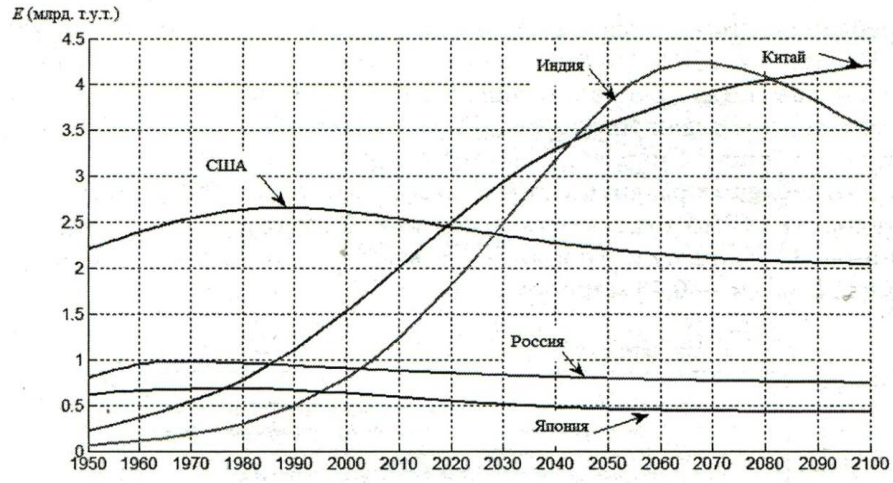


Рисунок 2 - Потребление энергии в основных странах-потребителях

Во всех прогнозных сценариях учитывается долгосрочное прогнозирование климатических изменений и глобального потепления. Сегодня стало аксиомой, что глобальное потепление, происходящее на наших глазах, вызвано главным образом антропогенным ростом концентрации углекислого газа (CO_2) в атмосфере Земли. За последние 150 лет в результате индустриальной деятельности человека концентрация CO_2 в атмосфере возросла с доиндустриального естественного стационарного уровня в 280 ppm (parts per million) до 400 ppm в настоящее время, т. е. на 40%. Это привело к повышению средней глобальной температуры примерно на 0,6°С, а с учетом естественных факторов — на 1 °С по сравнению с доиндустриальным уровнем. Каковы же допустимые пределы глобального потепления?

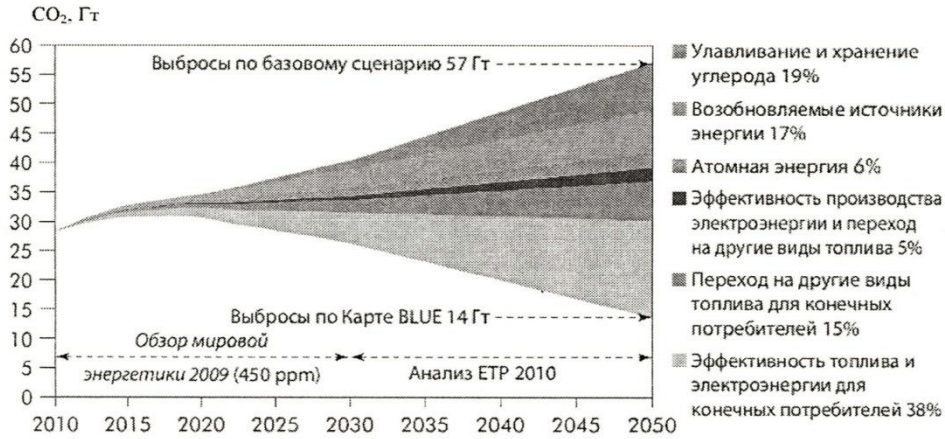
По рекомендации видных ученых-климатологов всего мира еще 1996 г. Европейским советом было принято решение о том, что «глобальная средняя температура доиндустриального уровня не должна быть превышена более чем на 2°С, и поэтому глобальные усилия, направленные на ограничение или сокращение выбросов, должны ориентироваться на концентрацию CO_2 в атмосфере, не превышающую 550 ppm. Лимит потепления, равный 2°С, был подтвержден со стороны ООН в декларации, принятой на Копенгагенской международной конференции по изменению климата в 2009 г., уточнен тем, что концентрация CO_2 в атмосфере не должна превышать 450-550 ppm, что возможно достичь при сокращении среднего ежегодного прироста выбросов углерода, по меньшей мере, до 3 Гт или вдвое по сравнению с уровнем 2000 г. (6,61 Гт).

Поскольку антропогенные выбросы огромных масс углерода в виде CO_2 происходят в виде сжигания органических ископаемых топлив (угля, нефти и природного газа) в целях получения различных видов энергии, то очевидно, что надо рассматривать сценарии развития низкоуглеродной энергетики или энерго-экологического развития с минимальным объемом выбросов CO_2. Международное энергетическое агентство (МЭА) рассмотрело множество сценариев энергетического развития и разработало, в частности, сценарий «Голубая карта» (Blue Map scenario), который ориентирован на снижение эмиссии CO_2 к 2050 г. на 50%, по сравнению с 2005 г., на основе широкого освоения низкоуглероднных технологий.

Среди множества сценариев энергетического развития необходимо выбирать тот, который отвечает новой парадигме энергопотребления, заключающейся в стабилизации душевого энергопотребления для населения развитых стран в XXI в. на более низком, но достаточно комфортном уровне. Показано, что этот уровень душевого энергопотребления для

мира в целом составляет приблизительно 2,5 т.у.т. в год. Переход к новой парадигме энергопотребления начался в 1970-х гг. после энергетического шока, вызванного нефтяным кризисом. Если до нефтяного кризиса потребность в энергии росла пропорционально квадрату численности населения мира ($E \sim N^2$), то при полном переходе к новой энергетической парадигме она будет расти прямо пропорционально численности населения ($E \sim N$), которая, как ожидается, также будет стабилизироваться вокруг определенного стационарного значения. Причем различные ученые оценивают стационарную численность населения Земли по-разному. В расчетах вариант прогнозных значений колеблется от 5,2 млрд человек до 9,1 млрд человек.

Новая парадигма энергопотребления направлена по существу на практическую реализацию энергетического сценария МЭА «Голубая карта». Этот сценарий ориентирован на достижение следующих целей: снижение эмиссии к 2050 г. В два раза по сравнению с 2005 г., т.е. до уровня 14 Гт, и рассматривает самые оптимальные и дешевые способы ее реализации на основе освоения существующих и новых низкоуглеродных технологий. Основные сокращения выбросов CO_2, согласно этому сценарию, представлено на рис. 3.



Основные технологии сокращения выбросов CO_2, согласно сценарию Blue Map

Рисунок 3 - Основные технологии сокращения выбросов $C0_2$ согласно сценарию «Голубая карта» [2]

Как видно из этого рисунка, снижение выбросов $C0_2$ в соответствии со сценарием «Голубая карта» может быть достигнуто за счет применения самых различных технологий:

1) применение системы захвата и хранения углерода (Carbon capture and storage CCS)позволит сократить выбросы на 19%;
2) использование ВИЭ — на 17%;
3) расширение использования атомных электростанций — на 6%;
4) повышение эффективности генерации — на 5%;
5) использование гибридных двигателей и установок в секторе для конечного потребления энергии — на 15%;
6) повышение эффективности конечного потребления топлива и электроэнергии — на 38%.

Отсюда следует, что наиболее значительные перспективы снижения выбросов CO_2 связаны с повышением эффективности конечного энергопотребления. Поэтому повышение энергоэффективности в краткосрочной перспективе должно иметь наивысший приоритет.

Таким образом, как показано в сценарии «Голубая карта», используя комбинации существующих и новых технологий может обеспечить сокращение связанной с энергетикой глобальной эмиссии $C0_2$ вдвое к 2050 г. Это потребует больших инвестиций. Однако выгоды, связанные с благоприятным состоянием окружающей среды, повышением энергетической безопасности и снижением стоимости энергоресурсов, тоже будут существенными. Например, цена на нефть, по данному сценарию, будет составлять в 2050 г. 70 долл. за баррель (в ценах 2008 г.), тогда как по базовому сцена она может достигнуть 120 долл. за баррель (в ценах 2008 г.). По оценке авторов доклада ETP 2010, для достижения 50% сокращения эмиссии $C0_2$ государственное финансирование на стадиях исследований, разработок и демонстраций в области создания низкоуглеродных технологий должно быть выше достигнутого в настоящее время уровня в 2-5 раз. Доклад ETP 2010 показывает, что для удовлетворения растущих мировых энергетических потребностей необходимы весьма значительные инвестиции, согласно оценкам, по базовому сценарию они могут составить на интервале 2010-2050 гг. примерно 270 трлн долл. Большая часть этой суммы (около 90%) приходится на инвестиции со стороны спроса, которые будут осуществляться потребителями на приобретение использующего энергию капитального оборудования.

Для достижения цели сокращения выбросов $C0_2$ на 50% по требуются более значительные расходы. Согласно сценарию «Голубая карта», потребности в инвестициях прогнозируются на уровне 316 трлн долл. В последние годы инвестиции в низкоуглеродные энергетические технологии в среднем составили примерно 165 млрд долл. в год. Осуществление сценария «Голубая карта» потребует увеличения таких инвестиций до 750 млрд долл. в год к 2030 г., и свыше уровня в 1,6 трлн долл. в год — с 2030 г. по 2050 г. С другой стороны, технологическая революция в энергетике несет в себе значительный потенциал высокой отдачи на инвестиции. Например, низкоуглеродная экономика приведет к заметной экономии топлива за счет повышения эффективности и снижения цен. В докладе ETP 2010 подсчитано, что дополнительные инвестиции в размере 46 трлн долл., необходимые по сценарию «Голубая карта», дадут с 2010 г. по 2050 г. суммарную экономию топлива, эквивалентную в денежном выражении 112 трлн долл. Кроме того, энергетическая революция открывает новые значительные возможности для бизнеса, связанные с разработкой и продвижением новых технологий, в том числе в развивающиеся страны.

Вышеуказанные сценарии энергетического развития не являются прогнозами. Поэтому они позволяют оценить климатические последствия того или иного способа наших действий. В самом пессимистичном сценарии к 2100 г. выбросы $C0_2$ возрастут в четыре раза, а по оптимистичным сценариям в дальнейшем нас ожидает умеренный рост эмиссии, за которым последует ее постепенное снижение до долей нынешних объемов выброса.

3 Структура современного мирового ТЭБ

В настоящее время около 87% всей первичной энергии производится из ископаемых топливных ресурсов — угля, нефти и природного газа. В последнее время предпринимаются огромные усилия для замещения углеводородных топлив с помощью атомной энергии, возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и других альтернативных источников энергии — таких как, например, водородная энергетика. Многие эксперты полагают, что уже к середине века (к 2050 г.) доля последних превысит 50% и станет превалирующей по отношению к углеводородным источникам энергии. Нам представляется, что эта оценка весьма преувеличена. На самом деле, мы считаем, что и в XXI в. углеводородные ископаемые топливные ресурсы останутся основой мировой энергетики, и их доля к концу XXI века все еще будет близка к одной трети всего мирового энергобаланса. По оценке МЭА, суммарное потребление первичной энергии в период с 2010 г. по 2030 г. будет возрастать в среднем на 1,6% в год и увеличится с 11,86 млрд т.н.э. (нефтяного эквивалента) до 16,52 млрд т.н.э. Эти

данные легко перевести в т.у.т. путем умножения на коэффициент, равный 1,4 (поскольку 1 т нефти = 1,4 т.у.т.).

Рассмотрим подробнее перспективы применения каждого из основных источников энергии.

Нефть. В первой трети XXI в. нефть останется доминирующим видом топлива, а затем постепенно начнет уступать эту позицию природному газу. Максимум доли нефти в ТЭБ был пройден в период мирового энергетического кризиса прошлого века, на рубеже 1970-1980-х гг. В результате, с тех пор стала неуклонно возрастать доля угля и газа. Согласно различным прогнозным вариантам, падение добычи нефти начнется в 2015-2020 гг. Следовательно, нефтяной уклад начнет уступать место газовому в 2030-х гг.. Однако нефть будет играть значительную роль вплоть до конца XXI в., поскольку заменить жидкое топливо будет крайне трудно с экономической точки зрения. Доля нефти в ТЭБ будет монотонно и медленно снижаться, а к концу XXI в. прогнозируется, что ее доля уменьшится примерно в 4 раза, по сравнению с сегодняшней, и станет равной 9-10%.

Газ. Суммарных выявленных и прогнозных запасов газа хватит более чем на 100 лет при годовой добыче 3-6,5 трлн $м^3$. В настоящее время мировой спрос на природный газ отличается более быстрыми темпами роста, чем на нефть, и составляет 1,8% в год. Потребление газа будет неуклонно расти, и в 2030 г. доля газа (26,2%) достигнет и превысит долю жидкого топлива (26%), а к 2050 г. значение газа станет также велико, как значение нефти в настоящее время. К тому времени газ уже станет доминирующим энергоносителем, достигнув своего пика в 2035-2040 гг. Доля газа в ТЭБ к концу XXI в. прогнозируется на уровне 4-5%.

Уголь. Спрос на уголь в абсолютном выражении вырастет больше, чем на любой другой вид топлива. Средняя потребность в угле по оценкам МЭА, будет возрастать на 2% в год, хотя доля в мировом спросе на энергию несколько уменьшится — с нынешних 29,5% до 27,1% . Уголь продолжит играть важную роль в мировой экономике, а его доля в мировом ТЭБ сохранится на уровне около 22% к концу XXI в. Мировые доказанные запасы угля намного превышают суммарные запасы нефти и газа и способны обеспечивать современный уровень добычи (~5 млрд т) в течение 200 лет. Чрезвычайно важным фактором в пользу угля является то, что он перерабатывается в дизельное топливо и бензин с помощью химического процесса, именуемого синтезом Фишера-Троппа. Пока необходимые для ее использования реакторы все еще довольно дорогостоящи. Прогнозируется, что в период до 2030 г. будут разработаны новые, более совершенные и экономичные технологии получния из угля синтетического газа и жидкого топлива в промышленных масштабах. Это в существенной мере расширит возможности использования угля в энергетике, коммунально-бытовой сфере и на транспорте. В этот же период выйдут на уровень практического применения технологии получения водорода из угля. Начнется также широкое внедрение на угольных энергоблоках различных технологий по улавливанию, связыванию и захоронению $C0_2$, что будет способствовать энергоэкологическому устойчивому развитию.

Таким образом, нефть, газ и уголь до конца XXI в. по-прежнему останутся базовыми элементами мировой энергетики, и их доля в ТЭБ будет составлять больше трети мирового энергобаланса к концу столетия. Кроме того, прогнозируется, что к середине XXI в. в химической промышленности будет использоваться до 10% добываемых углеводородов, а к концу XXI в. — до 30%, тогда как в настоящее время нефть, газ и уголь используются преимуществе как топлива, и лишь 5% их объема поставляется в химическую промышленность. Использования угля в энергетических и химических целях приведет к дополнительной эмиссии углекислого газа в атмосферу, т. к. больше всего его выделяет именно уголь.

Гидроэнергетика. Большинством экспертов прогнозирует, что доля энергии ГЭС в мировом энергобалансе XXI в. останется практически постоянной - около 6%.

Гидроэнергетика будет развиваться за счет строительства крупных ГЭС в Китае, Бразилии и других крупнейших развивающихся странах, а также малых и средних ГЭС в остальном развивающемся мире. Однако все же трудно ожидать в будущем заметного увеличения роли гидроэнергии в мировом энергобалансе.

Атомная энергетика. После периода быстрого роста в 60-70-е гг. и начале 80-х гг. прошлого века атомная энергетика испытывает серьезный кризис, чему причиной всплеск социального противостояния, вызванный такими авариями, как на Чернобыльской АЭС в СССР (1986 г.) и на АЭС Фукусима в Японии (2011 г.), а также остающиеся технические трудности в обеспечении возросших требований безопасности АЭС и в решении проблемы обращения радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива. В среднесрочном периоде до 2030 г. следует ожидать снижения доли атомной энергетики в балансе мировой выработки энергии до уровня в 5%. Но далее, вероятнее всего, доля атомной энергии к середине XXI в. удвоится, если не будут найдены более безопасные альтернативные источники типа термоядерной энергии, и будет расти далее до 20%. Основные страны, которые развивают атомную энергетику – Китай, Индия, страны Юго-Восточной Азии, ряд стран Ближнего Востока. США делает ставку на малые, блочные АЭС.

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Несмотря на значительный прогресс, ВИЭ (энергия ветра, солнечная и геотермальная энергетика, энергия приливов и волн) находятся лишь на пути к масштабному освоению, и в настоящее время их суммарный вклад в мировой энергобаланс измеряется единицами процентов (1,3% в 2010 г.) К ним добавляется биотопливо. Их совместная доля в ТЭБ возрастет до ощутимых 5% ближе к 2025 г., и только с этого момента можно будет говорить о начале практического замещения углеводородных ископаемых топлив с помощью ВИЭ и АЭС, поскольку доля гидроэнергетики, как мы видели выше, останется почти неизменной на протяжении всего XXI в. Ряд европейских стран поставили своей целью довести ВИЭ в энергобалансе до 20% в ближайшем будущем. Кроме Германии, где возможен еще пересмотр общей энергополитики, большой объем ВИЭ в общем балансе ТЭБ наблюдается в странах, где нет большого промышленного потенциала.

Заключение

Один из важнейших факторов в прогнозных моделях устойчивого развития цивилизации это мировой топливно-энергетический баланс (ТЭБ). Глобальный ТЭБ переживает глубинные трансформации. Все более очевидны ресурсные ограничения для углеродной энергетики, которые ведут к росту своей стоимости. Для экономической оценки различных видов генерации тепла и электроэнергии необходим расчет полного «жизненного цикла» конкретного способа (объекта) генерации.

С учетом сценарного долгосрочного прогнозирования глобального потепления показано, что возможна стабилизация климата Земли путем перехода на новую парадигму энергопотребления - стабилизации душевого энергопотребления во всех странах с различным дифференцированным нормативом для различных стран. Для требуемой стабилизации мирового энергопотребления в XXI в. необходимо одновременное выполнение трех следующих условий:

1) сокращение душевого энергопотребления в развитых странах на 40% — с 6,9 т.у.т./год до 4 т.у.т./год;
2) умеренный рост до среднемирового уровня в 2,5 т.у.т./год душевого потребления энергии в развивающихся странах с 1 т.у.т./год в настоящее время;
3) опережающие темпы роста эффективности использования потребляемой энергии.

Поскольку суммарное энергопотребление развивающихся стран будет только расти и со временем значительно превзойдет энергопотребление развитых стран, последние должны активно передавать низкоуглеродные технологии развивающимся странам. Иначе

стабилизация энергопотребления невозможна, т. к. около сотни развивающихся стран будут скорее всего продолжать развитие своей промышленности без оглядки на какие-либо ограничения, поскольку у них нет другого пути, чтобы избежать нищеты и голода.

Изучение структуры энергопотребления по основным видам источников энергии (уголь, нефть, газ, ВИЭ, атомная энергия и гидроэнергетика) показало несостоятельность оптимистических прогнозов относительно замещения углеводородных ресурсов (уголь, нефть и газ) с помощью ВИЭ уже к 2050 г. Органическое ископаемое топливо и в XXI в. будет играть доминирующую роль. К концу столетия его доля в балансе мирового энергопотребления снизится примерно в 2,5 раза - с нынешних 86,5% до уровня в 35%, и останется одним из базовых компонентов мировой энергетики. Поэтому безотлагательное и широкое освоение новых высокоэффективных технологий по ограничению и уменьшению индустриальных выбросов $C0_2$ в атмосферу по-прежнему остается наиболее приоритетной глобальной задачей.

Отвлечение значительной части инвестиционных ресурсов на цели освоения и внедрения низкоуглеродных энергетических технологий будут снижать темпы мирового экономического роста. Оценки показывают, что при сегодняшнем уровне инвестиций в низкоуглеродные технологии снижение темпов экономического роста составляет 0,5%, а к 2030 г., при осуществлении большой программы энергоэкологического развития, оно составит 2,5%. Только при этих условиях можно уменьшить риск глобального потепления, достигается стабилизация климата и обеспечивается устойчивое развитие человечества. Отрицательное влияние мероприятий по уменьшению выбросов $C0_2$ на

темпы экономического роста можно смягчить выбором оптимальной политики экономического регулирования этими выбросами.

Текущее десятилетие до 2020 г. призвано сыграть ключевую роль в запуске широкомасштабной программы освоения низкоуглеродных энергетических технологий, обеспечивающих минимальные выбросы $C0_2$ в атмосферу, а также технологий по улавливанию и захоронению части $C0_2$. Это связано с необходимостью добиться, чтобы эмиссия $C0_2$ достигла максимума в 2020-2030-е гг. и затем начала устойчиво снижаться. Только при этих условиях возможно стабилизировать климат Земли и не допустить повышения средней глобальной температуры атмосферы на 2°C по сравнению с доиндустриальным уровнем.

Список литературы:

[1] Акаев А.А., Садовничий В.А. Математическая модель демографической динамики со стабилизацией численности населения мира вокруг стационарного уровня // ДАН, 2010. Т. 435, № 3. С. 317-321.

[2] Акаев А.А. Стабилизация климата земли в 21 веке путем стабилизации душевого энергопотребления // Труды центра проблемного анализа и государственно-управленческого проектирования. Вып. 25 – М.: Научный эксперт, 2012. – 80 с.

[3] IEA/ World Energy Outlook 2010/ - ANNEXES

[4] Геоэкономический атлас мировой энергетики. Видение будущего до 2030 года. /Под редакцией В.Н.Княгина. – СПб: Фонд «Центр стратегических разработок «Северо-Запад». 2011. – 150 с.

RENEWABLE ENERGY AND ENERGY EFFICIENCY FOR THE RUSSIAN FEDERATION

Ing. A.C.Bijl
Project Officer – Netherlands Enterprise Agency International Programs
The Hague, The Netherlands
E-mail arie.bijl@rvo.nl
Tel. + 31 88 6021 460

Key words: *energy efficiency, renewable energy*

Abstract
In the past years, an intensive cooperation between the Russian Federation and The Netherlands has been implemented. Part of it was through demonstration projects under the Program for Cooperation with Eastern Europe – Environment and part as knowledge transfer projects that were generated by a Memorandum of Understanding between the two countries on energy. The subjects covered are energy efficiency, renewable energy, solar- and wind energy and smart grids and smart metering.

Introduction

In 2006, a Memorandum of Understanding (MoU) was signed between the Russian Federation Ministry of Energy and The Netherlands Ministry of Economic Affairs for cooperation on matters of Energy Efficiency and Renewable Energy. This MoU was renewed in 2011. In the meantime the Russian Federation has formulated its Energy Strategy in 2009.

In 2011 also a cooperation agreement was established between the newly established Russian Energy Agency and The Netherlands NL Agency (now Netherlands Enterprise Agency). As a part of the cooperation, The Netherlands conducted a number of market studies in the different energy sub sectors of the Russian Federation. These market studies were focussing on

- energy efficiency,
- wind and solar energy,
- biomass,
- smart grids and smart meters.

In 2010 I reported to the 12th Conference on the Program Cooperation Eastern Europe for Environment and its activities in the Russian Federation. In this report I will give some of the results of those activities.

1 Energy in the Russian Federation and cooperation with The Netherlands

Energy for industry and households is mainly produced from fossil fuels. Because of the abundant availability of fossil fuel and the low price of it, energy efficiency is getting less attention in Russia than in other industrialised countries. The Netherlands has considerable experience with energy efficiency and renewables and has offered the knowledge to the Russian Federation as part of the bilateral economic cooperation program. The government of the Russian Federation has set an aim for energy consumption (fossil fuels) reduction of 56% by 2030 in its Energy Strategy of 2009. The Netherlands government has offered assistance on different levels:

- specific knowledge on energy efficiency in the heavy industry;
- market studies for different market segments to stimulate commercial cooperation.

1.1 Energy efficiency in heavy industry

For demonstrating an example of an energy efficiency analysis and implementation plan was carried out at Proletarsky Zavod in St. Peterburg. Also an industrial plant in Ekaterinburg was analysed.

For both companies an analysis of the present energy consumption was made as well as an energy saving plan. The effect of the plans would lead to at least 30% energy saving of the factories .

1.2 Public buildings and housing

The majority of the houses of citizens are heated with communal warm water grids. The distribution of the hot water is usually in the winter period. Effective use metering is not done so there is little incentive for consumers to adapt their behaviour as far as energy consumption is concerned. For that it is necessary to change the system of billing the costs to users and install meters.

As is shown from one of the PSO Environment projects that is implemented, huge improvement can be achieved by improving the building (insulation) and smart use of electricity.

1.3 Threats for achieving the energy saving aims.

There are two major threats that hinder progress on energy efficiency and the use of renewable energy in Russia: 1) the complex legislative environment and 2) the low prices of fossil fuel. Besides the low availability of related technology makes the progress of projects slow. Connected to the issue of low fuel prices, is the point that usually projects on energy efficiency have a unfavourable payback period. Changing legislation is taken up by the government but this is a slow process. The issue of low fossil fuel prices is influenced by the WTO membership of Russia: in 10 years the domestic prices will have to match the world market prices.

2 Results of the market studies.

2.1 Energy efficiency

Three energy intensive industries in Russia have a considerable energy saving potential: the metallurgy industry, the paper industry and the cement industry. On average they have an energy saving potential of 53%.

The Russian market is in need of general consultancy, specific engineering of energy saving projects and of course equipment and technology for energy saving and monitoring.

2.2 Bio energy

Bio-energy is a collection of different “markets” and solutions. Because forests are abundant in Russia, wood products are the most logical source of bio energy. Different technologies are available for utilising the different products. These products also offer a major opportunity for export. That is why other sources of bio energy should be interesting as well. These sources are usually waste materials like animal manure and household waste. Solutions that are available are incineration for household waste and co-digestion for animal manure. Both solutions have high potentials in Russia.

2.3 Wind- and solar energy

Climatological conditions make some parts of Russia interesting for application of wind- and/or solar energy. The present use of it in the total electricity production is minimal: less than 0.5 % is generated from wind sources and a minimal fraction from solar sources.

Russia needs all technology for these types of electricity generation.

2.4 Smart grids an smart metering

Energy efficiency is not only a matter of changing the consumers behaviour. Also the infrastructure of especially electricity transport can be improved. This is especially necessary because in general more small producers (sometimes non continuous) of electricity are going to be connected

to the public grid and the pattern of electricity consumption is changing because of new users (electric cars). This demands a new type of managing the transport networks and production sources.

Russia is at the start of introducing smart metering and smart grids.

3 PSO Environment program in Russia

In 2009 the PSI Environment program was open for project in the Russian Federation. In 2009 three projects have been started:

- Energy efficiency in public buildings; a school was renovated in Moksino, Tver region;
- A project to build a wastewater treatment solution in Leningradskaya oblast was started;
- A project was implemented in Samara region to utilise methane gas of a landfill and produce electricity from it.

In 2010 one project was started in Sverdlovsk region to utilise wood waste for producing gas via a pyrolysis process and utilise the gas to for producing electricity and heat. So altogether 4 projects were started in Russia under the PSI Environment program. The projects in Samara and Tver regions have been finalised; the project in Sverdlovsk is in the final stage of implementation. The project in Leningradskaya region has suffered tremendous delays and the implementation has just started.

3.1 Result of PSO Environment projects in Russia.

Two of the 4 projects have been finalised.

3.1.1 Energy efficiency in publicly financed buildings in the Russian Federation.

The first phase of the project was choosing the object for implementing measures. Within the Konakovo district of Tver region, 5 publicly financed buildings were evaluated for the existing energy efficiency. From them, the school/ kindergarten of Mokshino village was selected for implementing measures.

The school and kindergarten in Mokshino were primarily subject of a zero measurement. However, when the measuring of heat is concerned, it is often difficult in Russia to find historic data. For a short period the heat consumption from the district heat company was measured. From that measurement an estimate of the annual heat consumption was calculated.

The school was renovated for:

- Shell insulation,
- Heating system,
- Windows and doors (incl. glass)
- Ventilation,
- Electricity consumers like light and hot water.

The energy saving effects of the investments were calculated at:

- 51 % for heating
- 96 % for hot water
- 22 % for electricity.

The overall energy saving was calculated at 69 %. The payback period of the investment (with the energy prices of 2011) was calculated at 15 years.

3.1.2 Waste management Samara.

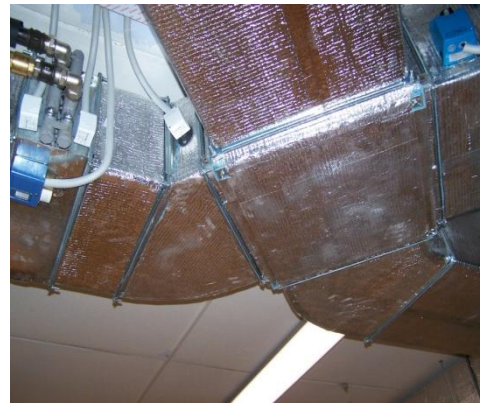
At Preobrazhenka landfill, south of Samara, on a part of the closed waste deposit was equipped with a special methane gas collection system. It consists of a Multriwell vertical drain system, a horizontal collection piping system and an special gastight covering (Trisoplast). The collected gas is burned in a gas engine that is connected to a generator that produces electricity (Combined Heat and Power (CHP) unit).

The project only concerns a part of the landfill: of the 47 ha that the is the surface of the landfill, only 5 ha is suitable for gas extraction. Methane gas production usually is at best from 3-15 years

after the closing of the section. On the Preobrazhenka landfill a section of 5 ha is suitable for gas collection. Of these 5 ha, 0.4 ha was used for this pilot project.

Picture 1 - New insulated shell of the building

Picture 2 - Insulation material attached to the outside of the walls



Picture 3 - A ventilation system was installed with heat exchanging equipment

The project team estimated the gas production to be expected at the start of the project. Under Netherlands circumstances a surface of 0.4 ha would produce approx. 80 m3 of methane gas mixture per hour. Because the gas production appeared to be higher at Russian landfills, the estimate was set at 120 m3/ hour. After installation, the gas mixture was measured at 245 m3/ hour. Although the estimate was set at 150 % of the Netherlands experiences, it is much higher. The reason for this is the fact that in Russia the organic waste is not separated from the other waste and from the organic waste the methane gas is produced. The gas mixture has the following specifications:

- 58% CH4
- 40% CO2
- 0.2%

The installed capacity of the engine/generator is 110kWh. This can utilise only part of the potential gas production (60%). The potential revenue of the pilot project from electricity production is approx. RR 8.1 million annually. Payback time for this small pilot installation is approx. 2.2 years.

When installing the equipment at a larger scale, a much smaller payback time can be expected. For the Preobrazhenka landfill, with 5 ha potential "gasfield", enough gas can be collected for a CHP unit of 1.5 to 2 mWh. This appears to be an interesting investment, which will be even more interesting if the heat from the CHP unit can be utilised.

Actual circumstances of the project: as the electricity cannot be delivered to the public grid because of organisational reason, the electricity actually produced from this pilot project is only used for the electricity consumption of the landfill administration buildings and so on. This is only approx. 40% of the actual CHP capacity.

Picture 4 -The transport pipe of the landfill gas

Picture 5 - Emergency flare an the container with the CHP un

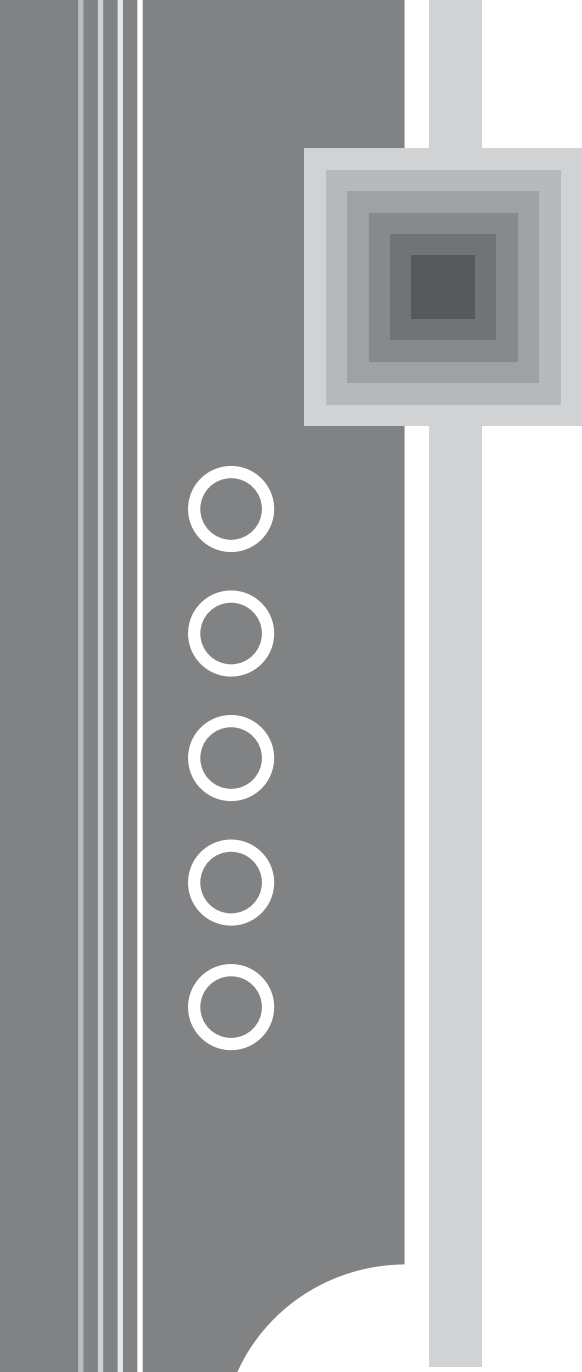
Conclusion

The government of the Russian Federation has set an ambitious goal for improving the energy efficiency of its economy and society in 2009. The potential for achieving this goal is realistic. Besides the potential for using the energy more efficiently in industry and residential areas, the possibilities for generating fuels from renewable sources are large. For achieving the goal different actions have to be taken: the legislative environment should be adapted, behaviour of users has to change and investments have to be made. On some aspects the legislative environment for achieving this goal is already changed but the process is slow.

The Netherlands has much knowledge on the different aspects of energy efficiency and renewable energy. This is demonstrated in different projects that were initiated in bilateral programs between Russia and The Netherlands. A large number of opportunities for commercial cooperation between the two countries are available.

Literature

[1] Market scan on smart grids and smart meters in Russia. DNV KEMA energy and sustainability; 2013
[2] Market study on bioenergy in Russia. Larive international; 2013.
[3] Market study on Energy Efficiency in the Russian industry. Larive International; 2013
[4] Quick Scan of Wind, Solar Energy and Combined Heat and Power in the Russian Federation. Lighthouse Russia B.V.; 2013.
[5] Personal communication with Ing. Kees Mokveld; program manager for Russia of the Program Energy International at Netherlands Enterprise Agency.
[6] Final presentations of PSOM9/ RF/90 by Lighthouse Russia and SUN Energy
[7] Final presentation on PSOM9/RF/92 by Ameco Milieuadviesgroep B.V.
[8] Personal observations and experiences with PSO Environment projects.



Theory of Optimal Control and its Applications
Теория оптимального управления и её приложения

APPROACHES FOR NUMERICAL SIMULATION OF HIGH FREQUENCY TUBE WELDING PROCESS

E. Baake, A. Nikanorov

Leibniz University of Hannover, Institute of Electrotechnology
30167, Hannover, Wilhelm-Busch-Str. 4, Germany
baake@etp.uni-hannover.de, nikanorov@etp.uni-hannover.de
phone: +49 (0) 511-762-3248, +49 (0) 511-762-3928, fax: +49 (0) 511-762-3275

Keywords: *welding processes, induction tube, three-dimensional transient numerical models, coupled electromagnetic and thermal analyses*

Abstract

Welding processes and installations used nowadays are mainly developed on practical experience and analytical calculations because suitable numerical simulation approaches are developed not enough. Nevertheless, high frequency induction tube welding is a very complex three-dimensional dynamic process, where the electromagnetic and thermal characteristics are distributed not only in space but in time as well. Therefore a more profound detailed investigation of the induction tube welding process can be only done by numerical modelling. Full and local three-dimensional transient numerical models of induction tube welding process with continuous movement of the welded tube have been developed and tested. Coupled electromagnetic and thermal analyses are carried out at each time step of simulation for correction of temperature dependent electro- and thermo-physical material properties. Thermal analysis includes simulation of thermal losses by convection and radiation taking into account view angles. Voltage or current of the induction coil can be individually input into electromagnetic analysis at each time step. This approach allows simulating "quasi" steady-state as well as transient operation modes of the welding process. The simulation models have been realized using Finite Element Method e.g. on the basis of commercial program package ANSYS.

Introduction

For the production of tubes made of steel (ferritic or austenitic) or steel coated with zinc or aluminium as well as made of aluminium, brass, copper or zinc various conduction or induction welding technologies are used in industry. The longitudinal seam welding of the tube can be done by the use of high-frequency (HF) resistance heating (conductive heating) or inductive heating.

The HF induction welding process is executed with the application of a high frequency parallel or series resonant circuit converter for the energy supply. The welding is effected by a ring shaped or profiled inductor, which includes the tube and induces a high frequency current into it. The current passing the strip edges heats the material with an increasing temperature towards the welding spot. The welding itself is now here effected without any additional material by pure pressure from upsetting rolls. The welding beads are trimmed in hot condition behind the upsetting rolls on the outside and on the inside if necessary.

Contrary to other methods of induction heating where the heating is affected directly next to the inductor, the heated area is mainly outside the inductor loop area at longitudinal seam welding. The currents induced under the inductor are passing the back of the tube, then the edges of the strip and meet at the welding spot. There then the required welding temperature of about e.g. 1400°C is achieved.

High frequency applications for the tube production

For the production of tubes made of steel or other metals, conduction or induction welding and various induction heating technologies used in industry today are shown in Figure 1.

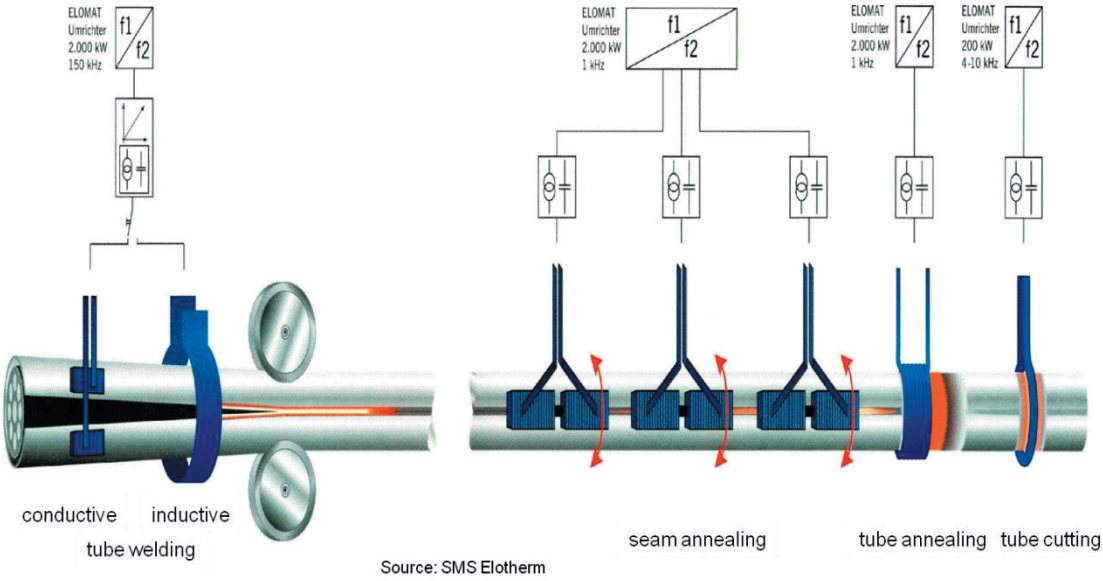


Figure 1 - HF applications and induction applications for the production of tubes
(Courtesy: SMS ELOTHERM)

The longitudinal seam welding of the tube can be done by the use of high-frequency (HF) resistance heating (conductive heating) or inductive heating as explained more in detail in following chapter. Due to high cooling rates during the welding process, a different metallurgical structure and different mechanical properties compared to the base material occurs in the seam and in the heat affected zone. An induction seam annealing installation can be integrated in the welding line to achieve a homogeneous grain structure on the whole circumference. If the annealing of the complete tube is necessary from metallurgical point of view an induction tube heating system can be used. A cutting installation is arranged at the end of the tube production line in order to cut the tubes into conventional lengths. This unit can be operated mechanically, e.g. as a travelling saw, or in certain cases even by induction. In this latter case, the tube is heated by a short one turn inductor and then separated by a tension pulse in axial direction.

The high frequency tube welding involves the application of a high-frequency alternating current in the range 100 - 500 kHz, with the tube forming and energy input operations being performed by separate units. This welding method simultaneously utilizes pressure and heat in order to join the strip edges of the open-seam tube together without the addition of a filler metal. Squeeze and pressure rolls in double- or multi-roll weld stands bring the edges of the open-seam tube gradually together and apply the pressure necessary for welding (see Figures 2 and 3). High-frequency alternating current offers a number of benefits as energy source for generating the heat required for the welding process. Due to the skin and proximity effect the current thus flows along the strip edges of the open-seam tube to the point at which the strip edges abut (welding point), and the ensuing concentration. Below the Curie point (768 °C), the depth of current penetration only amounts to a few hundredths of

a millimetre. Once the steel is heated above this temperature, it becomes non-magnetic and the current penetration depth rises to several tenths of a millimetre at frequencies in the region of 450 kHz.

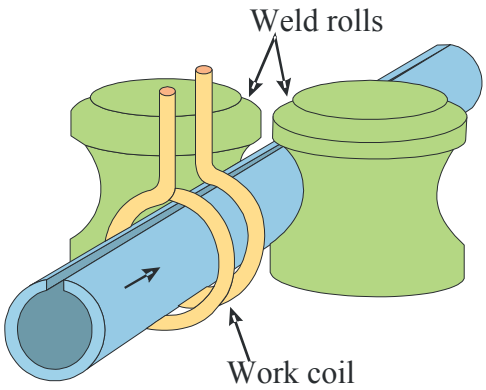


Figure 2 - Schematic of the longitudinal high frequency seam welding of tubes using inductive welding

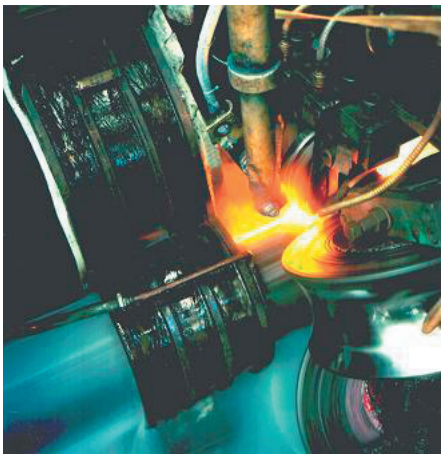


Figure 3 - Example of the high frequency induction welding of tubes

The welding current can be introduced into the open-seam tube both by conductive means using sliding contacts and by inductive means using single or multi-wind coils. Consequently, a distinction is made in the nomenclature between high-frequency induction (HFI) welding and high-frequency conduction welding.

Welding processes and installations used nowadays are mainly developed on practical experience and analytical calculations because suitable numerical simulation approaches are developed not enough.

High frequency induction tube welding is a very complex multi-physical three-dimensional process. Additionally, the induced current and temperature are distributed not only in space but in time as well. The electromagnetic-thermal process parameters are depending on the geometry of the inductor, impeder and in particular on the tube (e.g. wall thickness, incoming angle etc.), the operation parameter, like total power, inductor current, frequency, welding feed etc. and finally also on the material data like electrical conductivity and other, which are temperature dependent or in case of magnetic permeability temperature and magnetic field strength dependent.

All of these influence factors and physical correlations have to be taken into account for the design and optimization of the HF induction tube welding process. Therefore a more profound detailed investigation of the physical relations of the process can be only done by numerical modelling. In order to simulate the three-dimensional (3D) “quasi” steady state and if necessary transient mode of an induction tube welding system, special numerical models are required. The models must simulate the heating process distributed in space and in time. That is why the models of induction tube welding must be based on special algorithm providing a time loop additionally to coupling between electromagnetic and thermal analysis.

Numerical models of induction tube welding process

The developed numerical models of induction tube welding process with continuous movement of the tube are based on one specially created algorithm shown in Figure 4.

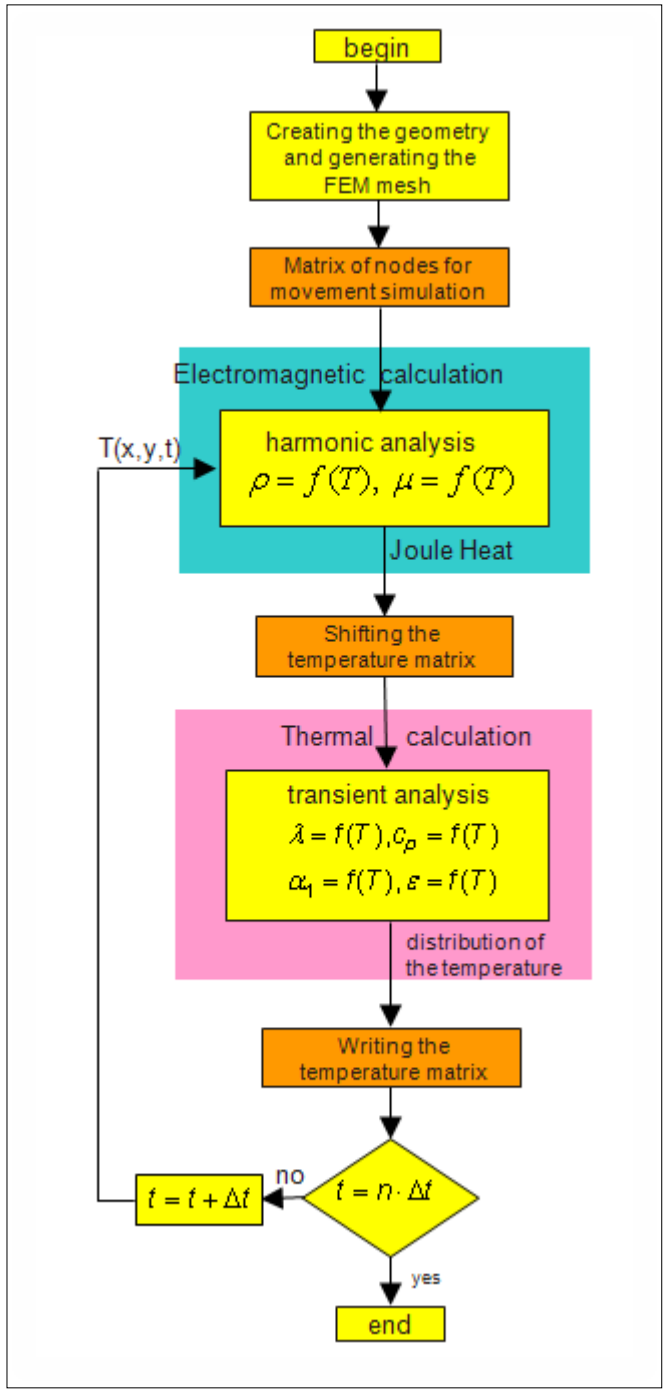


Figure 4 - Algorithm of transient coupled electromagnetic-thermal analysis with the tube movement

For numerical simulation the continuously running physical heating process is replaced by big enough number of time steps. Electromagnetic and thermal analyses are carried out at each time step of simulation. The Joule heat distribution in the tube, calculated in the electromagnetic analysis, is used as an excitation for the thermal one at the running time step. Temperature dependent electro-physical material properties are corrected for electromagnetic analysis at the running time step according to temperature distribution in the tube after the previous time step. Thermal analysis includes simulation of thermal losses by convection and radiation from all open surfaces of the calculated system. Heat flux by radiation is calculated taking into account view angles. Temperature dependent properties of steel used for simulation are shown in Figure 5.

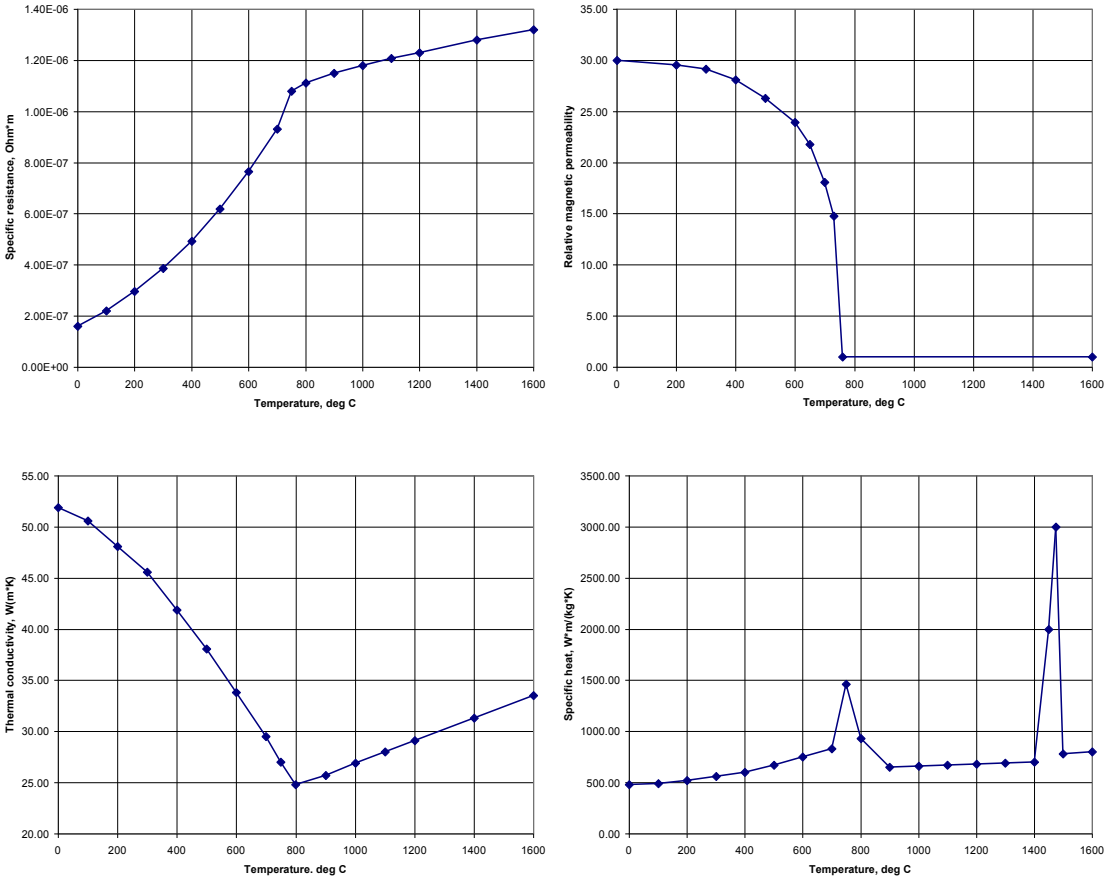


Figure 5 - Electro-physical and thermo-physical properties of steel used in the models

Input of voltage or current of the induction coil is individually input in electromagnetic analysis at each time step. This approach allows simulating various kinds of transient modes. The “quasi” steady-state operation mode can be reached as well via transient one after long enough time.

One robust way to implement movement of the workpiece is based on shifting the temperature field before each time step of thermal analysis [1]. It is very effective for simulation of induction heating systems with continuously moved endless workpiece of constant cross-section. However,

uniform numerical mesh in the workpiece in the direction of motion is required for this approach. Speed of the workpiece is taken into account via values of simulation time steps. This approach was modified for the tube welding process to run with non-uniform mesh in the tube which is very important for tube welding simulation. Arbitrary simulation time steps can be applied in this case as well.

Two 3D transient numerical models of the induction tube welding process with continuous movement of the tube have been developed according to the created algorithm. The models are realized using Finite Element Method on the basis of commercial program package ANSYS.

Full model of the welding system includes the welded tube with V-angle, the induction coil, impeder (see Figure 6) and the surrounded air which is necessary for spreading of magnetic field. FEM element mesh in the tube has to be very fine because of small electromagnetic penetration depth at high frequency. Only a proper chosen non-homogeneous mesh allows reaching an acceptable compromise between the total amount of elements and the computer runtime needed for simulation.

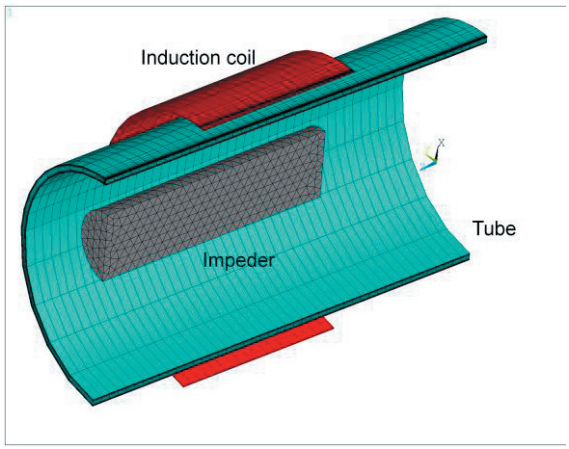


Figure 6 - Geometry and FEM mesh in the tube in the full model

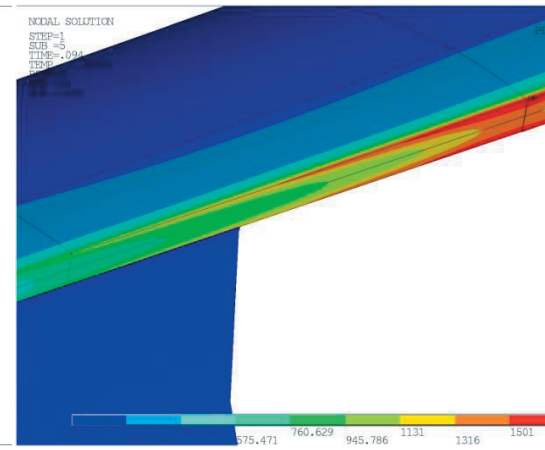


Figure 7 - "Quasi" steady state temperature field in the tube received by the full model

In the presented approach the tube edges are of fixed shape even above the melting temperature. That is why the numerical prediction of temperature can exceed the melting point. One example of temperature distribution in the welded tube edge is shown in Figure 7. Temperature distribution in the second welded edge is symmetric to the shown one. Before the welding point temperature grows because of eddy currents induced in the pipe. After the welding point no currents are running, so temperature drops down as a result of thermal equalization.

The full model is absolutely necessary for parametrical study and optimization of the induction system geometry and electrical parameters of the induction coil and the other process improvements.

The second model, which is called local, includes the welded tube and the air surrounding only (see Figure 8). In spite of the full model, the current is implemented directly into the welded edges of the tube like it is made in HF conduction welding process.

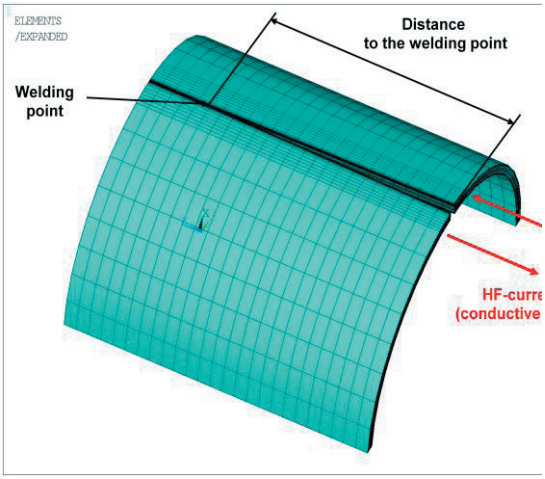


Figure 8 - Geometry and FEM mesh in the tube in the local model

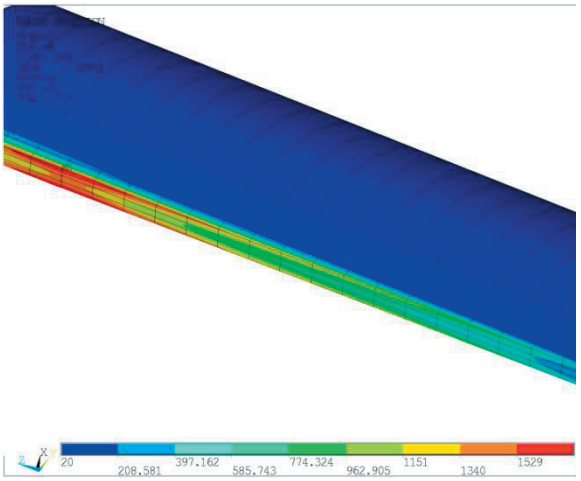


Figure 9 - "Quasi" steady state temperature field in the tube received by the local model

The local model approach allows increasing the element amount in the tube without rising of the runtime. It is necessary for deeper analysis of electromagnetic and thermal effects directly in the region of welding point. One example of temperature distribution in the welded tube edge received by the local model is shown in Figure 9.

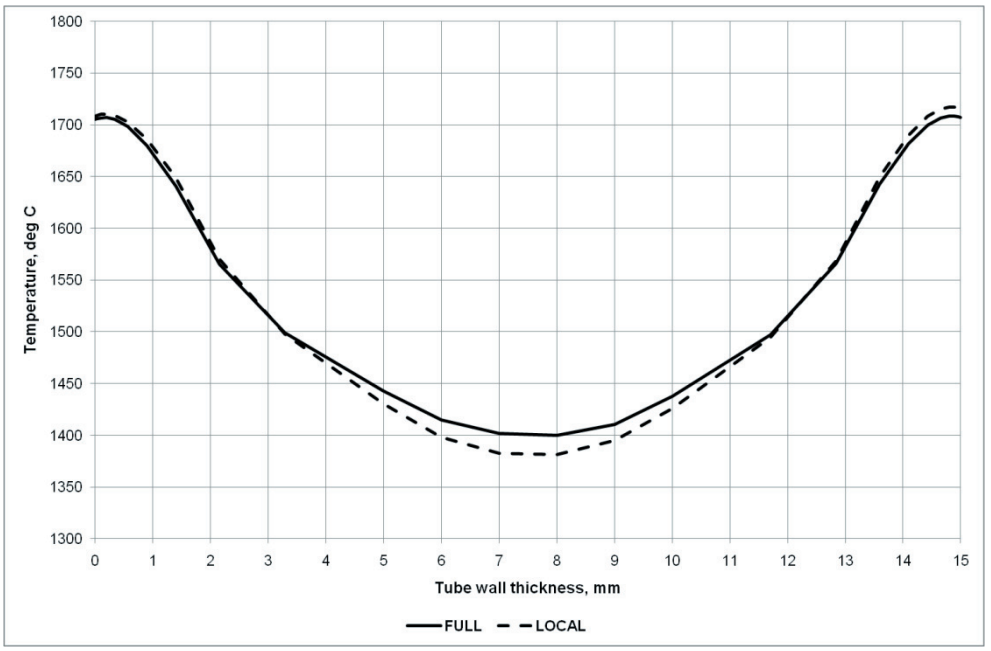


Figure 10 - Temperature profiles over the tube wall thickness in the welding point received by full and local models

Temperature distribution is very similar to the results from the full model if the distance from the current implementation to the welding point is chosen in a proper way. In front of the welding point temperature grows because of eddy currents induced in the pipe. Like in the previous case, no currents are running after the welding point, so temperature drops down as a result of thermal equalization

The local model is very effective for investigation of electromagnetic, thermal and other effects around the welding point.

To compare the both developed full and local models, temperature profiles over the tube wall thickness in the welding point are shown in Figure 10.

The temperature level at the welding point depends on power which is defined by the given induction coil current or voltage. This current or voltage should be tuned to reach the reference temperature given for the certain point of the tube.

Difference between the temperature curves does not exceed 20 K in the middle part of the tube edge. Because of the welded edges in the V-angle are not parallel to each other, the temperature profile is of small asymmetry.

Conclusions

High frequency tube welding is a very complex process with various physical phenomena. Detailed investigation and optimization of the induction tube welding process can be only done by numerical modelling. Full and local three-dimensional transient numerical models of induction tube welding process with continuous movement of the welded tube have been developed. They are based on coupled electromagnetic and thermal analyses with temperature dependent electro- and thermophysical material properties. The full model is absolutely necessary for parametrical study and optimization of the induction system geometry and electrical parameters of the induction coil. The local model is very effective for investigation of electromagnetic, thermal and other effects around the welding point. Temperature profiles over the tube wall thickness in the welding point received by full and local models are very similar if the distance from the current implementation to the welding point is chosen in a proper way.

References

[1] [1] Galunin, S.; Zlobina, M.; Blinov, K.; Nikanorov, A.; Zedler, T,; Nacke, B.: Numerical analysis of coupled physics for induction heating of movable workpieces. Proceedings of International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing (MEP2008), Hannover, Germany, October 27 – 29, 2008, pp.59-64

HEAT AND MASS TRANSFER IN INDUCTIVE SKULL MELTING OF GLASSES AND OXIDES

B. Nacke[1], B. Niemann[2], D. Schlesselmann[1]

[1]Leibniz University of Hannover, Institute of Electrotechnology
30167, Hannover, Wilhelm-Busch-Str. 4, Germany

nacke@etp.uni-hannover.de, schlesselmann@etp.uni-hannover.de
phone: +49 (0) 511-762-5533, +49 (0) 511-762-2290, fax: +49 (0) 511-762-3275

[2]Auer Lighting
37581, Bad Gandersheim, Hildesheimer Str. 35, Germany
benjamin.niemann@auer-lighting.com
phone: +49 (0) 5382-701-310

Key words: *inductive skull melting, oxide melting, glass melting, 3D simulation, electromagnetic simulation, melt flow simulation*

Abstract

The inductive skull melting technology has many advantages for melting of innovative materials in the field of glasses and oxides. It offers high processing temperatures and the compliance of necessary purities at the same time. Applicable materials are in particular optical glasses, which are applied for lenses, fibers or filters, because the skull melting technology allows high process temperatures and high purities of the final product. In the production of glass materials strong requirements have to be fulfilled regarding the optical characteristics, which are mainly defined and influenced by the melting of the raw material and the following refining process.

An unsolved problem in the melting process of glasses and oxides using the inductive skull melting technology was in the past the unknown heat and mass transfer in the melt because temperature and melt flow measurements in the melt are practically impossible due to the high temperatures. On the other hand the temperature and velocity distribution in the melt is very important regarding the safety of the melting process, the process control for producing the required properties of the material or the further development of skull melting installations.

The paper decribes a new numerical model which is able to simulate the instationary 3D melt flow of glasses and oxides. The numerical model takes into account electromagnetic, convection and Marangoni forces. By this a comprehensive view of the hidden processes in the practical experiments could be obtained.

By means of the new numerical model different glass and oxide melting processes were simulated and the results were compared with experimental results. The comparisons show first of all a very good agreement between experimental and numerical results at the melt surfaces. Additionally the numerical results allow to look much deeper inside the melt and show interesting new effects of the heat and mass transfer below the melt surface which were unknown before.

Introduction

At the Institute of Electrotechnology (ETP) an inductive skull melting system is available to conduct experiments with all sorts of low conductive materials. In particular, the installation is used for the production of optical glasses, the melting of oxides, chemical high temperature reactions and directional solidification or drawing of crystals. The process temperatures, especially in case of oxides, often exceed 2000 °C. However, it is possible to handle process temperatures of 3000 °C with the inductive skull melting technology by using an inductor crucible when melting glasses or a cold crucible when melting oxides. An inductor crucible can be regarded as a single turn coil combined with a crucible into a single unit, whereas a separate inductor is needed when a cold crucible is used.

In both cases, massive water cooling of all components is required. Between the hot melt inside of the crucible and the water cooled crucible walls, a layer of solid material is formed, which is commonly referred to as skull layer. The skull layer provides protection against contamination of the melt and damage to the crucible in general. Figure 1 (b) shows a copper inductor crucible that is used at ETP. Besides the crucible, there is a water cooled bottom. The bottom has a very high thermal conductivity (150 W/m²K) combined with a very low electrical conductivity. Another important component is the cooling finger placed in the gap between the supply and return conductor of the crucible. As the electromagnetic field intensity is very high at this point, there is an increased risk of electrical flashovers. The cooling finger decreases the temperature of the melt and therefore the risk of flashovers, because the electrical conductivity of glass decreases together with temperature. The cold crucible in Figure 1 (c) consists of several water cooled copper sections. Using a separate single turn inductor coil and a water cooled copper bottom, the electrical efficiency of this system is lower compared to the inductor crucible.

Figure 1 – Skull melting installation at ETP (a) melting chamber; (b) inductor crucible with cooling finger, aluminum nitride bottom and ceramic ring for melting glasses; (c) cold crucible with inductor for melting oxides

All components of an experimental setup are installed in a chamber, which can be operated in an inert or vacuum atmosphere if required (Figure 1 (a)). The power supply feeding the system is a (MOSFET) transistor generator using a parallel resonant circuit to create a high frequency current. With this system, frequencies between 100-350 kHz and an output power up to 440 kW can be generated. According to the requirements of the process, the generator can be operated voltage or power controlled. A data acquisition system is used to record all relevant process data such as power, voltage and frequency of the generator, temperatures and flow rates of all strands of the cooling water and derived data like the power losses in the crucible, bottom or inductor [1].

The inductive skull melting process is a very complex process, which is hard to predict due to several characteristics: First of all, all material parameters of the melt are strongly nonlinear with respect to changes of the process temperature. Secondly, there are three mechanisms that drive the melt flow. These are the Marangoni convection, the thermal buoyancy force and the Lorentz force. Also, the distribution of heat sources within the melt is very inhomogeneous, first and foremost, due to the strongly pronounced skin effect at the applied frequency range. The last, but not less important point is, that the measurement of process data beneath the melt surface is virtually impossible because of the high process temperatures. However, there are several reasons that make a better understanding of the processes very important.

In some cases an overheating of the melt can result in the emission of toxic gases. Also the skull layer can break and damage the crucible. Due to chemical reactions the melt level can increase significantly within seconds and exceed the height of the crucible so melt leaks out and can damage the installation. Also there are high requirements with regards to quality especially in the production of optical glasses. First of all, a good mixing of the melt and a homogeneous temperature have to achieved, to be able to meet these requirements. To avoid critical process states and guarantee an

optimal melting process, numerical simulation can be used. The aim of this paper is to improve the understanding of the melting process by using a 3D model that calculates the instationary heat and melt flow.

1 Numerical model

When modelling inductive skull melting processes, there are three physical quantities of major importance: temperature distribution, melt flow distribution and electromagnetic field distribution. The first two physical quantities can be used to verify a numerical model and determine the characteristics of a real melting process. The electromagnetic field distribution induces heat sources within the melt and therefore is responsible for the heating. Hence, it is a crucial parameter for the efficiency of the process. The optimization of all three quantities is in focus when an inductive skull melting process is designed. All quantities have an influence on each other, which can be seen in Figure 2. In general, a numerical model has to take into account these quantities as well as their mutual influence. However, if this complex process was calculated using a universal mathematical formulation considering all phenomena, the computational effort would be inacceptable. This is why in this paper two different simulation tools were used to compute the skull melting process. The first tool is the commercial software package ANSYS, which calculates the electromagnetic field distribution. The second tool is the commercial software CFX, which calculates the thermal as well as the melt flow distribution. The temperature dependent material parameters density $\boldsymbol{\rho(T)}$ and dynamic viscosity $\boldsymbol{\eta(T)}$ have an influence on the melt flow, whereas the term $\vec{\boldsymbol{v}} * \boldsymbol{grad\vartheta}$ describes the change of temperature caused by the melt flow respectively. All other coupling mechanisms are implemented in the model by using self-programmed subroutines connecting the tools [2]. As the influence of the melt flow on the electromagnetic field distribution $\boldsymbol{\kappa}(\vec{\boldsymbol{v}} \times \vec{\boldsymbol{B}})$ can be neglected because of a very small magnetic Reynolds number ($R_m = 10^{-8}$ in the investigated melting processes). Only three additional coupling mechanisms have to be implemented. These are the Lorentz force $\vec{\boldsymbol{S}} \times \vec{\boldsymbol{B}}$, which has an influence on the melt flow, the heat sources $\boldsymbol{p = \kappa^{-1} * \vec{S}^2}$ induced in the melt and the electrical conductivity $\boldsymbol{\kappa(T)}$ as a function of temperature.

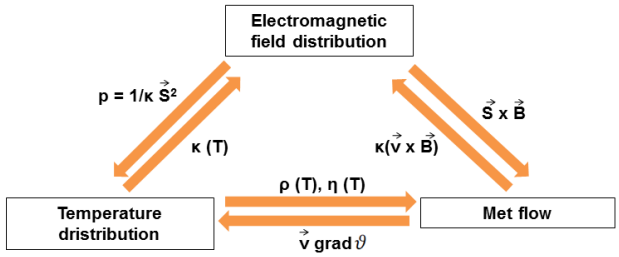


Figure 2 – Overview of mutual dependencies of relevant process parameters

Regarding the melt flow, three stirring mechanisms are taken into account in the numerical model:

Marangoni convection:

(1) $$\overrightarrow{\boldsymbol{f_m}} = -\frac{\boldsymbol{d\gamma}}{\boldsymbol{d\vartheta}} \boldsymbol{grad\vartheta}$$

Marangoni convection is a result of an inhomogeneous temperature distribution of a melt surface. The gradient of the temperature dependent surface tension causes a leap of shear stress resulting in a melt flow from a warmer to a colder area. Taking into account the material constant $\boldsymbol{-d\gamma/d\vartheta}$, a force density at the melt surface can be defined [3].

Thermal buoyancy:

(2) $$\overrightarrow{\boldsymbol{f_g}} = \vec{\boldsymbol{g}} \boldsymbol{\rho_0 \alpha (\vartheta - \vartheta_0)}$$

The heating of the melt is attended by thermal expansion and therefore a change of density. The inhomogeneous temperature distribution within the melt results in a buoyancy force between regions with different temperature.

Lorentz force:

(3) $\overrightarrow{f_t} = \vec{S} \times \vec{B}$

The melt is permeated by the electromagnetic field as well as the induced current. The cross product of the current density $\vec{S}$ and the magnetic flux density $\vec{B}$ is defined as the Lorentz force.

2 Numerical and experimental investigation of three different glass melts

Depending on the material parameters of the investigated material, one or more mechanisms define the melt flow. To demonstrate the different behavior of melt in an inductive skull melting process, three different glasses have been representatively selected and investigated in an experiment as well as in a numerical simulation.

Table 1: Overview of parameters of investigated glasses

Parameter / Glass	Glass 1	Glass 2	Glass 3
Process temperature [°C]	1500 - 1600	1200 - 1250	1100 – 1150
El. conductivity [1/Ωm]	115 - 150	45 - 60	33 – 40
Density [kg/m³]	2750 (at 1300 °C)	3830 (at 1200 °C)	6300 (at 1000 °C)
Th. exp. coefficient [1/K]	9,0*10-5	4,5*10-5	2,57*10-5
Dynamic viscosity [Ns/m²]	0,475 (at 1550 °C)	0,075 (at 1250 °C)	0,0012 (at 1120 °C)

The chosen types represent the whole spectrum of glasses that can be used in an inductive skull melting process (Table 1). The most crucial material parameters for the coupling of the electromagnetic field and the melt are the electrical conductivity and the dynamic viscosity. If the electrical conductivity is high enough, the electromagnetic field of the inductor induces heat sources within the melt. The dynamic viscosity on the other hand has an influence on the mixing and homogenization of the melt, which is driven by the three stirring mechanisms. These two parameters are high for Glass 1, have a medium value for Glass 2 and are low for Glass 3.

With regards to geometry, two different models are used for the calculation of the glasses. In general both models represent the inductor crucible that was used in the experiments. The first model considers half the crucible, the cooling finger and a skull layer of 1 mm. Therefore only half the melt is calculated in this model, it is used for Glass 1. The second model used for Glass 2 and 3 calculates the whole crucible and melt. A cooling finger is not taken into account in this case, because it was not used in the experiments. Initially, it is assumed that the glass has a homogeneous temperature 50-100 K lower than the real process temperature. This means there is a short phase in the simulation, in which the initial situation transitions into a globally stationary process regarding temperature and melt flow distribution. The simulation results allow a verification of the model by comparing the deployed power, the inductor voltage, the surface temperature, the melt flow velocity and the specific surface structure. This paper is focusing on the comparison of the melt surface structure.

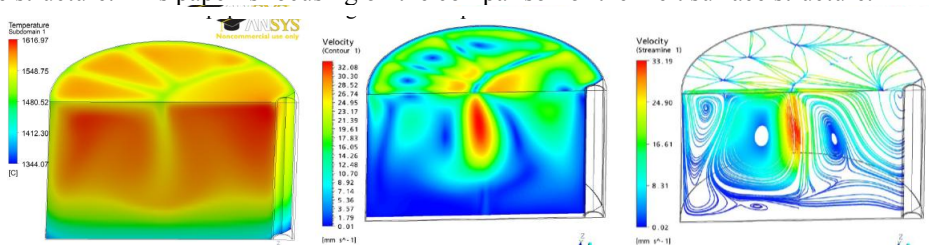


Figure 3 – Globally stationary state of Glass 1 (a) temperature distribution; (b) flow velocity; (c) streamlines after 90s

The simulation results of the globally stationary state of Glass 1 can be seen in Figure 3. The temperature distribution in Figure 3 (a) can be divided into different regions. The first region is the coldest and situated directly above the bottom of the crucible and along the crucible walls. The second region is the melt further within the crucible, which has the highest temperature and a volume of about two thirds of the crucible. This region contains a channel of relatively cold material. The channel is a result of the global melt flow. Being heated close to the crucible walls, the material rises up to the surface, moves to the center of the crucible and falls down again. Figure 3 (b) illustrates that the melt flow velocity has its maximum within the channel. Besides the major curl, which is driven by thermal buoyancy forces and can be seen in Figure 3 (c), there is a minor curl close to the crucible wall. This curl is asymmetric due to the influence of cooling finger and feeding conductor of the inductor crucible.

Figure 3 (a) also illustrates the typical flow pattern on the melt surface, which is caused by Marangoni convection. The surface structure can be described as branching channels traversing the melt, which begin close to the crucible walls. The channels are boundaries for cells with hotter melt. The velocity on the surface shown in Figure 3 (b) is bigger on the edge of the channels compared to their center and the inner part of a cell. In Figure 3 (a) globally stationary process is already achieved, but variations of the surface pattern can still be observed. However, the position of the channels and shape of the cells only change over time slowly. This is can be explained with Marangoni convection, which stabilizes the melt flow pattern. Marangoni convection causes a force in the direction of the negative temperature gradient pointing from warm cells to cooler channels. The force and the relatively small velocity of the melt within the channels also mean that the material of the channels stays longer at the surface compared to the material of the edges and therefore cools down significantly due to radiation losses. This again maintains the temperature gradient, which is responsible for Marangoni convection. Because of a very low electrical conductivity, Lorentz force does neither have a significant influence on the surface flow pattern, nor on the global melt flow. A comparison between a photograph of the surface (Figure 4 (a)) taken during an experiment and the simulation result (Figure 4 (b)) shows a very good agreement. There are four channels in each half of the crucible and no channels near the cooling finger in both cases.

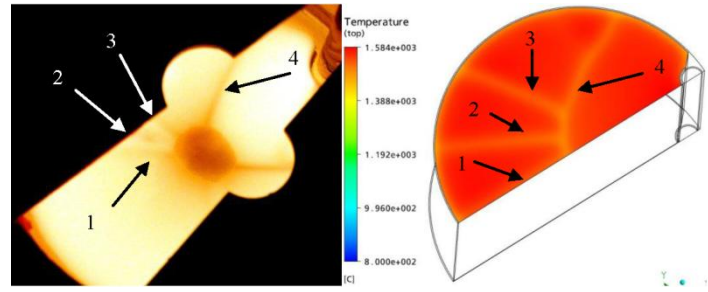


Figure 4 – Comparison of melt surface of Glass 1 (a) photograph of the experiment; (b) simulation result

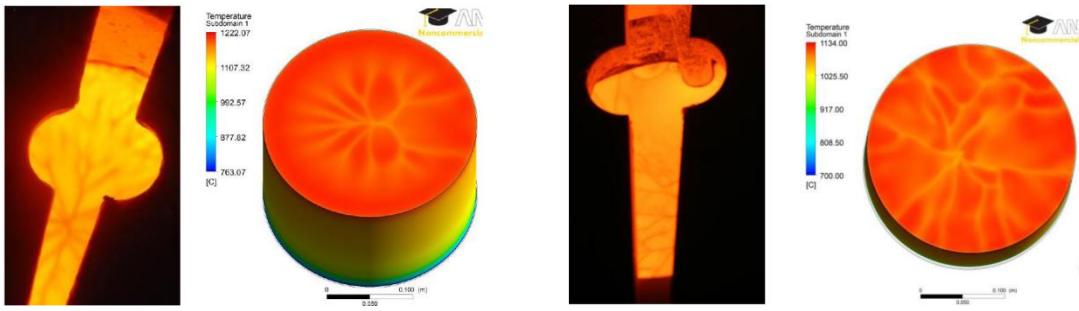


Figure 5 –Typical surface pattern of Glass 2 (a) experiment; (b) simulation and Glass 3 (c) experiment; (d) simulation

The basic phenomena determining the behavior of Glass 1 are also valid for the other glasses. Therefore only the differences with regards to the surface pattern and the comparison between experiment and simulation are considered. Again, the simulation result and the photograph show good agreement for Glass 2 as well as Glass 3 as can be seen in Figure 5. There are a lot more cooling channels for Glass 2 compared to Glass 1. The channels arise about 40 mm away from the crucible wall and are less wide. This is mainly due to the much smaller dynamic viscosity of Glass 2. The mixture of the melt therefore is much more intense. Glass 3 even has more channels then Glass 2. In addition, there are not only channels starting close to the crucible wall towards the center, but also short channels connecting the main channels. The distribution of channels is much more irregular. A reason for this behavior is that Glass 3 has the smallest dynamic viscosity of all glasses, which means minor turbulences within the melt might already occur. These turbulences hinder the emergence of bigger, more stable channels.

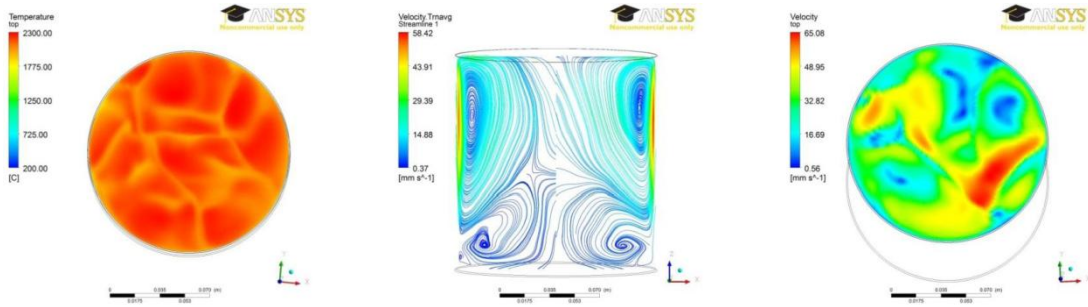


Figure 6 – Numercial results of ZrO_2-Al_2O_3 (a) temperature distribution; (b) surface velocity; (c) streamlines

3 Numerical investigation of one oxide melt and comparison with glass melts

The oxide used for experimental and numerical investigation was a ceramics of 50 wt% Zirconium and 50 wt% Aluminum oxide. The numerical model takes into account the cold crucible shown in Figure 1 (b) including each copper section, the copper bottom, the inductor. Due to much higher velocities of the melt flow of the oxide melt, a turbulence model has to be used in this case. A Large Eddy Model is used for the calculation of the melt flow. However, the first few time steps had to be calculated with k-ε-model, because of better convergence.

The turbulence of the melt also means that there is no globally stationary state. Within seconds the pattern of the melt surface changes significantly unlike in case of the investigated glasses. Figure 6 shows the simulation results for the simulation at a random point of time after the transition phase of the simulation is finished. The surface of the melt consists of cells with a temperature of 2150 – 2300 °C and colder areas between them with 2000 – 2150 °C. The velocities of the melt on the surface are twice as high compared to Glass 1 (Fig 3 (b)). The surface pattern in Fig 6 (a) and (b) shows a different characteristic than the investigated glasses. The Marangoni convection does not determine the surface structure. The cross section Figure 6 (c) shows that there are double curls within the melt. This means Lorentz force plays a more important role in this case. However, the upper curls are bigger than the lower curls. This indicates that thermal buoyancy is affecting the melt flow as well. In general, the melt flow for the oxide is completely different compared to the three glasses. This is because the dynamic viscosity is 10 times as small and the Lorentz force is up to 100 times as big.

Conclusion

A model to calculate the instationary 3D heating and melt flow of a skull melting process has been introduced. The model takes into account all relevant physical quantities, their mutual influence and different stirring mechanisms. Therefore it helps to improve the understanding of the processes inside the melt and on its surface. The melts of three glasses have been investigated numerically and experimentally to verify the model and a good agreement could be achieved. It was shown that the thermal buoyancy forces mainly drive the global flow of a glass, whereas Marangoni convection is responsible for the typical surface pattern. In the numerical investigation of an oxide Lorentz force and thermal buoyancy force were identified as the stirring mechanisms determining the melt flow. These findings deepen the understanding of a skull melting process and can be used to increase the process reliability and safety. Furthermore, the model can be used to predict the behavior of new materials before a cost and time intensive experiment is used to prove the feasibility of the process.

Literature

[1] Kudryash M. Experimental investigation of induction melting in cold crucible for high temperature processing of oxides using HF transistor power supply. Sierke Verlag, 2011.

[2] Niemann B., Nacke B., Geza V., Jakovics A. Simulation of the 3D mass transfer of molten glasses in the inductor-crucible. International conference on Electromagnetic Processing of Materials, 2009. Proceedings. EPM 2009. 525-528.

[3] Niemann B. Untersuchung des 3D Wärme- und Stofftransports von flüssigem Glas im Induktortiegel. Sierke Verlag, 2011.

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВУХУРОВНЕВОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ КООРДИНИРОВАННЫХ СТАБИЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫХ КОМПРОМИССОВ

А.В. Ванин, Е.М. Воронов, А.А. Карпунин

Кафедра систем автоматического управления
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

107005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, Россия
mole@list.ru
тел: +7(926)940-16-05

Ключевые слова: *системы управления, стабилизация, наведение, летательный аппарат, оптимизация, иерархия*

Abstract

In this paper we consider the solution of the problem of synthesis of a generalized control linear-quadratic formulation and iterative algorithm obtaining software and corrected hierarchical control in the formulation of general form. Technique of formation of the control algorithm in the form of coordinated stability compromises effective joint strategy based on a generalization of the inter-layer coordination and implementation of the Stackelberg equilibrium modified arbitration algorithm parametric stably - effective compromise multiobjective optimization tiered multisite systems.

Введение

В работе рассмотрено решение задачи синтеза обобщенного управления в линейно-квадратичной постановке и итерационного алгоритма получения программно-корректируемого иерархического управления в постановке общего вида. Методика формирования управления в форме алгоритма координированных стабильно-эффективных компромиссов основана на обобщении стратегии межуровневого координирования по Штакельбергу и применении модифицированного равновесно-арбитражного алгоритма параметрических стабильно-эффективных компромиссов оптимизации поуровневых многообъектных многокритериальных систем.

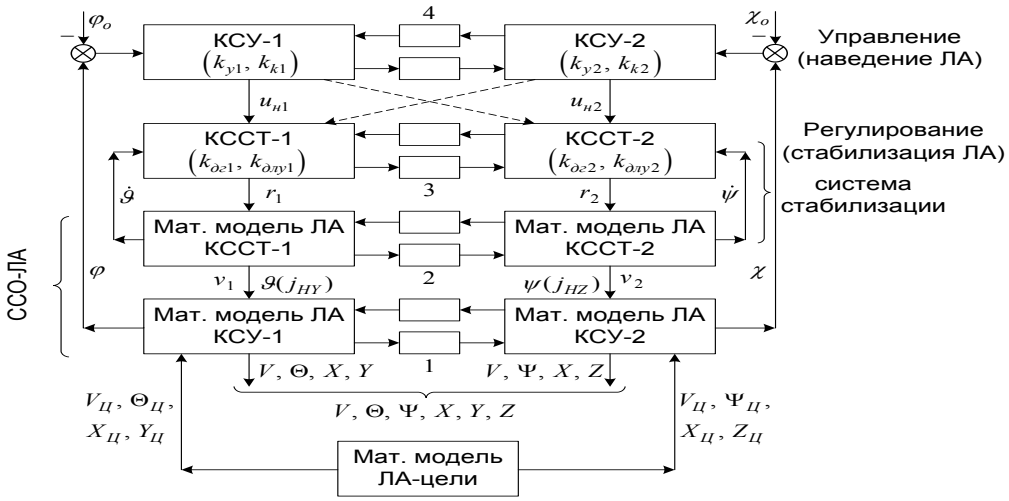
1 Структура и модель двухуровневой системы

В работе рассматривается иерархическая двухуровневая двухканальная система управления-регулирования летательного аппарата (ЛА) (рисунок 1). В системе представлены уровень управления (наведения) как многоканальной многокритериальной системы (ММС-1)[2] и уровень регулирования (стабилизации) (ММС-2), которые в свою очередь связаны между собой через структурно-сложный объект (ССО), который представлен математической моделью летательного аппарата[3]. В рамках данной работы рассматривается двухканальная система стабилизации (КССТ) с перекрестными связями летательного аппарата – по углу рыскания ψ (КССТ-1) и по углу тангажа θ (КССТ-2) и двухканальная система наведения по углу наклона траектории Θ и поворота траектории Ψ [3].

При разработке модели ЛА, взаимодействующего с целью, осуществляется переход от описания системы в абсолютных координатах к рассмотрению движения системы в отклонениях от известной выбранной траектории наведения [3]. В ходе разработки системы стабили-

зации траектории наведения осуществляется переход к линеаризованной системе уравнений относительно отклонений от траектории [3].

Разработанная двухуровневая линеаризованная иерархическая модель и постановка задачи многоканального наведения-стабилизации беспилотного ЛА на ЛА-цель с учетом перекрестных связей каналов стабилизации углового движения вокруг центра масс ЛА [2] и кинематики пространственного поступательного движения центра масс ЛА [1] позволяет решать поставленную задачу как задачу синтеза оптимального закона обобщенного управления двухуровневой системы в линейно-квадратичной постановке. На основе данного представления описания системы и вектора функций поуровневой эффективности в квадратичном виде мы находим решение задачи в виде функций управления: на уровне наведения $u=(u_{H1},u_{H2})$, которое предопределяет нормальные ускорения (j_{HY},j_{HZ}), траектории центра масс ЛА (рисунок 1), и на уровне стабилизации $v=(v_1,v_2)$, которое предопределяет устойчивость, качество, точность и быстродействие в каналах стабилизации по тангажу θ и по рысканию ψ. В качестве параметров, изменение которых будет определять оптимальное управление на каждом из уровней, мы принимаем коэффициенты датчиков линейных ускорений ($k_{ДЛУ}$) и дифференцирующих гироскопов ($k_{ДГ}$) в каждом из каналов для выражения v на уровне стабилизации, а также параметры метода наведения ($k_у$) и координатора цели ($k_к$) [3] для получения u на выходе уровня управления.



[[i]], $i = 1 – 4$ – перекрестные связи,
φ, χ - углы места и азимута в сферической системе координат [3],
V, X, Y, Z – величина скорости и декартовы координаты центра масс [3].

Рисунок 1 - Двухуровневая модель управления-регулирования двухканальной системы управления летательного аппарата

2 Формирование и оптимизация обобщенного управления многоуровневой системой

В ходе исследований формулируется концепция и дается определение обобщенного управления многоуровневой автоматизированной системы управления (АСУ).

Определение 1. Обобщенное оптимальное управление многоуровневой АСУ формируется на основе комбинации процессов

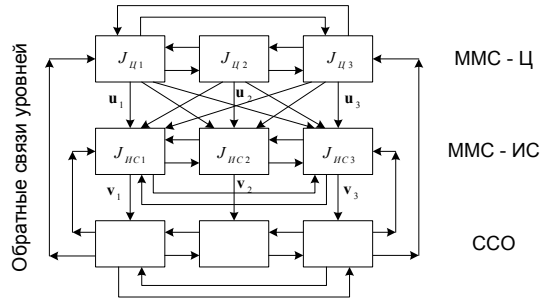
1) многокритериального выбора оптимальной функциональной структуры АСУ (облика АСУ);

2) оптимизации в подсистемах ММС-уровней;
3) уравновешивания (балансировки) подсистем ММС-уровней;
4) оптимизации межуровневой координации.

В качестве комментария определения в практическом примере двухуровневой двухканальной СУ наведения-стабилизации ЛА функциональный облик уже выбран. На соответствующих уровнях выбираются параметры k_{yl}, k_{kl}, l =1,2, $k_{ДЛУi}$, $k_{ДГi}$, i =1,2, которые обеспечивают балансировку и Парето-оптимальность на основе равновесно-арбитражной схемы стабильно-эффективного компромисса. Сигналы $u_{нl}$, l =1,2 обеспечивают межуровневую координацию между уровнем управления и стабилизации, а r_i, i =1,2 обеспечивают исполнительное управление.

Разрабатывается методика оптимизации управления на основе обобщения и алгоритмизации иерархического равновесия по Штакельбергу [1] в многоуровневых системах.

В данной работе развиваются и применяются подходы класса иерархических дифференциальных игр (ИДИ). Без ограничения общности рассуждений рассмотрим двухуровневую ИДИ с «правом первого хода» верхнего уровня. В отличие от известных результатов и в соответствии со структурным требованием многоуровневой СУ каждый верхний уровень представляет собой структурированную ММС с исходной структурной несогласованостью, представленную на рисунке 2. На рисунке 2 также без ограничения общности рассуждений рассматриваются трехподсистемные ММС.



Верхний уровень: ММС - Центр, нижний уровень:
ММС – Исполнительная Система (ММС - ИС).
Структурно-сложный объект (ССО)

Рисунок 2 - Структурная схема двухуровневой трехподсистемной ИДИ.

В соответствии с традиционным обозначением двухступенчатой дифференциальной игры уровень наведения называется центр (Ц), а уровень стабилизации - исполнительная система (ИС).

Структурно сложный объект (ССО) имеет математическую модель

(1) $x' = f(t, x, v, u)$, $x(t_0) = x_0$, $x \in E^n$,

где v — исполнительное управление с распределенным исполнением (рисунок 2)

(2) $v = (v_1, v_2, v_3)$, $\dim v_i = m_i$, $i = 1,2,3$, $v_i \in V_i \subset E^{mi}$,

(3) $\dim v = m = \sum m_i$, $v \in V = V_1 \times V_2 \times V_3 \subset E^m$.

Управление-координация ММС-

(4) $u = (u_1, u_2, u_3)$, $\dim u_l = k_l \geq 3$, $u_l \in U_l \subset E^{kl}$,

(5) $\dim u = k = \sum k_l$, $u \in U = U_1 \times U_2 \times U_3 \subset E^k$.

При распределенной координации u, связанной с одной из подсистем ММС-ИС, последнее неравенство может не выполняться.

Структурно и функционально связанные задачи ММС-Ц и ММС-ИС характеризуются соответственно функциями «выигрыша»

(6) $J_{Цl} = J_{Цl}(v, u)$, l = 1,2,3.

(7) $J_{ИСi} = J_{ИСi}(v, u)$, i = 1,2,3.

Общая структура показателей (4), (5) имеет вид

$$(8)\quad J_{ji} = \Phi_{ji}(x, t_k) + \int_{t_0}^{t_k} f_{ji}(t, x, u, v)dt,\ i = 1, 2, 3;\ j = (\text{Ц, ИС})$$

Определение 2 (ИРИДИШ). Структурные свойства иерархического равновесного решения двухуровневой ИДИ с обобщением стратегии Штакельберга составляют следующую трехэтапную процедуру получения обобщенного управления [3].

На первом этапе ММС-Центр на «правах первого хода» сообщает ММС-ИС свою координацию в форме закона-стратегии $u(t, x) \in U$ для каждой позиции из множества $\{t, x\}$ или программно-корректируемого закона-стратегии управления (ПКЗУ) для конечного множества $\{t_i, x(t_i), t_0 < t_1 < \ldots < t_i < \ldots < t_K = T\}$ или программного управления $u(t)$ для всех $t \in [t_0, t_K]$ или векторного параметрического множества $q \in Q$.

На втором этапе на уровне ММС-ИС формируется отображение $R: U \rightarrow V$ такое, что при каждом фиксированном $u \in U$

$$(9)\quad \max_{v \in V} \varphi_{ИС}\left(J_{ИС1}(u, v), \ldots, J_{ИС3}(u, v)\right) = \varphi_{ИС}\left(J_{ИС1}(u, Ru), \ldots, J_{ИС3}(u, Ru)\right)$$

Конкретный вид функции $\varphi_{ИС}$ определяется на множестве степеней конфликтности подсистем ММС-ИС (антагонизм, бескоалиционный или коалиционный конфликт, кооперация).

На третьем этапе, который развивает стратегию Штакельберга и обобщает РИДИШ, ММС-Ц выбирает решение

$$(10)\quad \max_{u \in U} \varphi_{Ц}\left(J_{Ц1}(u, Ru), \ldots, J_{Ц3}(u, Ru)\right) = \varphi_{Ц}\left(J_{Ц1}(u^o, Ru), \ldots, J_{Ц3}(u^o, Ru)\right)$$

Конкретный вид функции $\varphi_{Ц}$ определяется на множестве степеней конфликтности подсистем ММС-Ц [3].

Набор $\{u^r, Ru\}$ определяется как *иерархическое равновесие по Штакельбергу (ИРИДИШ).*

Приводится методика формирования обобщенного управления при бескоалиционном варианте балансировки ММС уровней [2].

3 Решение задачи синтеза оптимального закона обобщенного управления двухуровневой системы ММС-Ц, ММС-ИС в линейно-квадратической постановке

3.1 Постановка задачи [2]

Пусть в соответствии с [2] линейная модель ССО задана в виде

(11) $x' = A(t)x + B_{Ц1}(t)u_1 + B_{Ц2}(t)u_2 + B_{ИС1}(t)v_1 + B_{ИС2}(t)v_2$,

где u — управление-координация ММС-Ц

$u \in U = U_1 \times U_2,\ u_l \in U_l \subset E^{ml},\ l = 1,2;$

v — исполнительное управление ММС-ИС

(12) $v \in V = V_1 \times V_2,\ v_i \in V_i \subset E^{mi},\ i = 1,2;$

x — вектор состояния ССО, $x \in En$

Функции эффективности подсистем ММС-Ц, связанных через ССО (9) имеют вид

(13) $J_{Цl}(\mathbf{u},\ \mathbf{v}) = \mathbf{x}^T(t_k)\mathbf{C}_l\mathbf{x}(t_k) + \int_{t_0}^{t_k}\left[\mathbf{x}^T\mathbf{Q}_l(t)\mathbf{x} + \mathbf{u}_l^T\mathbf{D}_l(t)\mathbf{u}_l\right]dt,\ l = 1,2$

Функции эффективности подсистем ММС-ИС, связанных через ССО (9) с координациями ММС-Ц $u = (u_1, u_2)$

(14) $J_{ИСi}(\mathbf{u},\ \mathbf{v}) = \mathbf{x}^T(t_k)\mathbf{C}_i\mathbf{x}(t_k) + \int_{t_0}^{t_k}\left[\mathbf{x}^T\mathbf{Q}_i(t)\mathbf{x} + 2\mathbf{u}^T\mathbf{P}_i(t)\mathbf{v}_i + \mathbf{v}_i^T\mathbf{D}_i(t)\mathbf{v}_i\right]dt,\ i = 1,2,$

где $u^T\mathrm{P}_i(t) = [u_1{}^T\mathrm{P}_{i1}(t) + u_2{}^T\mathrm{P}_{i2}(t)]$ — влияние координации в показателях.

Здесь t_0, $t_\mathrm{K} = \mathrm{const} > 0$, элементы всех матриц непрерывны при $t \in [t_0,\ t_\mathrm{K}]$, матрицы C_l, C_i, $l = 1,2$, $i = 1,2$ постоянны, матрицы C_l, C_i, D_l, D_i, Q_l, Q_i, $l = 1,2$, $i = 1,2$ симметричны, а матрицы D_l, D_i, $l = 1,2$, $i = 1,2$ определенно отрицательны.

Допустимые структуры управлений u_l, v_i подсистем ММС-Ц и ММС-ИС ограничены функциями вида

(15) $u_l(t, x) = \mathrm{K}_{ul}(t) \cdot x,\ v_i(t, x) = \mathrm{K}_{vi}(t) \cdot x,\ l = 1,2,\ i = 1,2,$

где матрицы K_l, K_i непрерывны.

Утверждение 2. Пусть

1) матрицы D_l, D_i, $l = 1,2$, $i = 1,2$ определенно отрицательны;
2) при любых непрерывных на $[t_0, t_K]$ матрицах $\mathrm{K}_{\underline{u}l}(t)$, $l = 1,2$ система

$$
\begin{aligned}
&\dot{\mathbf{\Theta}}_{i\mathbf{u}} + 2\mathbf{\Theta}_{i\mathbf{u}}\left(\mathbf{A} - \mathbf{M}_1\mathbf{K}_{\mathbf{u}_1} - \mathbf{M}_2\mathbf{K}_{\mathbf{u}_2} - \bar{\mathbf{B}}_j\mathbf{\Theta}_{j\mathbf{u}}\right) + \mathbf{Q}_i - \\
&-\left(\mathbf{K}_{\mathbf{u}_1}^T\bar{\mathbf{P}}_{i1}\mathbf{K}_{\mathbf{u}_1} + \mathbf{K}_{\mathbf{u}_2}^T\bar{\mathbf{P}}_{i2}\mathbf{K}_{\mathbf{u}_2} + \mathbf{K}_{\mathbf{u}_1}^T\bar{\mathbf{P}}_{i12}\mathbf{K}_{\mathbf{u}_2} + \mathbf{K}_{\mathbf{u}_2}^T\bar{\mathbf{P}}_{i12}^T\mathbf{K}_{\mathbf{u}_1}\right) - \\
&-\left(\mathbf{K}_{\mathbf{u}_1}^T\mathbf{L}_{i1}\mathbf{\Theta}_{i\mathbf{u}} + \mathbf{K}_{\mathbf{u}_2}^T\mathbf{L}_{i2}\mathbf{\Theta}_{i\mathbf{u}} + \mathbf{\Theta}_{i\mathbf{u}}\mathbf{L}_{i1}^T\mathbf{K}_{\mathbf{u}_1} + \mathbf{\Theta}_{i\mathbf{u}}\mathbf{L}_{i2}^T\mathbf{K}_{\mathbf{u}_2}\right) - \\
&-\mathbf{\Theta}_{i\mathbf{u}}\bar{\mathbf{B}}_i\mathbf{Q}_{i\mathbf{u}} = 0, \quad \mathbf{\Theta}_{i\mathbf{u}}(t_k) = \mathbf{C}_i, \quad (i, j = 1,2;\ i \neq j)
\end{aligned}
\tag{16}
$$

где

$$
\begin{aligned}
&\mathbf{M}_l = \mathbf{B}_{ИСl}\mathbf{D}_{ИСl}^{-1}\mathbf{P}_{1l}^T + \mathbf{B}_{ИС2}\mathbf{D}_{ИС2}^{-1}\mathbf{P}_{2l}^T - \mathbf{B}_{Цl},\ (l = 1,2),\\
&\bar{\mathbf{B}}_i = \mathbf{B}_{ИСi}\mathbf{D}_{ИСi}^{-1}\mathbf{B}_{ИСi}^T, \quad \bar{\mathbf{B}}_i^T = \bar{\mathbf{B}}_i,(i = 1,2),\\
&\bar{\mathbf{P}}_{ij} = \mathbf{P}_{ij}\mathbf{D}_{ИСi}^{-1}\mathbf{P}_{ij}^T,(i, j = 1,2),\\
&\bar{\mathbf{P}}_{i12} = \mathbf{P}_{i1}\mathbf{D}_{ИСi}^{-1}\mathbf{P}_{i2}^T, \quad \bar{\mathbf{P}}_{i21} = \bar{\mathbf{P}}_{i12}^T,(i = 1,2),\\
&\mathbf{L}_{ij} = \mathbf{P}_{ij}\mathbf{D}_{ИСi}^{-1}\mathbf{B}_i^T, \quad \mathbf{L}_{ji} = \mathbf{L}_{ij}^T,(i, j = 1,2);
\end{aligned}
$$

имеет продолжимое на $[t_0, t_K]$ решение;

3) система из шести матричных уравнений

$$
\begin{aligned}
\bullet\quad &\dot{\mathbf{K}}_{i\mathbf{u}_l} + \mathbf{K}_{i\mathbf{u}_l}^T\left[\mathbf{A} - \mathbf{M}_l\mathbf{K}_{\mathbf{u}_l} - \mathbf{M}_p\mathbf{K}_{\mathbf{u}_p} - \bar{\mathbf{B}}_1\mathbf{\Theta}_{1\mathbf{u}} - \bar{\mathbf{B}}_2\mathbf{\Theta}_{2\mathbf{u}}\right] - \\
&-\mathbf{K}_{j\mathbf{u}_l}^T\bar{\mathbf{B}}_j\mathbf{\Theta}_{i\mathbf{u}} - 2\mathbf{M}_l^T\mathbf{\Theta}_{i\mathbf{u}} - 2\bar{\mathbf{P}}_{il}\mathbf{K}_{\mathbf{u}_l} - 2\bar{\mathbf{P}}_{ilp}\mathbf{K}_{\mathbf{u}_p} = 0,\\
&\mathbf{K}_{i\mathbf{u}_l}(t_k) = 0, \ (i, j = 1,2, \ i \neq j, \ l, p = 1,2, \ l \neq p);\\
\bullet\quad &\dot{\mathbf{\Theta}}_l + 2\mathbf{\Theta}_l\left(\mathbf{A} - \mathbf{M}_1\hat{\mathbf{K}}_1\mathbf{\Theta}_1 - \mathbf{M}_2\hat{\mathbf{K}}_2\mathbf{\Theta}_2 - \bar{\mathbf{B}}_1\mathbf{\Theta}_{1\mathbf{u}^r} - \bar{\mathbf{B}}_2\mathbf{\Theta}_{2\mathbf{u}^r}\right) - \\
&-\mathbf{\Theta}_l\hat{\mathbf{K}}_l^T\mathbf{D}_l\hat{\mathbf{K}}_l\mathbf{\Theta}_l = 0, \quad \mathbf{\Theta}_l(t_k) = \mathbf{C}_l, \quad (l = 1,2);
\end{aligned}
\tag{17}
$$

- $$\dot{\boldsymbol{\Theta}}_i + 2\boldsymbol{\Theta}_i\left(\mathbf{A} - \mathbf{M}_1\mathbf{K}_{\mathbf{u}_1} - \mathbf{M}_2\mathbf{K}_{\mathbf{u}_2} - \bar{\mathbf{B}}_j\boldsymbol{\Theta}_j\right) + \mathbf{Q}_i -$$
$$-\left(\mathbf{K}_{\mathbf{u}_1}^T\bar{\mathbf{P}}_{i1}\mathbf{K}_{\mathbf{u}_1} + \mathbf{K}_{\mathbf{u}_2}^T\bar{\mathbf{P}}_{i2}\mathbf{K}_{\mathbf{u}_2} + \mathbf{K}_{\mathbf{u}_1}^T\bar{\mathbf{P}}_{i12}\mathbf{K}_{\mathbf{u}_2} + \mathbf{K}_{\mathbf{u}_2}^T\bar{\mathbf{P}}_{i12}^T\mathbf{K}_{\mathbf{u}_1}\right) -$$
$$-\left(\mathbf{K}_{\mathbf{u}_1}^T\mathbf{L}_{i1}\boldsymbol{\Theta}_i + \mathbf{K}_{\mathbf{u}_2}^T\mathbf{L}_{i2}\boldsymbol{\Theta}_i + \boldsymbol{\Theta}_i\mathbf{L}_{i1}^T\mathbf{K}_{\mathbf{u}_1} + \boldsymbol{\Theta}_i\mathbf{L}_{i2}^T\mathbf{K}_{\mathbf{u}_2}\right) -$$
$$-\boldsymbol{\Theta}_i\bar{\mathbf{B}}_i\mathbf{Q}_i = 0, \qquad \boldsymbol{\Theta}_i(t_k) = \mathbf{C}_i, \qquad (i, j = 1,2;\ i \neq j),$$

где

$$\boldsymbol{\Theta}_i = \boldsymbol{\Theta}_{i\mathbf{u}^r}, \qquad (i = 1,2),$$

$$\mathbf{K}_{\mathbf{u}_l} = \hat{\mathbf{K}}_l\boldsymbol{\Theta}_l, \qquad (l = 1,2),$$

$$\hat{\mathbf{K}}_l = \mathbf{D}_l^{-1}\left(\mathbf{M}_l^T + \frac{1}{2}\mathbf{K}_{1\mathbf{u}_l}^T\bar{\mathbf{B}}_1 + \frac{1}{2}\mathbf{K}_{2\mathbf{u}_l}^T\bar{\mathbf{B}}_2\right);$$

допускает продолжимое на интервале $[t_0, t_K]$ решение ($K_{iul}(t)$, l = 1,2, i = 1,2, Θ_l, l = 1,2, Θ_i, i = 1,2).

В результате совместного решения системы из шести матричных дифференциальных уравнений пункта 3 утверждения получаем равновесные решения на уровне ММС-Ц (в данной задаче эти решения являются также координацией ММС-ИС)

(18) $$\mathbf{u}_l^r(t, \mathbf{x}) = \mathbf{D}_l^{-1}\left(\mathbf{M}_l^T + \frac{1}{2}\mathbf{K}_{1\mathbf{u}_l}^T\bar{\mathbf{B}}_1 + \frac{1}{2}\mathbf{K}_{2\mathbf{u}_l}^T\bar{\mathbf{B}}_2\right)\boldsymbol{\Theta}_l\mathbf{x}, \quad (l = 1,2).$$

Эти решения совместно с равновесными решениями ММС-ИС

(19) $v^r(t, x) = \mathrm{R}(u) = (\mathrm{R}_1(u), \mathrm{R}_2(u)) = (v_1{}^r, v_2{}^r)$,

где

(20) $$\mathbf{v}_i^r(t, \mathbf{x},) = \mathbf{R}_i(\mathbf{u}) = -\mathbf{D}_{ИСi}^{-1}\left[\mathbf{P}_i^T\mathbf{u}(t, \mathbf{x}) + \mathbf{B}_{ИСi}^T\boldsymbol{\Theta}_{i\mathbf{u}}\mathbf{x}\right], \ (i = 1,2),$$

где

(21) $\Theta_{iu} = \Theta_{iu}{}^r = \Theta_i$, $u(t, x) = u^r(t, x)$

определяют ИРИДИШ в двухуровневой системе из ММС-Ц и ММС-ИС в рамках линейно-квадратической постановки.

При этом оптимальные равновесные показатели ММС-Ц и ММС-ИС можно определить из следующих соотношений

(22) $J_{Цl} = x_0{}^T\,\Theta_l(t_0)x_0$, l = 1,2.

$$\mathrm{J_{ИСi}} = \mathrm{x_0}^{\mathrm{T}}\,\Theta_{\mathrm{i}}(\mathrm{t_0})\mathrm{x_0},\ \mathrm{i} = 1,2,\ \mathrm{x_0} = \mathrm{x}(\mathrm{t_0})\,.$$

Определенное приближение в методах получения ИРИДИШ, которое позволяет решить задачу в общем случае описания (13) – (18), основывается на стратегиях в виде приближенного ПКЗУ и его параметризации на программном такте ПКЗУ.

3.1 Формирование функций эффективности для подсистем ММС-Ц и ММС-ИС

Канал стабилизации сначала стабилизируется на возмущения $M_{\text{возм}}$. С выбором $k_{\text{ДГ}}$ и $k_{\text{ДЛУ}}$ для каждого из каналов (тангажа или рыскания). А затем $k_{\text{ДГ}}$ и $k_{\text{ДЛУ}}$ вместе с $k_{\text{К}}$ и $k_{\text{У}}$ корректируются для повышения точности и качества наведения с учетом связей между уровнями иерархии. Первые два параметра влияют на нормальные ускорения, а значит на кривизну траектории и качество наведения, а вторые два на точность наведения (R).

Функции эффективности на уровне наведения складываются из:

- векторного пролета;
- качества наведения по каждому из каналов;

- минимизации энергозатрат на управление.

Функции эффективности на уровне регулирования складываются из:

- кривизна траектории к концу наведения;
- качество стабилизации по каждому из каналов;
- минимизация энергозатрат на управление.

Для каждого из каналов и на каждом из уровней формируется свой показатель эффективности на основании трех составляющих:

$J_{\text{Ц}1} = J_{\text{Ц}11} + J_{\text{Ц}12} + J_{\text{Ц}13}$,

$J_{\text{Ц}2} = J_{\text{Ц}21} + J_{\text{Ц}22} + J_{\text{Ц}23}$,

$J_{\text{ИС}1} = J_{\text{ИС}11} + J_{\text{ИС}12} + J_{\text{ИС}13}$,

$J_{\text{ИС}2} = J_{\text{ИС}21} + J_{\text{ИС}22} + J_{\text{ИС}23}$,

Для каждого из уровней формируется общий показатель с учетом весов каждого из каналов.

3.2 Получение равновесных решений для управлений

На основе матричной системы ДУ описания ССО и, получив функции эффективности, мы можем получить матричные уравнения, входящие в систему (14). Подставив в них все известные значения, проведя необходимые преобразования, мы получаем систему дифференциальных уравнений, связанных между собой. С помощью пакета MatLab мы можем найти численные решения данной задачи. У нас будет получаться «сеть» решений вследствие того, что мы будем варьировать наши управляющие параметры на каждом из уровней для получения таблицы значений для каждого из параметров.

В результате после всех преобразований и подстановок мы получаем, что управления на уровне наведения будут равны:

$u_1 = F_1^T \cdot x$,

$u_2 = F_2^T \cdot x$,

где $F_1 = F_1(k, t)$, $F_2 = F_2(k, t)$.

В свою очередь управляющие воздействия на уровне стабилизации будут равны

$v_1 = v_1(k, u, x, t)$, $v_2 = v_2(k, u, x, t)$.

3.3 Получение области показателей и траектории движения ЛА

Следующим этапом мы подставляем найденные управления в первоначальную матричную систему уравнений, описывающих ССО.

Используя подсистему Momdis вычислительного пакета MatLab, мы получаем области наших показателей эффективности. Для этого мы вбиваем уравнения нашей системы в модель. Показатели мы разбиваем на пары по уровням иерархии.

$J_1 = \alpha_{11} J_{\text{Ц}1} + \alpha_{12} J_{\text{Ц}2}$,

$J_2 = \alpha_{21} J_{\text{ИС}1} + \alpha_{22} J_{\text{ИС}2}$.

На этой области показателей мы можем провести оптимизацию наших управлений, которые в свою очередь зависят от управляющих параметров на каждом уровне иерархии. За счет перекрестных связей между двумя рассмотренными каналами и взаимосвязанности уровней мы видим, что параметры влияют на все управления сразу, а не только на данный канал или данный уровень.

Расчет проводится с использованием пакета MatLab и Simulink Individual R2010. Предварительно был проведен сетевой анализ области показателей для нормировки их таким образом, что все показатели были приведены к одному диапазону:

$J_{1\text{i}}^{\text{H}} = (J_{1\text{i}} - J_{1\min}) / (J_{1\max} - J_{1\min})$,

$J_{2\text{i}}^{\text{H}} = (J_{2\text{i}} - J_{2\min}) / (J_{2\max} - J_{2\min})$.

При этом интервалы изменения параметров выбраны таким образом, чтобы гарантировать устойчивость системы.

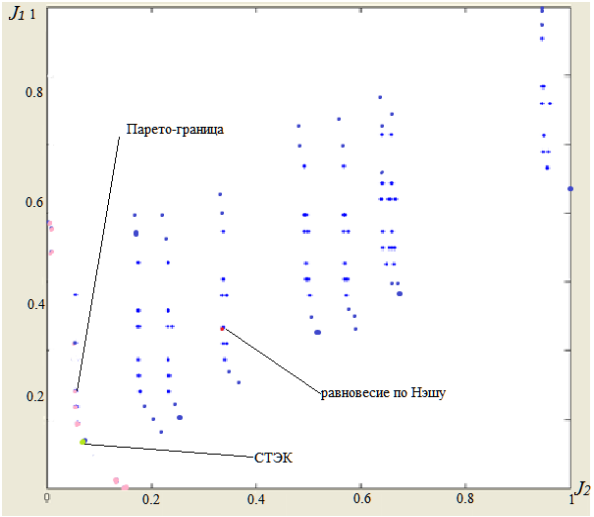


Рисунок 3 - Область показателей

Анализируя полученную область показателей можно сказать, что Парето-граница будет проходить по крайнему левому ряду точек, оптимальной будет единственная точка СТЭК при равенстве значений коэффициентов $\alpha_{ij} = 0{,}5$ в силу равнозначности всех показателей для нас.

На основе построенной области и выбранных параметров, соответствующих данной оптимальной точке мы построим нашу траекторию полета, получившуюся в результате наведения на прямолинейно движущуюся цель.

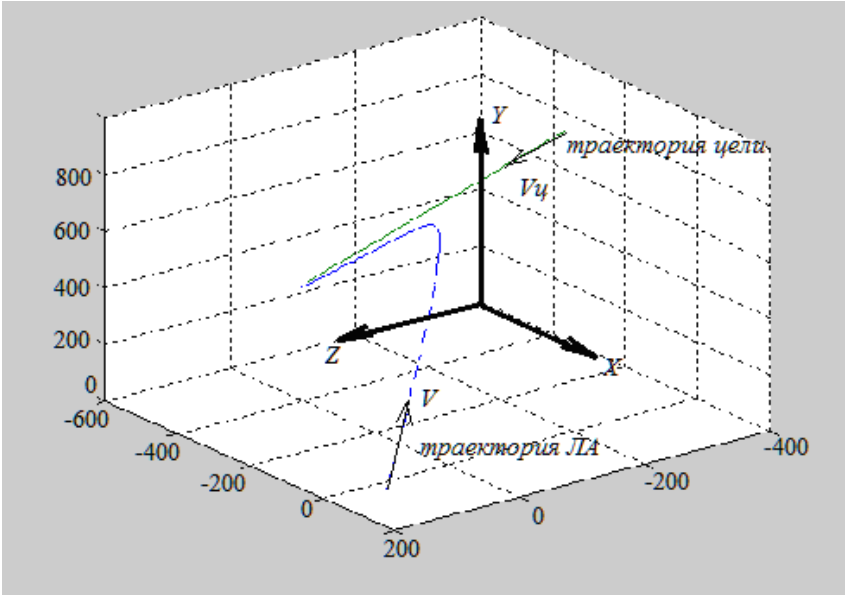


Рисунок 4 - Траектория наведения ЛА на цель

На графике видно, что траектории постепенно сближаются и, с учетом погрешности наведения, объект поражает цель.

Заключение

В работе сформулирована задача синтеза обобщенного управления в линейно-квадратичной постановке. Сформирован итерационный алгоритм получения программно-корректируемого иерархического управления в постановке общего вида. Методика формирования управления в форме алгоритма координированных стабильно-эффективных компромиссов основана на обобщении стратегии межуровневого координирования по Штакельбергу и применении модифицированного равновесно-арбитражного алгоритма параметрических стабильно-эффективных компромиссов оптимизации поуровневых многообъектных многокритериальных систем.

Исследования показали, что значения параметров, рассчитанные с использованием элементов теории ММС обеспечивают не только оптимальное управление в системе «стабилизации-наведения» с перекрёстными связями, но и позволяют компенсировать усиление влияния перекрестных связей при больших перегрузках ЛА.

Список литературы

[1] Воронов Е.М., Карпунин А.А., Серов В.А. Алгоритмы иерархической оптимизации в двухуровневой многоканальной задаче «управления-регулирования» // Вестник РУДН. Инженерные исследования. —2009. — №3. — С. 1-18.

[2] Воронов Е.М. Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных компромиссов. – М.: Изд-во МГТУ, 2001. – 576 с.

[3] Лебедев А.А. Карабанов В.А. Динамика систем управления беспилотными летательными аппаратами.— М.: Машиностроение, 1965.— 528 с.

[4] Воронов Е.М., Мелехина Ю., Веселовская О.А., Мусин Е.Т. Равновесно-арбитражная многокритериальная балансировка каналов в многосвязном регулировании и управлении // ВестникМГТУ им. Н.Э. Баумана Серия «Приборостроение». — 2007.—№4.— С. 99-119.

[5] Пупков К.А., Воронов Е.М., Карпунин А.А., Пролетарский А.В., Ванин А.В. Структурный синтез и иерархическое уравновешивание в интеллектуальных системах управления //Интеллектуальные системы: Труды Девятого международного симпозиума / Под ред. КА. Пупкова. — М.: РУСАКИ, 2008. — С. 33-37.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ В ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

А.Н. Дилигенская

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, гл. корпус, Россия
adiligenskaya@mail.ru
тел: +7 (846) 337-07-00

Ключевые слова: *обратная задача теплопроводности, специальная задача математического программирования, параметрическая оптимизация, альтернансный метод*

Abstract

Inverse thermal conductivity problem, formulated in the extremal statement is considered. The problem of identification of the boundary action or the heat source function is solved. A regularization solution of inverse problem by analytical method is given. The solution is found in a class of continuous and continuously differentiable functions. The problem of mathematical programming can be obtained. This problem is solved by special alternance method.

Введение

Исследование процессов теплопереноса - восстановление граничных или начальных условий теплообмена, идентификация внутренних воздействий, определение неизвестных теплофизических характеристик - является актуальной задачей инженерной теплофизики [1-3]. Идентификация тепловых процессов, основанная на решении обратных задач теплопроводности (ОЗТ), требует новых подходов, применения современной методологии и технологий исследования.

Большие возможности численных методов решения обратных задач обусловливают их широкое применение. При этом аналитическое исследование теплообмена по-прежнему является одним из основных подходов к качественному анализу основных свойств и базовых закономерностей процесса теплопроводности.

Получение аналитической формы решения ОЗТ сопряжено с большими трудностями, и зачастую возможно лишь для частного круга задач, поэтому на практике аналитические подходы приходится комбинировать с численными методами.

Традиционно одним из базовых подходов к решению исходных некорректно поставленных обратных задач является процедура итерационной регуляризации [1-7].

Другим эффективным подходом, соответствующим естественной регуляризации на основе сужения множества искомых решений до класса физически реализуемых функций, является формулировка задачи в экстремальной постановке и ее последующее решение с применением численных методов оптимизации. Сужение множества искомых решений производится на основе предварительной параметризации управляющих воздействий в виде совокупности конечного числа искомых параметров.

В этом случае ОЗТ сводится к конечномерной задаче математического программирования со сформулированным критерием оптимальности относительно значений вектора параметров.

Поставленная задача рассматривается как задача оптимального управления, для решения которой могут быть использованы методы теории оптимизации, в том числе известные условия оптимальности для систем с распределенными параметрами [8,9].

В статье рассмотрен метод решения задачи в экстремальной постановке, сводимой на основе параметризации управляющих воздействий к негладкой задаче математического программирования, для решения которой используется метод, основанный на альтернансных свойствах искомых оптимальных соотношений.

Предложенный метод применен для решения задач идентификации сосредоточенных воздействий, в качестве которых рассмотрены внешнее управление в граничной задаче или мощность внутреннего тепловыделения во внутренней ОЗТ.

1 Постановка задачи

Рассматривается базовая линейная одномерная модель нестационарного процесса теплопроводности, заданная однородным уравнением Фурье в относительных единицах

$$\frac{\partial\theta(x,\varphi)}{\partial\varphi}=\frac{\partial^2\theta(x,\varphi)}{\partial x^2}+F(x,\varphi),\qquad 0<x<1,\quad 0<\varphi\le\varphi^0 \tag{1}$$

в частном случае краевых условий третьего рода

$$\frac{\partial\theta(1,\varphi)}{\partial x}+\mathrm{Bi}\theta(1,\varphi)=\mathrm{Bi}\cdot\theta_c(\varphi),\ \frac{\partial\theta(0,\varphi)}{\partial x}=0,\ \varphi\in[0,\varphi^0];\ \theta(x,0)=0,\ x\in[0,1] \tag{2}$$

Здесь $\theta(x,\varphi)$ - температурное поле, зависящее от безразмерного времени (числа Фурье) φ и пространственной координаты $x\in[0,1]$; Bi - безразмерный критерий Био, определяющий уровень тепловых потерь с поверхности нагреваемого тела; $F(x,\varphi)$ - пространственно-временное управление по мощности внутреннего тепловыделения, которое может быть представлено в виде произведения двух функций от одной переменной [10]

$$F(x,\varphi)=\Psi(x)\upsilon(\varphi), \tag{3}$$

где $\upsilon(\varphi)$ - удельная величина полной мощности источников тепла, выделяемого в нагреваемом теле, $\Psi(x)$ - закон их распределения по пространственной координате; $\theta_c(\varphi)$ - температура окружающей среды, являющаяся сосредоточенным управляющим воздействием на границе тела $x=1$ при $F(x,\varphi)=0$ или, в противном случае, задающая тепловые потери на этой же поверхности.

В зависимости от типа рассматриваемой задачи искомым сосредоточенным управлением $u(\varphi)$ может являться граничное воздействие $\theta_c(\varphi)$ в граничных ОЗТ или мощность внутреннего тепловыделения $\upsilon(\varphi)$ во внутренних ОЗТ. Искомое управляющее воздействие подчинено ограничению

$$u(\varphi)\in V,\ \varphi>0 \tag{4}$$

принадлежности заданному подходящему множеству V соответствующих управляющих воздействий.

Сформулируем модельную ОЗТ в экстремальной постановке.

По заданной температурной зависимости $\theta^*(\varphi)$ в некоторой фиксированной точке контроля $x^*\in[0,1)$ требуется восстановить искомое сосредоточенное управление $u^*(\varphi)$, минимизирующее невязку между заданным распределением $\theta^*(\varphi)$ и точным решением $\theta(x^*,\varphi)$ краевой задачи (1)-(3), соответствующим искомой функции $u^*(\varphi)$.

Для оценки этой невязки возможно использовать ошибку приближения результирующего температурного поля $\theta(x^*,\varphi)$ к требуемому $\theta^*(\varphi)$ в равномерной метрике [9] на заданном

временном интервале $\varphi \in [0, \varphi^0]$. Соответствующая задача оптимального управления формулируется следующим образом.

Для объекта (1)-(3) необходимо найти подчиненное ограничению (4) управляющее воздействие $u^*(\varphi)$, обеспечивающее на заданном временном интервале выполнение минимаксного соотношения

$$(5) \quad I(u) = \max_{\varphi \in [0, \varphi^0]} \left| \theta(x^*, \varphi) - \theta^*(\varphi) \right| \to \min_{u(\varphi) \in V}.$$

Для сужения исходного множества V управляющих воздействий до класса физически реализуемых на интервале идентификации функций [1] достаточно принять за управляющее воздействие вместо $u(\varphi)$ его k-ю производную $w(\varphi) = u^{(k)}(\varphi)$, $k > 1$ [9], на которую накладывается типовое ограничение

$$(6) \quad |w(\varphi)| \le |w_{\max}|, \ \varphi \in (0, \varphi^0).$$

Такой подход гарантирует непрерывность $u(\varphi)$ вместе с ее $k-1$ производными на рассматриваемом интервале $\varphi \in (0, \varphi^0)$.

В большинстве физически обоснованных случаев для поиска $u(\varphi)$ достаточно рассматривать непрерывные и непрерывно-дифференцируемые на интервале $[0, \varphi^0]$ э φ функции [9], в соответствии с чем за управление принимается вторая производная $w(\varphi) = u''(\varphi)$, подчиненная ограничению (6). Связь искомого воздействия $u(\varphi)$ с новым управлением осуществляется по следующим соотношениям:

$$(7) \quad \begin{aligned} &\frac{du}{d\varphi} = v, \ u(0) = u_0; \\ &\frac{dv}{d\varphi} = w, \ v(0) = u'(0) = v_0. \end{aligned}$$

2 Формулировка задачи математического программирования

Используем описание объекта (1), (2) в виде бесконечного ряда [10,11]

$$(8) \quad \begin{aligned} \theta(x, \varphi) = &\sum_{m=1}^{\infty} A_m(x) \Psi_m(x) \exp(-\mu_m^2 \varphi) \int_0^{\varphi} \exp(\mu_m^2 \varphi) \upsilon(\varphi) d\varphi + \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} A_m(x) \cos(\mu_m) Bi \cdot \exp(-\mu_m^2 \varphi) \int_0^{\varphi} \exp(\mu_m^2 \varphi) \theta_{II}(\varphi) d\varphi. \end{aligned}$$

разложения температурного поля $\theta(x, \varphi)$ по собственным функциям $\cos(\mu_m x)$ тепловой задачи [10,11], где $A_m(x) = \dfrac{2\mu_m}{\mu_m + \sin\mu_m \cos\mu_m} \cos(\mu_m x)$, μ_m^2 - собственные числа, Ψ_m - коэффициенты разложения в ряд по $\cos(\mu_m x)$ функции пространственного распределения источников тепла $\Psi(x)$.

На основе математического описания (7) -(9), можно перейти к следующей постановке задачи. Для объекта управления (7) -(9) требуется найти подчиненное ограничению (6) сосре-

доточенное управляющее воздействие $w^*(\varphi)$, при котором на заданном интервале $\varphi \in [0, \varphi^0]$ достигается минимаксное соотношение

$$(9)\quad I(w) = \max_{\varphi\in[0,\varphi^0]} \left| \sum_{m=1}^{\infty} A_m(x)\Psi_m(x)\exp(-\mu_m^2\varphi)\int_0^{\varphi}\exp(\mu_m^2\tau)u(\tau)d\tau + \right.$$
$$\left. + \sum_{m=1}^{\infty} A_m(x)\cos(\mu_m)Bi\cdot\exp(-\mu_m^2\varphi)\int_0^{\varphi}\exp(\mu_m^2\tau)\theta_{II}(\tau)d\tau - \theta^*(\varphi)\right| \to \min_w.$$

Используем вспомогательный параметр ε [12] и перейдем к эквивалентной задаче оптимального управления объектом (7) -(9) со стандартным интегральным функционалом качества

$$(10)\quad I^0(w,\varepsilon) = \frac{1}{\varphi^0}\int_0^{\varphi^0}\varepsilon d\varphi = \varepsilon \to \min_{w,\varepsilon}$$

при дополнительном фазовом ограничении $\left|\theta(x^*,\varphi) - \theta^*(\varphi)\right| - \varepsilon \le 0, \quad \varphi \in [0,\varphi^0]$, в совокупности заменяющими минимаксный критерий (10) [9,12]. Таким образом, задача сводится к поиску управляющего воздействия $w^*(\varphi)$, подчиненного ограничению (6), обеспечивающего для объекта (7) -(9) минимизацию критерия качества (11) в условиях фазового ограничения (12).

Рассмотрим сначала решение поставленной задачи без учета ограничения (12). Если найденное без учета (12) оптимальное управление $w^{**}(\varphi)$ не нарушает выполнения неравенства (12), то тем самым оно совпадает с искомым управлением $w^*(\varphi)$.

В таком случае для решения задачи (11) оптимизации без учета ограничений, возможно использовать необходимые условия оптимальности в форме принципа максимума Понтрягина [9,12]. На его основе можно получить, что новое управление $w^{**}(\varphi)$ представляет собой кусочно-постоянную функцию времени, попеременно принимающую свои предельно допустимые согласно (6) значения.

Новое оптимальное управление $w^{**}(\varphi)$ состоит из знакочередующихся интервалов постоянства, определяется их числом n и длительностями $\widetilde{\Delta}_i$, $i = \overline{1,n}$ и на каждом i-ом интервале имеет вид

$$(11)\quad w^{**}(\varphi) = (-1)^{i+1}w, \quad i = \overline{1,n}\ ,\ 0 < \varphi \le \varphi^0 = \sum_{i=1}^{n}\widetilde{\Delta}_i\ .$$

Параметризованная форма искомых управляющих воздействий получается интегрированием соотношений (7), (8), и принимает вид кусочно-параболической зависимости

$$(12)\quad u^*(\varphi) = \begin{cases} u(0) + u'(0)\varphi + \dfrac{w_{\max}}{2}\varphi^2, & при\ \varphi \in [0,\widetilde{\Delta}_1], n \ge 1,\ i = 1; \\ u(0) + u'(0)\varphi + \dfrac{w_{\max}}{2}\varphi^2 + w_{\max}\sum\limits_{k=2}^{j}(-1)^{k+1}\left(\varphi - \sum\limits_{i=1}^{k-1}\widetilde{\Delta}_i\right)^2, \\ при \quad \sum\limits_{i=1}^{j-1}\widetilde{\Delta}_i \le \varphi \le \sum\limits_{i=1}^{j}\widetilde{\Delta}_i,\ j = \overline{2,n},\ n \ge 2. \end{cases}$$

В соответствии с (14), управляющее воздействие однозначно характеризуется вектором параметров $\Delta = (\widetilde{\Delta}, w_{\max}, u(0)u'(0))$, содержащим протяженности $\widetilde{\Delta} = (\widetilde{\Delta}_i)$, $i = \overline{1,n}$ знакочере-

дующихся интервалов постоянства оптимального управления, заданных на временном отрезке $\varphi^0 = \sum_{i=1}^{n} \widetilde{\Delta}_i$, и априори неизвестные значения $w_{\max}, u(0)$ и $u'(0)$.

В этом случае температурное поле также определяется соответствующим вектором параметров Δ на замкнутом ограниченном множестве $G_{n+2} : \Delta \in G_{n+2}$ и может быть представлено как реакция на сумму составляющих искомого управления (14) [10,11] на каждом i-ом интервале, $i = \overline{1,n}$

$$(13)\quad \theta(x^*, \varphi, \Delta) = \begin{cases} \Phi(x^*, \varphi, u(0)u'(0)) + \Lambda(x^*, \varphi, w_{\max})), \ n = 1; \\ \Phi(x^*, \varphi, u(0)u'(0)) + \Lambda(x^*, \varphi, w_{\max}) + \overline{\Lambda}(x^*, \varphi, w_{\max}, \widetilde{\Delta}), \ n \geq 2. \end{cases}$$

Здесь $\Phi(x^*, \varphi, u(0)u'(0))$ - решение краевой задачи (1)-(3) при управляющем воздействии $u(\varphi) = u(0) + u'(0)\varphi$, а $\Lambda(x^*, \varphi, w_{\max})$ - решение той же краевой задачи для $u(\varphi) = \frac{w_{\max}}{2}\varphi^2$.

Слагаемое $\overline{\Lambda}(x^*, \varphi, w_{\max}, \widetilde{\Delta})$ представляет собой реакцию температурного поля при $n \geq 2$ в точке x^* на управление

$$(14)\quad \bar{u}(\varphi) = w_{\max} \sum_{k=2}^{j} (-1)^{k+1} \cdot \left(\varphi - \sum_{i=1}^{k-1} \widetilde{\Delta}_i \right)^2, \ при \sum_{i=1}^{j-1} \widetilde{\Delta}_i \leq \varphi \leq \sum_{i=1}^{j} \widetilde{\Delta}_i, \ j = \overline{2,n}, \ n \geq 2$$

На основе полученного описания (13) - (15) осуществляется точная редукция некорректной постановки исходной ОЗТ (1)-(3) к специальной негладкой задаче математического программирования относительно вектора параметров Δ, принадлежащего замкнутому ограниченному множеству G_{n+2}:

$$(15)\quad I_0(\Delta) = \max_{\varphi \in [0, \varphi^0]} \left| \theta(x^*, \varphi, \Delta) - \theta^*(\varphi) \right| \to \min_{\Delta \in G_{n+2}}.$$

3 Решение задачи с помощью специального метода оптимизации

Решение $\Delta = \Delta^0$ задачи (17) определяет погрешность аппроксимации температурного поля $\theta(x^*, \varphi, \Delta^0) - \theta^*(\varphi)$, обладающую свойствами чебышевского альтернанса [9]. В соответствии с ними, на временном интервале $\varphi \in [0, \varphi^0]$ в точках $\varphi_q^0, q = \overline{1,R}$, число которых $R = (n+2)+1$ на единицу превышает число искомых параметров, достигаются знакочередующиеся максимальные по абсолютной величине отклонения, равные $\pm I_0(\Delta^0)$.

На основании данного свойства возможно составить замкнутую систему $n+3$ соотношений для предельных разностей температур в этих точках относительно всех неизвестных, в роли которых выступают компоненты вектора параметров Δ^0 и значение минимакса $I_0(\Delta^0)$ [9]. Система уравнений дополняется условиями существования экстремума $\frac{\partial}{\partial \varphi}\left[\theta(x^*, \varphi, \Delta) - \theta^*(\varphi)\right]$ во внутренних точках интервала $\varphi \in [0, \varphi^0]$, и может быть записана в общем виде

$$(16)\quad \theta(x^*, \varphi_q^0, \Delta^0) - \theta^*(\varphi_q^0) = (-1)^{q+1} \cdot \beta \cdot I_0(\Delta^0), \ q = \overline{1, n+3}; \ \beta = \{1 \wedge -1\}$$

(17) $$\frac{\partial}{\partial\varphi}\left[\theta(x^*,\varphi_q^0,\Delta)-\theta^*(\varphi_q^0)\right]=0,$$

$q=\overline{1,n+2}$ или $q=\overline{2,n+2}$ или $q=\overline{1,n+3}$ или $q=\overline{2,n+3}.$

Решение системы (18), (19) уравнений с помощью стандартных численных методов позволяет получить значения вектора параметров Δ^0. Задание числа $n=1,2,...n_0$, определяет конечномерный вектор параметров $\Delta^0(n)\in G_{n+2}$, значения которого находятся решением системы (18), (19).

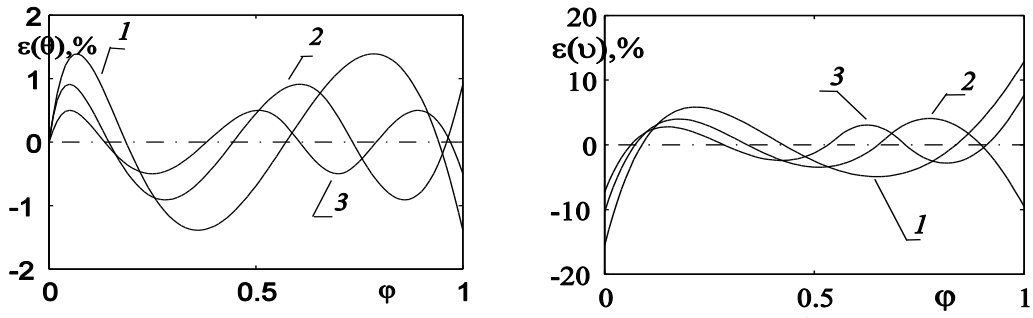
В результате с помощью найденных значений параметров Δ^0 на основе кусочно-параболической аппроксимации (14) можно восстановить искомую функцию $u(\varphi)$ на заданном интервале $\varphi\in[0,\varphi^0]$ с требуемой точностью, при этом значения функционала (17) будут образовывать сходящийся ряд [9].

На основе предложенного метода были решены задачи идентификации сосредоточенного граничного управляющего воздействия $\theta_c(\varphi)$ в граничной ОЗТ при $F(x,\varphi)=0$ и сосредоточенной величины мощности теплоисточников $\upsilon(\varphi)$ в задаче с внутренним тепловыделением для $n=1,2,3$ при характерных тепловым процессам законах изменения внешних и внутренних воздействий.

Численным решением системы уравнений (18), (19) подтверждено, что в найденном оптимальном управлении $w^{**}(\varphi)$ присутствуют участки, на которых фазовое ограничение (12) выполняется в виде строгого неравенства, и интервалы, где ограничение (12) достигается при полном совпадении заданного $\theta^*(\varphi)$ и расчетного $\theta(x^*,\varphi)$ распределений.

Точное равенство в (12) выполняется только в отдельных точках φ_q^0 альтернанса на рассматриваемом временном интервале $[0,\varphi^0]\ni\varphi$, т.о. подтверждено, что найденное без учета ограничений управление $w^{**}(\varphi)$ точно совпадает с искомым $w^*(\varphi)$.

Представленный рисунок 1 иллюстрирует некоторые полученные результаты для $n=\overline{1,3}$ в задаче идентификации внутреннего сосредоточенного управления $\upsilon(\varphi)$.



а б

Рисунок 1

Погрешность аппроксимации температурного поля $\varepsilon(\theta)=\theta(x^*,\varphi,\Delta^0)-\theta^*(\varphi)$ (*а*) и управляющего воздействия $\varepsilon(v)=v^*(\varphi)-v_0(\varphi)$ (*б*) (1 - $n=1$; 2 - $n=2$; 3 - $n=3$)

В рассматриваемых задачах ошибка равномерного приближения расчетного температурного поля $\theta(x^*,\varphi)$ к заданному $\theta^*(\varphi)$ лежит в диапазоне 2 – 0.5 % для $n=1-3$. Погрешность аппроксимации управляющего воздействия составляет 15-8 % для $n=1-3$, достигается, как правило, на границах временного интервала $[0,\varphi^0]$ и, при необходимости, может быть уменьшена сдвигом начального или конечного моментов времени.

Заключение

Предложенный подход показывает возможности аналитического исследования процессов теплообмена, основанного на приведении исходной некорректной задачи теплопроводности к условно-корректной постановке путем ограничений на производные управляющих воздействий, и последующего решения полученной задачи математического программирования с помощью специальных методов оптимизации.

Благодарности

Работа выполнена в соответствии с грантом РФФИ 14-08-00446 «Моделирование и управление объектами с распределенными параметрами с применением нечеткой логики» .

Список литературы

[1] Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1988.
[2] Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности. В 2-х томах. Киев: Наукова Думка, 2002.
[3] Иванов В.К., Васин В.В., Танана В.П. Теория линейных некорректных задач и ее приложения. М.: Наука, 1978.
[4] Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.
[5] Коздоба Л.А., Круковский П.Г. Методы решения обратных задач теплопроводности. Киев: Наукова Думка, 1982.
[6] Тихонов А.Н. О решении некорректно поставленных задач и методе регуляризации // ДАН СССР. 1963. Т. 151. №3. С. 501 - 504.
[7] Мацевитый Ю.М. О регуляризации загрублением и повышении ее точности при решении обратных задач теплопроводности // Инж.-физ. журн. 1987. Т. 53, №3. С. 486-488.
[8] Плешивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я. Метод последовательной параметризации управляющих воздействий в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами. // Известия РАН. Теория и системы управления. 2009. № 3. С. 22-33.
[9] Рапопорт Э.Я. Плешивцева Ю.Э. Специальные методы оптимизации в обратных задачах теплопроводности. // Известия РАН. Энергетика. 2002. № 5. С. 144-155.
[10] Rapoport E., Pleshivtseva Yu. Optimal Control of Induction Heating Processes. – CRC Press/Taylor & Francis Group, London, New York, 2007
[11] Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2003.
[12] Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления. М.: Наука, 1986.

ОБ УНИВЕРСАЛЬНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО ОПТИМИЗАТОРА ДЛЯ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ПРИ УПРАВЛЕНИИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Ю.И. Еременко, Д.А. Полещенко, А.И. Глущенко

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал)
ФГАОУ ВПО Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС"
309516, Старый Оскол, м-н. Макаренко, 42, Россия
451222@sf-misis.ru
тел: +7 (4725) 45-12-22, факс: +7 (4725) 32-43-61

Ключевые слова: *адаптивное управление, нейронная сеть, ПИД-регулятор, нейросетевой оптимизатор, метод обратного распространения ошибки, нелинейный объекты управления*

Abstract

Adaptive control system with neural tuner is implemented in Matlab software. Neural tuner is based on neural networks and used for PID-regulator coefficients online tuning. The backpropagation training method is used. It is modified by adding a rule base, containing conditions on choosing learning rate. Two aperiodic links with time delay are used as a plant, which parameters are changed during modeling process in order to implement the nonlinearity. System with neural tuner and conventional PID-regulator are used as regulators during modeling of such plant output signal control process. Such experiments are made for different plant parameters. It is shown that the system with neural tuner allowed to achieve 10% decreasing of the amount of time, needed to complete the setpoint schedule and 9% of energy-savings.

Введение

На сегодняшний день весьма актуальна проблема совершенствования систем управления технологическими процессами, поскольку большинство реальных объектов управления (ОУ) обладают нелинейными характеристиками, в то время как управление ими ведется, в большинстве случаев, с помощью линейных ПИД- и ПИ-регуляторов. Подобное несоответствие зачастую приводит к снижению качества регулирования и к росту энергозатрат на ведение технологических процессов, поскольку конкретные значения коэффициентов подобных линейных регуляторов позволяют оптимально вести технологический процесс только для конкретного состояния объекта. Однако при его переходе в другие состояния (например, смена задания по температуре, загрузка печи, изменение давления подачи газа или жидкости) данные значения коэффициентов уже не позволяют получать требуемых по качеству переходных процессов. Подобная проблема особенно актуальна для отраслей, в которых широко используются различные нагревательных объекты - печи нагрева литой заготовки, дуговые печи и пр. - для которых принудительное охлаждение невозможно, ввиду чего наличие даже небольшого перерегулирования требует длительного времени на охлаждение [1].

Фактически, для каждого состояния ОУ необходимо подбирать свои значения коэффициентов регулятора. Однако, в реалиях производства чаще всего используют один набор коэффициентов для всех режимов и не производят их перенастройку ввиду трудоемкости задачи.

Одним из возможных решений данной проблемы является построение адаптивных систем управления технологическими процессами [2], автоматически подбирающих коэффициенты ПИД-регулятора. Всю совокупность методов построения таких систем можно разбить на две группы. Первая группа - это классические методы, такие как метод Циглера-Никольса [3], частотный метод А.Г. Александрова [4], метод, заложенный в основу работы адаптивных ПИД-

регуляторов фирмы Siemens [1]. Большинство таких методов основано на идентификации ОУ с помощью тестовых сигналов. При этом идентификация объекта даже из сходных начальных условий может давать существенно отличающиеся результаты.

Вторая группа - это методы, основанные на методологии искусственного интеллекта, например, подходы, предложенные в [5-8]. В частности, С. Омату предложил использовать нейронные сети (НС) для автонастройки коэффициентов ПИД-регулятора [9]. Такая схема позволяет учитывать нелинейные свойства объекта, не внося значительных изменений в существующую схему управления, что снижает стоимость и упрощает внедрение такой интеллектуальной надстройки. Однако, идеи С. Омату в виде, в котором они были изложены в его трудах, имеют слишком общий характер. Их применение для конкретных реализация требует дополнительных исследований.

В представляемой работе в качестве предмета исследований была выбрана схема управления, указанная выше. В ряде работ, в частности [10], авторами были проведены исследования и получены положительные результаты при управлении объектами с постоянных времени порядка 10^3 с (как на моделях, так и на лабораторных нагревательных ОУ). В настоящей работе, кроме указанных опытов, для расширения применимости предложенного оптимизатора проведено моделирование процесса управления ОУ с постоянными времени порядка 10^1 с.

1 Реализация схемы управления с нейросетевым оптимизатором

В пакете Matlab была реализована схема управления моделью нагревательной печи (рисунок 1). Контур управления представлен блоком Subsystem с ПИД-регулятором с нейронадстройкой (S-function2 neuc_PID1). Ui, Up, Ud, Upid – сигналы управления на выходе i-, p-, d-каналов и всего ПИД-регулятора соответственно, error – текущее рассогласование. Блок Sat использован для ограничения получаемого с ПИД-регулятора сигнала управления до диапазона [0;100]. U – управляющее воздействие, подаваемое на ОУ.

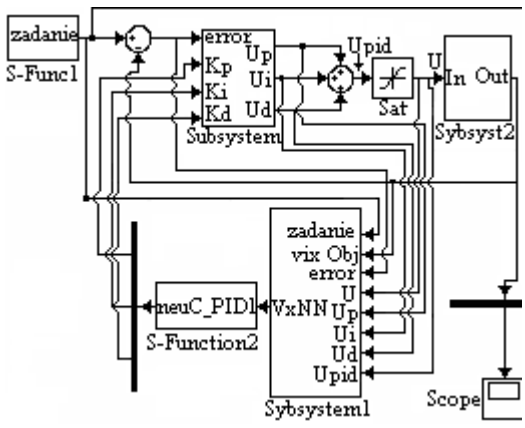


Рисунок 1 – Реализация в Matlab схемы нейросетевого управления с самонастройкой

Для моделирования в качестве ОУ (блок Subsyst2) использовалась модель, представленная в виде двух апериодических звеньев первого порядка и звена запаздывания (1). K - коэффициент усиления ОУ, T_1 - постоянная времени ОУ, T_2 - постоянная времени датчика, τ - время запаздывания. Данная структура выбрана ввиду того, что, используя ее, возможно описать с заданной точностью большое число технологических объектов и процессов.

$$W(s) = \frac{K}{T_1 s + 1} \cdot \frac{1}{T_2 s + 1} \cdot e^{-\tau \cdot s} \quad (1)$$

Для изменения состояния объекта непосредственно в процессе моделирования в установленные моменты времени производилось изменение коэффициентов для модели ОУ, описанной выражением (1). В частности, для каждого опыта было использовано по два набора параметров модели, между которыми осуществлялось подобное переключение: первое состояние→второе состояние→вновь первое состояние. Задачей оптимизатора было сначала подобрать новые коэффициенты для измененного состояния объекта, а затем вернуть исходные параметры при возврате к исходному состоянию ОУ.

Для опытов, моделирующих процесс управления с постоянной времени порядка 103 с, была выбрана модель муфельной электронагревательной печи, работающей в двух режимах: пустая печь (К=21, Т1=1636 с, Т2=69.4 с, τ=64 с) и печь, загруженная литой заготовкой, занимающей порядка 30% внутреннего пространства печи (К=21, Т1=2683.2 с, Т2=35.37 с, τ=90 с). Обе модели получены путем идентификации лабораторной нагревательной печи СНОЛ-1,6.2,5.1/11-И4. Был выбран следующий график изменения заданий: 5900С→6400С→5050С→5900С и т.д., представляющий собой масштабированный в отношении 1:2 график заданий для печи нагрева литых заготовок перед их дальнейшей обработкой на металлургических предприятиях. Для смены уставки температура должна удерживаться в 5% окрестности значения разности текущего задания и предшествующего в течение 30 минут. Для модели пустой печи были подобраны коэффициенты ПИД-регулятора. Для перехода 5050С→5900С: KP=0.24, KI=1.5*10-4, KD=0.

Для опытов, моделирующих процесс управления с постоянной времени порядка 101 с, была выбрана модель процесса производства раствора серной кислоты. Задачей является стабилизация процентного содержания серной кислоты в смесительном резервуаре на заданном уровне путем изменения расхода воды для перемешивания. В результате идентификации процесса, протекающего в смесителе объемом 24 м3, получены следующие значения параметров модели ОУ: К=1,25, Т1=41 с, Т2=0.5 с, τ=1 с. В процессе работы ОУ перепады давления в трубах подачи воды и кислоты сказываются на динамике перемешивания, что отражается на постоянной времени процесса Т1. При оценке параметров ОУ при перепаде давления в 30% получены следующие значения: К=1,25, Т1=60 с, Т2=0.5 с, τ=1 с. Для данного ОУ был выбран следующий график изменения заданий: 50%→70%→90%→50% и т.д. Для смены уставки концентрация должна удерживаться в 5% окрестности значения разности текущего задания и предшествующего в течение 5 минут. Для модели ОУ при номинальном давлении воды подобраны коэффициенты ПИД-регулятора. Для перехода 50%→70%: KP=1, KI=4*10-2, KD=0.

2 Описание структуры нейросетевого оптимизатора

При работе с ОУ, указанными выше, необходимо вести управление двумя различными по своей природе процессами. Например, для печи - это нагревание и охлаждение. Нагревательная печь неспособна вести принудительное охлаждение своего внутреннего пространства, поэтому довольно часто для оптимальности ведения и того, и другого процесса требуется два набора коэффициентов регулятора, а не один. Например, значение коэффициента K_I может быть оптимальным для процесса нагревания, а при охлаждении из-за медленной скорости процесса такое значение K_I может привести к снижению качественных показателей переходной характеристики из-за насыщения *i*-канала.

В связи с этим, предложено реализовывать нейросетевой оптимизатор в виде двух идентичных нейронных сетей, каждая из которых отвечает за управление коэффициентами регулятора для своего типа процесса: нагрева и остывания для первого опыта, увеличения и уменьшения концентрации кислоты в растворе для второго опыта. До начала каждого из экспериментов создавались две необученные НС. Они имели одинаковую трехслойную структуру. Количество и вид входов НС были определены экспериментальным путем. Во входном слое расположено 5 нейронов: текущее задание по температуре; задержанный на X секунд, на Y секунд и на Z секунд сигнал по выходу ОУ; задержанный на 1 секунду сигнал управления после ограничителя. В выходном слое – три нейрона (отвечают за коэффициенты ПИД-регулятора K_P, K_I, K_D). Экспериментально было установлено, что в данном случае 15 нейронов в скрытом слое является оптимальным числом. В скрытом слое была использована функция активации гиперболический тангенс, в выходном слое – линейная функция. Задержки по входным сигналам для первого опыта: X=1 с, Y=20 с, Z=40 с. Для второго опыта: X=1 с, Y=2 с, Z=3 с.

Переключение между нейронными сетями производилось в момент очередной смены задания. При этом определялся тип переходного процесса (например, нагрев или охлаждение) и производился выбор соответствующей сети. Обе сети начинали работу с формирования на своем выходе одинаковых коэффициентов регулятора, подобранных для начального состояния ОУ: первый опыт - K_P=0.2422, K_I=1.5*10^{-4}, K_D=0, второй опыт - K_P=1, K_I=4*10^{-2}, K_D=0. Этого удалось добиться благодаря модификациям, указанным в разделе 3.

Нейронадстройка над ПИД-регулятором была реализована при помощи средств пакета Matlab – это S-функция neuC_PID1 (см. рисунок 2). Внутри функции реализован алгоритм оперативного обучения, которым пользуются обе описанных НС - это модифицированный алгоритм обратного распространения ошибки. Рассмотрим предложенные модификации.

1 Модификации, внесенные в алгоритм обучения нейросетевого оптимизатора

Основные дополнения, внесенные в схему С.Омату: 1) предложен метод формирования начального состояния нейронных сетей нейросетевого оптимизатора; 2) внесены ограничения, накладываемые на выходы НС; 3) разработаны правила изменения скорости обучения НС; 4) разработаны правила обучения выхода НС, формирующего p-канал; 5) определено количество эпох обучения НС на каждом такте работы схемы, 6) разработаны правила обучения выхода НС, формирующего i-канал. Часть данных модификаций подробно описаны в [10]. Рассмотрим детально лишь первый и последний пункты.

1.1 Формирование начального состояния работы НС

В [9] предлагается первоначально автономно обучать НС на данных об ОУ. Однако в реальных условиях производства в большинстве случаев известен лишь набор коэффициентов K_P, K_I, K_D, записанных в ПИД-регуляторе. Для автономного обучения этих данных недостаточно. Как показали опыты, использование необученной сети в режиме оперативного обучения также не дает требуемых результатов, поскольку в этом случае система довольно часто не сходится к заданию. Это связано с тем, что в начальный момент времени, в большинстве случаев, значения выходов НС оказываются слишком неадекватны для данной системы (особенно для интегрального канала). Поэтому необходимо задавать «начальную точку» для работы НС.

Эта проблема решалась следующим образом: весовые коэффициенты выходного слоя НС задавались таким образом, чтобы в момент запуска системы выход НС совпал с известными коэффициентами ПИД-регулятора. Применение линейных функций активации на выходном слое позволило добиться этого путем решения системы линейных уравнений (2), где неизвестными выступали весовые коэффициенты выходного слоя. Смещения выходного слоя приравнивались к нулю.

Для того, чтобы построить подобную систему уравнений первые 15 секунд нейросетевой оптимизатор вычислял значения выхода с нейронов скрытого слоя сети *HO* [1x15]. Эти вектора формировали матрицу *HOm* [15x15]. Она использовалась как известные значения в уравнениях, как и значения коэффициентов регулятора (приведено для модели печи) *Kp_m* [15x1] = {0.24, 0.24, ..., 0.24}, *Ki_m* [15x1] = {1.5*10^{-4}, 1.5*10^{-4}, ..., 1.5*10^{-4}}, *Kd_m* [15x1] = {0, 0, ..., 0}.

$$(2)\quad \begin{cases} HOm \cdot W^{(2)}(:,1) = Kp_m \\ HOm \cdot W^{(2)}(:,2) = Ki_m \\ HOm \cdot W^{(2)}(:,3) = Kd_m \end{cases},$$

где $W^{(2)}(:,i)$ - это i-й столбец матрицы весовых коэффициентов между скрытым и выходным слоем. Размер матрицы $W^{(2)}$ составлял [15x3].

Подобные действия позволили в момент передачи управления коэффициентами K_P, K_I, K_D НС получать на ее выходе не случайную величину, а значения коэффициентов, которые до этого использовались для управления объектом. Затем включалось оперативное обучение НС.

1.2 Модификация управления *i*-каналом

Авторами было установлено, что применение одинаковой скорости обучения для всех нейронов всех слоев неэффективно. Поэтому было предложено использовать для весовых коэффициентов выходного слоя различные скорости обучения. В скрытом же слое было предложено изменять скорость обучения пропорционально от текущего уровня рассогласования. Экспериментально было установлено, что для нейронов, формирующих первый выход (K_P), требуется скорость $\eta_1=10^{-5}$; второй выход (K_I) – $\eta_2=10^{-10}$; третий выход (K_D) – $\eta_3=0$. Для влияния на качество переходного процесса за счет варьирования скоростью прироста интегральной составляющей регулятора в алгоритм управления был внесен ряд условий. Причем при очередной смене задания определялось, находится ли система в устойчивом состоянии. Устойчивость в данном случае понималась как устойчивость конкретного переходного процесса с точки зрения соответствия критериям Anderson и Nesler [8]. Если система стабильна, то текущее задание и сигнал управления сохранялись в специальный массив. Такие воздействия принимались как эталонные для соответствующих заданий.

В течение любого переходного процесса при первом пересечении задания фиксировалось значение сигнала управления в *i*-канале. Если это значение меньше эталонного, то принималось решение об увеличении K_I, а если больше – то об уменьшении.

Ускорение обучения нейрона, формирующего K_I, в сторону увеличения начиналось при соблюдении следующих условий: переходный процесс уже достиг своего первого максимума после пересечения задания, скорость изменения температуры за последние 2 такта работы схемы менее 0.5 градуса, а текущее рассогласование больше 3% от разницы между текущим заданием и предыдущим. Ускорение обучения этого нейрона в сторону уменьшения начиналось при соблюдении следующих условий: скорость изменения температуры за последние 2 такта работы схемы более 0.5 градуса, а текущее рассогласование больше 3% от разницы между текущим заданием и предыдущим. Скорость обучения при этом возрастала в 100 раз.

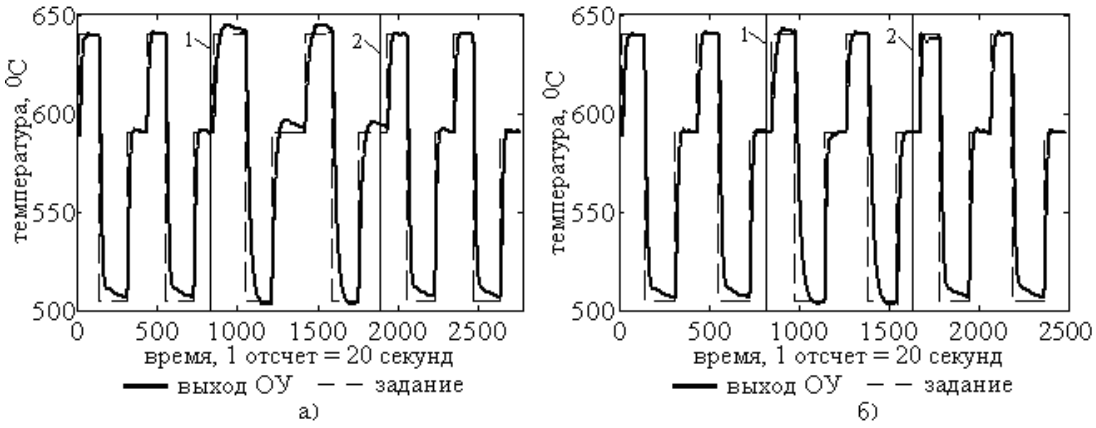
2 Результаты экспериментов

В рамках исследования были проведены две пары экспериментов (каждая пара - для одного из ОУ - печь и смеситель). Каждая пара состояла из двух одинаковых по условиям экспериментов для двух систем управления - для системы с нейросетевым оптимизатором параметров ПИ-регулятора (поскольку K_D был принят равным нулю) и для обычного ПИ-регулятора.

Эксперимент заключался в том, что исследовалась работа схемы в следующих условиях: с начального момента и до момента, когда задание было изменено 6 раз, в качестве ОУ использована модель пустой печи СНОЛ (во втором опыте - модель смесителя при номинальном давлении), далее в течение еще 6 смен задания - модель печи СНОЛ, загруженной болванкой (2-й опыт - модель смесителя при измененном давлении), а затем для проведения еще 6 переходных процессов объекту возвращались начальные параметры. Каждый переходный процесс считался завершенным, если после входа в 5% окрестность разности текущего задания и предыдущего проходило 30 минут (2-й опыт - 5 минут). Затем происходила смена задания. Для этого был использован счетчик времени. Если выходной сигнал ОУ выходил за пределы окрестности, то счетчик времени обнулялся. Нейросетевой оптимизатор всегда начинал эксперимент с известными значениями коэффициентов ПИД-регулятора, указанными ранее как оптимальные для начального состояния ОУ. Обычный ПИД-регулятор всегда использовал только их.

Результаты экспериментов, полученные с использованием нейросетевого оптимизатора параметров ПИД-регулятора и обычного ПИД-регулятора, для модели нагревательной печи приведены на рисунке 2. До момента "загрузки" печи болванкой обе системы ведут себя практически одинаково. В период использования модели загруженной печи система с нейросетевым оптимизатором практически с первого переходного процесса позволила добиться менее

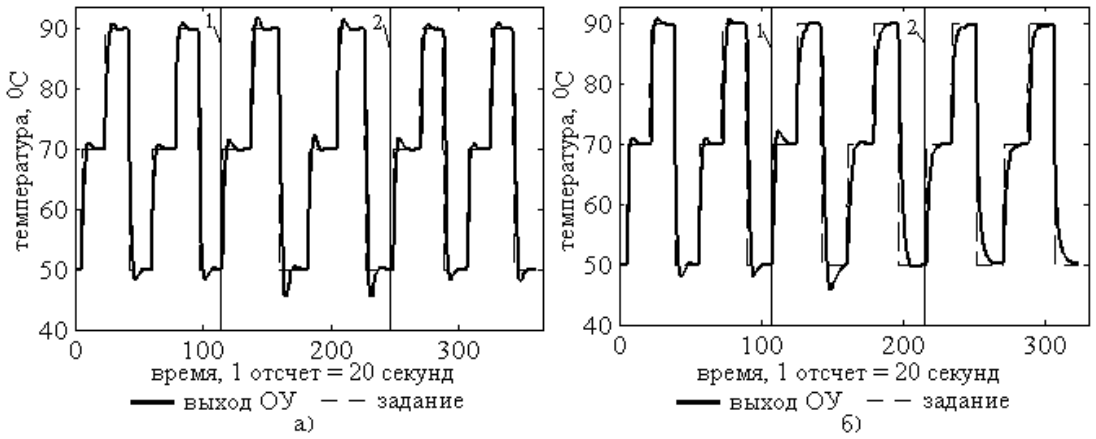
чем 1% перерегулирования при процессах нагрева и 2% - при охлаждениях, в то время как для обычного ПИД-регулятора для процессов нагрева этот показатель составил 7,5%. После возвращения к модели пустой печи ПИД-регулятор с первого переходного процесса начинает работать как до загрузки печи. Системе с нейросетевым оптимизатором требуется некоторое время, чтобы вернуть параметры регулятора к исходным (см. первый после разгрузки переходный процесс). Затем системы начинают работать практически идентично. Общее время опыта для системы с нейросетевым оптимизатором составило 13,8 часа, а суммарный сигнал управления - 1483580 единиц. Для обычного ПИД-регулятора - 15,3 часа и 1632468 единиц соответственно. Таким образом, экономия по времени на выполнение графика задания при использовании нейросетевого оптимизатора составила 9,9%, а энергоносителя - 9,2%.



1 - момент начала использования модели загруженной печи,
2 - возврат к модели разгруженной печи.

Рисунок 2 – Результаты моделирования для модели нагревательной печи
(а - система управления с обычным ПИД-регуляторром, б - с нейросетевым оптимизатором)

Результаты экспериментов, полученные с использованием нейросетевого оптимизатора и обычного ПИД-регулятора, для смесителя приведены на рисунке 3.



1 - момент изменения давления в трубе подачи воды,
2 - возврат к первоначальной модели.

Рисунок 3 – Результаты моделирования для модели смесителя
(а - система управления с обычным ПИД-регуляторром, б - с нейросетевым оптимизатором)

До момента изменения давления в трубе подачи воды и кислоты обе системы ведут себя практически одинаково. В период использования модели с измененным давлением система с нейросетевым оптимизатором практически с первого переходного процесса позволила добиться менее чем 1% перерегулирования, в то время как для обычного ПИД-регулятора этот показатель составил от 10% до 12,5%. После возвращения к исходной модели смесителя системе с нейросетевым оптимизатором практически с первого переходного процесса удалось подобрать коэффициенты регулятора, которые позволили ей работать с перерегулированием 0%. Общее время опыта для системы с нейросетевым оптимизатором составило 1,8 часа, а суммарный сигнал управления - 391900 единиц. Для обычного ПИД-регулятора - 2,03 часа и 431560 единиц соответственно. Таким образом, экономия по времени на выполнение графика задания при использовании нейросетевого оптимизатора составила 11,3%, а энергоносителя - 9,2%.

Заключение

Таким образом, нейросетевой оптимизатор позволил учитывать нелинейные характеристики ОУ, описываемых выражением (1), как с большой, так и с малой инерционностью, сохраняя при этом качество переходных процессов на требуемом уровне для различных режимов работы. Кроме того, использование оптимизатора позволило в обоих случаях сократить время на выполнение графика задания в среднем на 10% и суммарный расход энергоносителя в среднем на 9%, что в реалиях производства позволит принести существенный экономический эффект. Полученные в настоящем исследовании результаты позволяют сделать вывод, что предложенный подход к построению нейросетевого оптимизатора может быть применен к ОУ как с постоянными времени 10^3 с, так и со значительно меньшими значениями постоянной времени.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Гранты №12-07-00252-а и 13-08-00532-а.

Список литературы

[1] Pfeiffer B.-M. Towards "plug and control": self-tuning temperature controller for PLC. International journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2000. №14. Pp.519-532.
[2] Astrom K. J., Hagglund T., Hang C. C. and Ho W. K. Automatic tuning and adaptation for PID controllers. A survey. IFAC J. Control Eng. 1993. Practice 1. Pp.699–714.
[3] Ziegler J., Nichols N. Optimum settings for automatic controllers. Trans. ASME. 1942. №65. Pp. 759–768.
[4] Alexandrov A.G., Palenov M.V Self-tuning PID-I controller. Preprints of the 18th IFAC World Congress. Milano, Italy. 28 Aug. 2 Sept. 2011. PP. 3635-3640.
[5] Chen J., Huang T. Applying neural networks to on-line updated PID controllers for nonlinear process control. Journal of Process Control. 2004. No.14. P.211-230.
[6] Reyes J., Astorga C., Adam M., Guerrero G. Bounded neuro-control position regulation for a geared DC motor. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2010. No.23. P.1398–1407.
[7] Tan, Shaohua, Chang-Chieh Hang, and Joo-Siong Chai. "Gain scheduling: from conventional to neuro-fuzzy." Automatica 33.3 (1997): 411-419.
[8] Zhao, Zhen-Yu, Masayoshi Tomizuka, and Satoru Isaka. "Fuzzy gain scheduling of PID controllers." Control Applications, 1992., First IEEE Conference on. IEEE, 1992.
[9] Omatu S., Khalid M., Yusof R. Neuro-Control and its Applications. - London: Springer, 1995.
[10] Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И. Об условиях применения ПИД-нейрорегулятора для управления объектами, описываемыми апериодическим звеном второго порядка с запаздыванием // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2013. - №6. – С.39-45.

О НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ПРИ РАЗНОТИПНОЙ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Н.В. Коплярова, А.В. Медведев

Сибирский Федеральный университет
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79
тел: +7 (913) 170-56-62

Ключевые слова: *непараметрическая оценка, нелинейная динамика, модель Гаммерштейна, априорная информация, дискретно-непрерывный процесс, непараметрическая идентификация*

Abstract

The problem of nonlinear dynamical systems identification of Hammerstain type is considered. The linear dynamical part of the system is in nonparametric uncertainty conditions. The common type of nonlinearity is assumed to be known with set of parameters. Presented algorithm allows to create the adequate in the sense of mean-square criterion models**.**

Введение

Проблема идентификации нелинейных динамических систем относится к разряду важнейших задач теории автоматического управления. В связи с большим разнообразием систем рассматриваемого типа, не существует универсальной методики их идентификации. При этом в основном задача рассматривается «в узком смысле», когда структура исследуемого объекта известна с точностью до вектора параметров. Настоящая статья посвящена идентификации динамических систем «в широком смысле», когда информация об объекте находится на уровне непараметрической неопределенности. В данном случае на основании имеющейся априорной информации удается лишь частично параметризовать модель исследуемого процесса. Большое число нелинейных систем можно представить в виде блока с последовательным включением нелинейного элемента и линейной части. В данной работе исследуются динамические процессы типа Гаммерштейна.

Пусть имеется нелинейный объект, который может быть описан как последовательное сочетание линейного динамического и нелинейного статического блоков. Преимуществом использования таких моделей является их относительная простота поскольку в них нелинейные и динамические свойства исследуемого объекта разделены на отдельные части. Линейный динамический блок моделей в этом случае должен воспроизводить динамические свойства исследуемого объекта, нелинейный блок - имитировать его нелинейные свойства [1]. Основная сложность в построении моделей таких объектов заключается в том, что промежуточные сигналы (значения выхода блока, находящегося первым в последовательности) являются недоступными для измерения. Требуется по наблюдаемым «входным – выходным» переменным процесса построить математическую модель стохастического объекта, с помощью которой можно получать прогноз его поведения в различных условиях (при произвольном входном воздействии и наличии помех), который будет достаточно удовлетворительным с практической точки зрения.

1 Постановка задачи идентификации

В общем виде задача идентификации нелинейной динамической системы может быть описана схемой, представленной на рисунке 1:

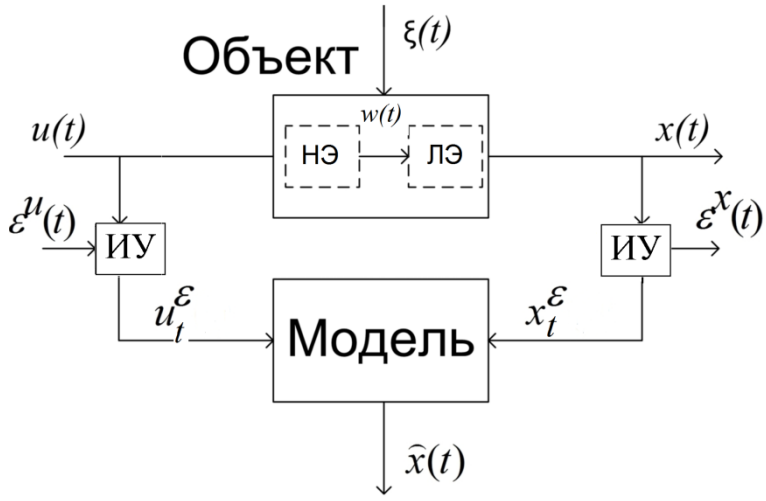


Рисунок 1 – Общая схема задачи идентификации

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: Объект – нелинейная динамическая система, состоящая из ЛЭ – линейной динамической и НЭ – нелинейной статической частей, ИУ – измерительное устройство, *u(t)* - входная переменная объекта, *x(t)* - выходная переменная, $u_t^{\varepsilon}, x_t^{\varepsilon}$ - соответствующие наблюдения переменных процесса в дискретный момент времени, которые из соображения простоты далее будем обозначать $\{u_i, x_i,\ t=1,s\}$, $\xi(t)$ - ненаблюдаемое случайное воздействие, $\varepsilon^u(t), \varepsilon^x(t)$ - случайные факторы (помехи), действующие в каналах измерения переменных в дискретные моменты времени t, такие что $M\{\varepsilon\}=0,\quad D\{\varepsilon\}<\infty$, $\hat{x}(t)$ - выход модели объекта, *w(t)* - выходная переменная нелинейного элемента системы.

Исходные данные о состоянии исследуемого объекта составляют выборку измерений реакции объекта на входное воздействие *u(t)*: $\{u_i, x_i, i=\overline{1,s}\}$. Параметры и порядок дифференциального уравнения, которым может быть описана линейная динамическая часть системы, неизвестны. Пусть нелинейность в объекте описывается некоторой функцией, вид которой предполагается известным с точностью до набора параметров.

Исследователь имеет возможность проведения эксперимента, то есть может подавать на вход исследуемого объекта некоторые воздействия и измерять его реакцию на них. Требуется на основании наблюдений «входа-выхода» построить модель данной системы, адекватно описывающую ее поведение в различных условиях. Задача идентификации нелинейной системы в описанной постановке может быть разделена на два этапа. На первом этапе предлагается оценить параметры нелинейного звена и переходной характеристики линейного динамического элемента, а на втором – построить требуемую математическую модель исследуемого объекта. Сначала рассмотрим задачу идентификации линейного элемента.

2 Идентификация линейной динамической системы

Непараметрическая модель линейного динамического объекта строится на основании переходных характеристик. На вход объекта подается функция Хевисайда u(t)=1(t), а на выходе наблюдаем его переходную функцию x(t) = h(t). По наблюдениям $\{u_i, x_i, i=1,s\}$ требуется построить непараметрическую модель линейной динамической системы, порядок которой неизвестен. Непараметрическая модель линейной динамической системы (ЛДС) конструируется на основе оценки интеграла Дюамеля. В этом случае зависимость реакции динамической систе-

мы *w(t)* на входное воздействие *u(t)* при нулевых начальных условиях описывается интегралом свертки [2]:

$$(1)\quad w(t) = \int_0^t h'(t-\tau)u(\tau)d\tau = \int_0^t k(t-\tau)u(\tau)d\tau,$$

где *h(t)*-переходная характеристика системы, k*(t)*-весовая (импульсная переходная) функция этой же системы, τ - переменная интегрирования.

Вычисление значения выхода объекта $w(t)$ при этом возможно, если известна его весовая функция *k(t)*. Однако в реальных системах «снятие» весовой функции объекта представляется невозможным, в связи с чем требуется специальный прием, изложенный ниже. Основная идея идентификации ЛДС в условиях непараметрической неопределенности[1] состоит в непараметрическом оценивании весовой функции системы. Подав на вход системы воздействие в виде функции Хевисайда, получим значения ее переходной функции в дискретные моменты времени t_i, i =1,s. Тогда оценку переходной функцию системы можно записать в виде стохастической аппроксимации регрессии непараметрического типа следующим образом[1]:

$$(2)\quad h_s(t) = \frac{1}{sc_s}\cdot\sum_{i=1}^{s} h_i H\left(\frac{t-t_i}{c_s}\right),$$

где $\{ h_i = x_i / u(t)=1,\ i=1,s\}$ - экспериментально полученные значения переходной характеристики ЛДС, то есть сигнал, получаемый на выходе системы при подаче на ее вход единичного ступенчатого воздействия *u(t)*=1(*t*) при нулевых начальных условиях. При этом в выражении (2) колоколообразная функция $H(\cdot)$ и параметр размытости c_s должны удовлетворять следующим условиям сходимости[5]:

$$(3)\quad c_s > 0;\ \lim_{s\to\infty} c_s = 0;\ \lim_{s\to\infty} sc_s = \infty,$$

$$(4)\quad \int_{\Omega(u)} H'(u)du = 0 \qquad c_s \int_{\Omega(u)} H'(u)udu = -1$$

$$\lim_{s\to\infty} c_s^{-1} H\left(\frac{\tau-t}{c_s}\right) = \delta(\tau-t), u = \frac{\tau-t}{c_s}.$$

Известно, что весовая функция *k(t)* определяется соотношением $k(t) = dh(t)/dt$. Тогда непараметрическая оценка весовой функции примет следующий вид:

$$(5)\quad k_s(t) = h_s'(t) = \frac{1}{sc_s}\cdot\sum_{i=1}^{s} h_i H'\left(\frac{t-t_i}{c_s}\right).$$

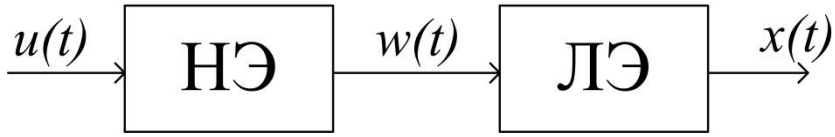
Подставив оценку весовой функции в интеграл Дюамеля, получим непараметрическую модель ЛДС. После чего, заменив интеграл его дискретным аналогом, получим непараметрическую расчетную модель линейного динамического элемента системы[2]:

$$(6)\quad \hat{w}_s(t) = \frac{1}{sc_s}\cdot\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t/\Delta\tau} h_i H'\left(\frac{t-\tau_j-t_i}{c_s}\right)u(\tau_j)\Delta\tau,$$

где τ - переменная интегрирования, $\Delta\tau$ - шаг дискретизации. Далее рассмотрим алгоритм идентификации нелинейной системы.

3 Идентификация системы типа Гаммерштейна

Рассмотрим систему, поведение которой может быть описано с помощью модели Гаммерштейна (Рисунок 2).



ЛЭ – линейная динамическая часть,
НЭ - нелинейный элемент системы,
u(t) – входное воздействие,
w(t) – выход промежуточного звена объекта,
x(t) – выход объекта

Рисунок 2 - Модель Гаммерштейна

Выход нелинейного элемента $w(t)$ измерению недоступен. Предполагается, что параметризованная структура ЛЭ не известна, а вид нелинейной характеристики НЭ известен с точностью до набора параметров.

Согласно рисунку 2 связь между входом *u(t)* и выходом *x(t)* объекта при нулевых начальных условиях может быть описана системой уравнений следующего вида:[4]

$$w(t) = f(u(t), \alpha),$$

$$x(t) = \int_0^t k(t-\tau) w(\tau) d\tau, \quad (7)$$

Или, при замене переменной $w(t)$ в соответствии с (7), получим:

$$x(t) = \int_0^t k(t-\tau) f(u(\tau), \alpha) d\tau, \quad (8)$$

где *k(t)* – весовая функция динамического элемента; $f(u,\alpha)$ - нелинейная функция, заданная с точностью до вектора неизвестных параметров α.

Положим, что $x1(t)$ - реакция нелинейного объекта на входной сигнал в виде функции Хевисайда *u(t)=1(t)*, а *x(t)* – реакция объекта на некоторый входной сигнал произвольной формы.

Ступенчатый сигнал *u(t)=1(t)*, после прохождения нелинейного элемента, сохраняет ступенчатую форму, но меняет амплитуду, т.е. $\omega(t) = f(1(t), \alpha) = const$. То есть значение выхода НЭ *w*(*t*) при подаче на вход ступенчатого воздействия является постоянной величиной и может рассматриваться как входное воздействие для ЛЭ. Тогда выход нелинейной системы, оцениваемый как $x1(t) = \int_0^t h1'(t-\tau) 1(\tau) d\tau$ - можно рассматривать как переходную функцию некоторой линейной динамической системы. Оценка переходной функции $\hat{h}1(t)$ может быть получена на основе выборки $\{x1_i, t_i\}, i = \overline{1,s}$.

С учетом оценки $\hat{h}1(t)$, модель нелинейной системы (8) можно записать в следующем виде:

(9) $\hat{x}(t) = \int_0^t \hat{h}1'(t-\tau)\hat{f}(u(t),\hat{\alpha})d\tau,$

Оценки параметров нелинейного элемента $\{x1_i, t_i\}, i = \overline{1,s}$ находятся на основе выборки измерений $\{u_i, x_i\}, i = \overline{1,s}$ как решения экстремальной задачи. Тогда непараметрическая модель системы Гаммерштейна будет описываться следующим образом:

(10) $\hat{x}_s(t) = \frac{1}{sc_s} \cdot \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{t/\Delta\tau} h1_i H'\left(\frac{t-\tau_j - t_i}{c_s}\right)\hat{f}(u(\tau_j))\Delta\tau,$

где $\hat{h}1_i$ - оценка переходной характеристики линейного элемента, $\hat{f}(t)$ - оценка нелинейного элемента системы. Далее приводится алгоритм моделирования при НЭ в виде квадраторв.

4 Непараметрическая модель системы с квадратором

Пусть имеем систему, представленную в виде модели Гаммерштейна (Рисунок 2). Причем нелинейная часть системы представляет собой квадратор, описываемый функцией вида: $f(p) = ap^2$, где a=const. Выход НЭ вычисляется следующим образом: $w(t) = f(u,a) = au^2$. При единичном входном воздействие $u(t) = 1(t)$ выход нелинейного элемента системы равен $w(t) = a$. Выход нелинейного объекта тогда рассчитывается следующим образом:

(11) $x1(t) = \int_0^t h'(t-\tau)w(\tau)d\tau = a\int_0^t h'(t-\tau)u^2(\tau)d\tau = a\int_0^t h'(t-\tau)d\tau,$

Таким образом, выход x1(t) при u(t)=1 может быть рассмотрен как оценка переходной функции линейного элемента, значение которой умножено на некоторый коэффициент, то есть *x1(t)=ah(t)*. Тогда переходная функция ЛЭ оценивается следующим образом:

(12) $\hat{h}(t) = x1(t)/a$

При произвольном входном воздействии и нулевых начальных условиях выход линейной части системы описывается выражением (3). С учетом рассчитанного значения переходной функции (11) модель нелинейного динамического объекта примет вид:

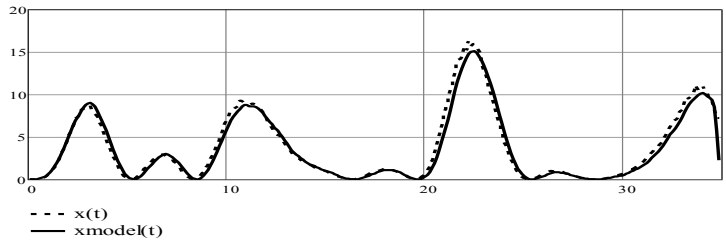
(13) $\hat{x}(t) = a\int_0^t \hat{h}'(t-\tau)u^2(\tau)d\tau = \int_0^t \hat{x}1'(t-\tau)u^2(\tau)d\tau,$

Далее приводится расчетная формула для оценивания выхода нелинейного объекта, представленного в виде модели Гаммерштейна с квадратором:

(14) $\hat{x}_s(t) = \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{t/\Delta\tau} \sqrt{x1_i} H'\left(\frac{t-\tau_j - t_i}{c_s}\right)u^2(\tau_j)\Delta\tau,$

где $x1_i$ – реакция нелинейной системы на единичное входное воздействие, *u(t)* - входное воздействие.

Пример. Рассмотрим нелинейную динамическую систему Гаммерштейна, состоящую из квадратора с параметром *a*=3 и разностного аналога дифференциального уравнения (имитирующего объект): $3 \cdot x''(t) + 2 \cdot x'(t) + 2{,}06 \cdot x(t) = u(t)$. Результат представлен на рисунке 3.



xmodel(t) - модель нелинейной системы,
x - выход системы, объем выборки s=300, h=0.117, помеха 5%,
входное воздействие: $u(t)=2\cos(0.6t)+e^{\sin(t)}$,
относительная ошибка моделирования 2.8%

Рисунок 3 - Результат оценки выхода x(t)

Анализируя модели нелинейного динамического объекта с видом нелинейности типа квадратор, можно сказать, что непараметрическая модель достаточно хорошо описывает систему при различных значениях параметров нелинейной части объекта, в условиях зашумленности каналов связи, при различных входных воздействиях.

Заключение

Настоящий доклад посвящен рассмотрению задачи непараметрической идентификации нелинейных динамических систем, представленных в виде модели Гаммерштейна. Исследуется случай, когда задача идентификации ставится в условиях как параметрической, так и непараметрической неопределенности. При этом структура линейного динамического блока неизвестна, а вид нелинейности предполагается известным с точностью до параметров. Задача идентификации нелинейной системы рассмотренного типа разделена на две части. Сначала рассматривается непараметрическая идентификация линейного элемента, алгоритм которой связан с тем, что реакция линейной системы на входное воздействие описывается интегралом Дюамеля. Приводятся методика построении моделей для получении прогноза выхода нелинейных систем посредством сочетания моделей линейного динамического и нелинейного статического процессов в общей модели системы. Были проведены многочисленные вычислительные эксперименты при различной интервале дискретизации и различном уровне помех при измерении «входных-выходных» переменных. В докладе приведен лишь один из них. Полученная непараметрическая модель достаточно качественно описывает исследуемые системы при различных видах нелинейной части объектов, в условиях зашумленности каналов связи, при различном объеме выборки и входных воздействиях. Следует отметить одно обстоятельство – полученные модели нелинейной динамики могут оказаться полезными, если учесть, что исполнительный механизм и объект можно рассматривать как модель Гаммерштейна.

Список литературы

[1] Медведев А.В. Непараметрические алгоритмы идентификации нелинейных динамических систем. / Стохастические системы управления. Изд-во: Наука. Новосибирск, 1979. – с 15-22.
[2] Чайка С.Н. К идентификации динамических систем при частично параметризованной структуре модели / Динамика систем: Управление и оптимизация. Горький: Изд-во Горьковского гос. ун-та, 1989.
[3] Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. М. «Наука», 1984г. – 320 с.
[4] Попков Ю.С., Идентификация и оптимизация нелинейных стохастических систем, - М.: Энергия, 1976г., 440 с.
[5] Надарая Э.А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии / Э.А. Надарая. Тбилиси: Издательство Тбилисского университета, 1983.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ СТАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕССЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

М.Х. Лапицкая

ФГБОУ ВПО Самарский государственный технический университет
433100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
lapitskaya@bk.ru
тел:+7(846) 332–42–34

***Ключевые слова**: численное моделирование, индукционная нагревательная установка периодического действия, электромагнитное поле, температурное распределение, конечно-элементная модель.*

Abstract

The paper considers two-dimensional FEM model of temperature distribution during batch induction heating process. The model implements interrelated electromagnetic and thermal analysis at each time step of modeling. Some computational results of induction heating process modeling for cylindrical steel billet are presented.

Введение

В настоящее время для нагрева металлов перед обработкой давлением достаточно широкое применение находят индукционные нагревательные установки (ИНУ) непрерывного или периодического действия.

По сравнению с другими видами термической обработки металлов, индукционный нагрев обладает следующими преимуществами: высокой скоростью нагрева, относительно низким энергопотреблением, меньшими потерями металла в окалину, относительно малыми габаритами нагревательных установок, меньшими трудозатратами на эксплуатацию, возможностью встраивания в технологическую линию производственного комплекса, относительной простотой автоматизации производственных операций [1,2].

При моделировании процесс индукционного нагрева описывается системой взаимосвязанных уравнений Максвелла и Фурье, учитывающих температурные зависимости электромагнитных и тепловых параметров процесса, сложную геометрию системы «индуктор-металл», неравномерность распределения внутренних источников тепла, а также лучистый и конвективный теплообмен с окружающей средой. Решение подобной системы уравнений с удовлетворительной точностью возможно только численными методами, в частности с использованием современных цифровых электротепловых моделей процесса индукционного нагрева. Численные методы широко используются на практике в различных задачах расчетов электромагнитных и температурных полей. Специально разработанное программное обеспечение для решения разных классов прикладных задач индукционного нагрева позволяет осуществить качественную реализацию вычислительных алгоритмов [1,2].

Среди численных методов наибольшее распространение получил метод конечных элементов (МКЭ). Применение этого метода позволяет решать задачу в любой геометрически сложной области [3]. Программы для моделирования на основе метода конечных элементов разделяются на две группы: универсальные и специализированные.

В данной работе описывается численная нелинейная модель процесса индукционного нагрева, выполненная в универсальном программном комплексе ANSYS, который позволяет

выполнить практически любой вид расчета с помощью метода конечных элементов. Модель основана на разработанном в Институте Электротехнологий Университета им. Лейбница (г. Ганновер) алгоритме моделирования [4,5]. Представлены численные результаты моделирования тепловых полей в процессе периодического индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок перед обработкой давлением.

Моделирование периодического процесса индукционного нагрева заготовки в программном комплексе ANSYS

Многоцелевая направленность программного комплекса ANSYS позволяет использовать одну модель для решения совместной электромагнитно-тепловой задачи. В программе имеется набор средств, которые позволяют учесть нелинейное изменение свойств металла в процессе нагрева [6].

Алгоритм моделирования процесса индукционного нагрева представляет собой последовательную итерационную процедуру, включающую гармонический электромагнитный анализ и анализ переходного теплового процесса. В описываемой модели процесс индукционного нагрева разбит на достаточное большое число временных шагов. Для этого в специальном файле прописываются общее количество шагов, величина шага по времени, ток в индукторе, частота и текущее время процесса [4]. На каждом шаге происходит последовательное решение электромагнитной и тепловой задач, каждую их которых можно разделить на следующие этапы: задание свойств материалов, с учетом их зависимости от температуры; построение геометрии; выбор типа элемента и создание конечно-элементной сетки (рисунок 1); задание граничных условий; непосредственное решение соответствующей задачи.

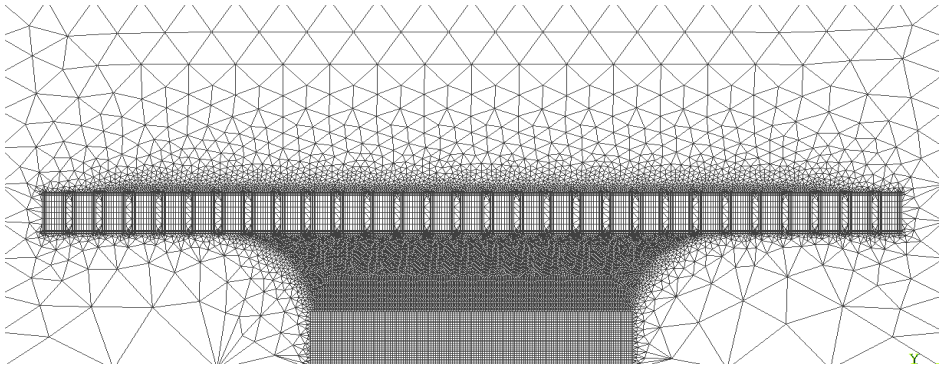


Рисунок 1- Конечно-элементная сетка индукционной нагревательной системы

В результате решения электромагнитной задачи моделируется распределение внутренних источников тепла в нагреваемой заготовке, которое используется в качестве входного воздействия в задаче теплового анализа. Результатом решения тепловой задачи является температурное распределение по объему заготовки. При задании граничных условий для теплового анализа учитываются лучистый теплообмен и конвективный теплообмен с температурно зависимым коэффициентом теплопередачи. После решения тепловой задачи выполняется проверка сходимости в соответствии с заданной точностью. На следующем шаге электромагнитный расчет осуществляется с учетом изменившихся на предыдущем шаге значений температуры и свойств материла.

В качестве примера моделирования рассмотрен процесс индукционного нагрева со следующими исходными данными, включающими конструктивные параметры системы нагрева, электромагнитные и теплофизические свойства материалов:

- длина индуктора - 402 мм;
- число витков - 29;
- внутренний диаметр катушки индуктора - 141 мм;
- геометрические параметры витка - 11х22 мм;
- толщина витка - 2 мм;
- расстояние между витками - 2,9 мм;
- величина заглубления заготовки в индукторе - 125 мм;
- радиус заготовки - 30 мм;
- длина заготовки - 150 мм;
- температура окружающей среды - 23 ºС;
- начальная температура заготовки - 23 ºС;
- изменяющийся во времени ток источника питания (рисунок 2);
- изменяющаяся во времени частота тока источника питания (рисунок 3)
- материал заготовки – сталь;
- коэффициент конвективного теплообмена α = 10 Вт/м2 °С;
- коэффициент лучистого теплообмена σ = 0,6;
- плотность ρ_{cm} = 7800 Ом/м;
- теплопроводность $\lambda = 36(1\text{-}0{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot T)$, Вт/м·ºС, где Т температура заготовки;
- удельное сопротивление $\rho = 0{,}25 \cdot 10^{-6}(1 + 0{,}004 \cdot T)$, Ом/м;
- нелинейная зависимость теплоемкости от температуры, представленная на рисунке 4;
- нелинейная зависимость магнитной проницаемости от температуры, представленная на рисунке 5.

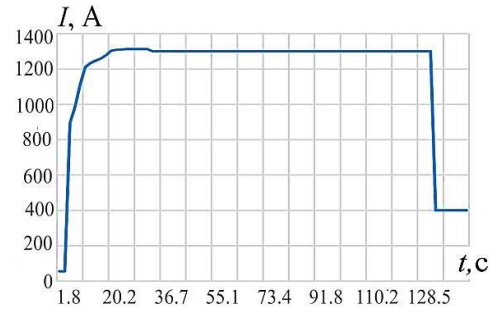


Рисунок 2 –Изменение во времени тока источника питания

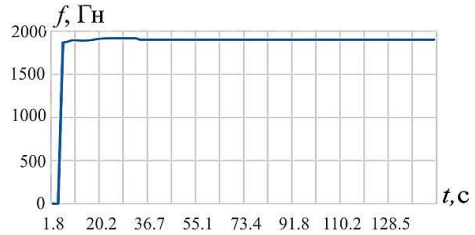


Рисунок 3 – Изменение во времени частоты тока источника питания

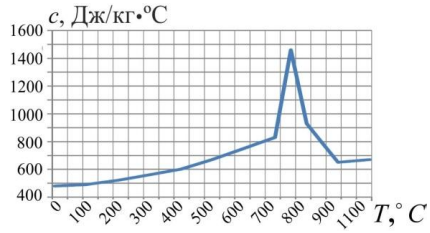


Рисунок 4 – Изменение теплоемкости в зависимости от температуры

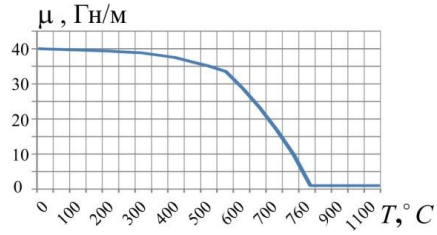


Рисунок 5 – Изменение магнитной проницаемости в зависимости от температуры

На рисунках 6, 7 представлены некоторые результаты расчетов. Сравнительный анализ полученных результатов с экспериментальными данными позволяет сделать вывод о качественном совпадении моделируемого температурного поля с экспериментальными данными. Отклонение полученных при моделировании значений температуры от экспериментальных данных объясняется всегда присутствующей погрешностью при решении задач численными методами и невозможностью точного определения физических свойств материала.

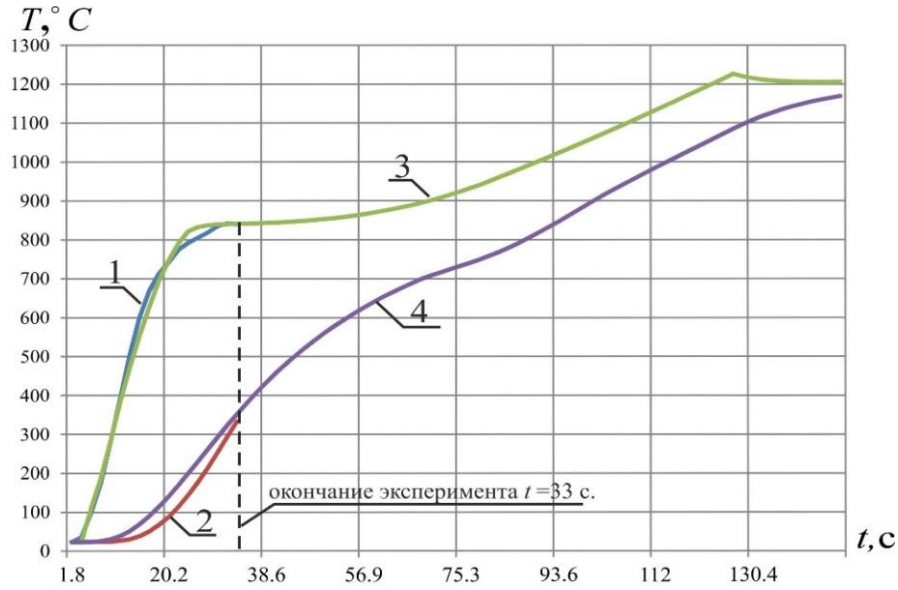


Рисунок 6 – 1, 2 – Температуры поверхности и центра, полученные экспериментально, 3, 4 - температуры поверхности и центра, полученные при моделировании.

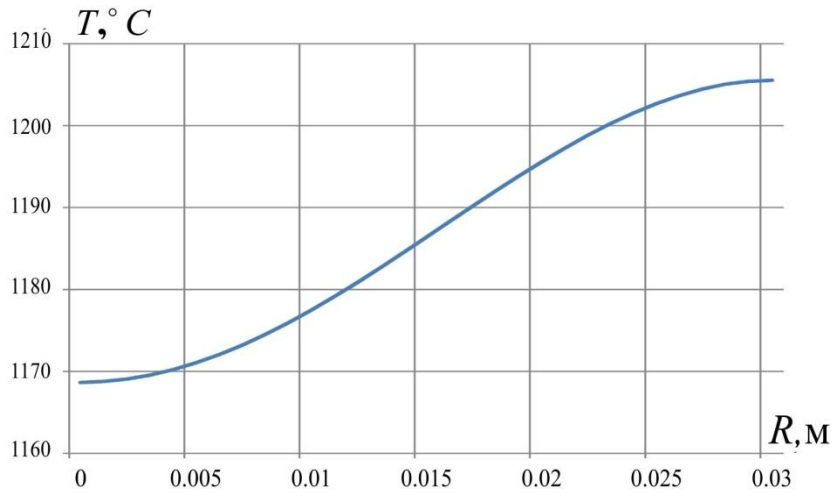


Рисунок 7 – Температурное распределение по радиусу в центральном сечении заготовки в момент времени t=146.88 с.

Заключение

В программном пакете ANSYS разработана численная двумерная модель взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей в процессе периодического индукционного нагрева цилиндрической заготовки с учётом нелинейных теплофизических свойств материала и параметров процесса.

Модель позволяет проводить анализ температурного распределения по радиусу в срединном сечении заготовки в процессе нагрева.

Описанная модель может применяться для исследования поведения температурных полей, а также для решения задач оптимального управления температурными полями и задач оптимального проектирования ИНУ [7,8,9].

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта, поддержанного грантом РФФИ № 13-08-00926.

Список литературы

[1] Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. - Д.: Энергоатомиздат, 1988. - 280 с.

[2] Рапопорт Э.Я., Плешевцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева / Э.Я. Рапопорт, Ю.Э. Плешивцева. - М.: Наука, 2012. - 309 с. - ISBN 978-5-02-037501-7 (в пер.).

[3] И.В. Позняк, С.А. Галунин, А.Н. Шатунов, А.Н. Никаноров, А.Ю. Печенков,В.В. Кичигин, Максимов А.И. Моделирование электротехнологических процессов: Учеб. пособие, СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009, 44 с.

[4] K. Blinov, A. Nikanorov, B. Nacke, M. Klopzig. Numerical simulation and investigation of induction through-heaters in dynamic operation mode. COMPEL The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. Selected papers from the Heating by Electromagnetic Sources Symposium 2010, HES 2010, ISSN 0332-1649, Volume 30, Number 5,2011, pp. 1539-1549.

[5] Pleshivtseva Yu.E., Nikanorov A.N., Blinov K.Yu, Tkachev I.A., Simulation of temperature field in the process of induction through heating. European researcher. 2011. № 5-1 (7). С. 635-637

[6] Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. Ansys в руках инженера Практическое руководство. - М.: Едиториал УРСС, 2003. - 272 с.

[7] Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление нелинейными объектами технологической теплофизики, Автометрия . 2012.Т. 48. №5, С. 3-13

[8] Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E. Optimal control of nonlinear object oh engineering thermophysics. Автометрия, 2012.Т. 48. №5, С. 429-437

[9] Плешивцева Ю.Э., Шарапова О.Ю. Энергосберегающие алгоритмы оптимального управления процессами индукционного нагрева. Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технический науки, 2011. № 4 (32). С. 172-180.

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛА ПОД ОБРАБОТКУ ДАВЛЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА

И.С. Левин

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
Levin_ilja@yahoo.com
тел: +7 (846) 337-07-00

Ключевые слова: *система с распределенными параметрами, интервальная неопределенность, индукционный нагрев, идентификатор, синтез оптимального регулятора, показатели эффективности*

Abstract
This paper presents the time-optimal control problem of billet heating with conditions of interval uncertainty of the process characteristics. The equations of control law and the structure of the closed-loop system have been obtained. The performance of the obtained system is demonstrated by given example.

Введение

Актуальной в современной теории управления является проблема построения систем управления динамическими объектами, параметры которых известны не точно. Такая ситуация является типичной в реальных практических задачах, где неизбежно присутствует неопределенность. В характерных случаях говорят об интервальной неопределенности характеристик объекта.

Способам решения указанной проблемы посвящен ряд работ[1,2], в частности отмечается робастный метод построения систем управления. Важно также сохранить баланс между простотой технической реализации полученного регулятора и точностью такого решения. В представленном исследовании предлагается способ решения этой задачи для объекта с распределенными параметрами.

В работе рассматривается задача синтеза оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева металлических полуфабрикатов под обработку давлением с неполным измерением состояния в условиях интервальной неопределенности его характеристик.

1 Постановка задачи

Процесс индукционного нагрева металлических изделий цилиндрической формы с сосредоточенным управляющим воздействием по мощности внутреннего тепловыделения *u(t)* можно в линейном приближении описать бесконечной системой дифференциальных уравнений для временных мод $\overline{\theta}_n(\mu_n, t)$ разложения температурного поля $\theta(x,t)$ в ряд по собственным функциям $J_0\left(\eta_n \frac{x}{R}\right)$ радиальной координаты $x \in [0, R]$:

(1) $$\frac{d\overline{\theta}_n(\mu_n,t)}{dt} = -\mu_n^2\overline{\theta}_n(\mu_n,t) + \frac{1}{c\gamma}F_{b1n}(\mu_n,v)u(t) + d_{1n}\theta_C(t), t\in[0,t_1], n = 1,2,...;$$

$$\overline{\theta}_n(\mu_n,0) = \overline{\theta}_0^{(0)}(\mu_n).$$

На управляющее воздействие *u(t)* накладывается следующее ограничение:

(2) $0 \le u(t) \le u_{\max} \ \forall t \in [0,t_1]$.

Здесь R – радиус цилиндра; c,γ - удельная теплоемкость и плотность материала; $\overline{\theta}_0^{(0)}(\mu_n)$ -моды разложения заданных равномерных начальных распределений температур $\theta(x,0) = \theta_0 = \mathbf{const}$ в бесконечные ряды по системе собственных функций; $\mu_n^2 = \frac{a\eta_n^2}{R^2}$ – собственные числа, η_n, $n = 1,2,...$ - бесконечно возрастающая последовательность корней уравнения $BiJ_0(\eta) - \eta J_1(\eta) = 0$; Bi – безразмерный критерий Био, характеризующий уровень тепловых потерь с поверхности цилиндра в процессе нагрева; $J_i(\eta)$, $i = 0,1$ – функции Бесселя нулевого и первого порядка; d_{1n} – известные коэффициенты; $\theta_C(t)$ – температура окружающей среды; $\theta(x,t)$ – температурное поле нагреваемого металлического изделия, изменяющееся во времени t и по радиальной координате x, которое описывается следующим выражением:

(3) $$\theta(x,t) = \theta_0 + \frac{1}{c\lambda}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2\overline{F}_{b1n}(\eta_n,v)\eta_n^2 J_0\left(\eta_n\frac{x}{R}\right)}{(\eta_n^2+Bi^2)J_0^2(\eta_n)}\int_0^{t_1} e^{-\mu_n^2(t-\tau)}u(\tau)d\tau,$$

где λ - коэффициент теплопроводности; $\overline{F}_{b1n}(\eta_n,v)$ - моды функции пространственного распределения по радиусу цилиндра внутренних источников тепла, определяемые по формуле

(4) $$\overline{F}_{b1n}(\eta_n,v) = \int_0^1 F_{b1}(l,v)J_0(\eta_n l)ldl, n = 1,2,... .$$

Здесь $F_{b1}(l,v) = v\frac{\mathbf{ber}'^2(vl)+\mathbf{bei}'^2(vl)}{\mathbf{ber}\,v\ \mathbf{ber}'v+\mathbf{bei}\,v\,\mathbf{bei}'v}$; $l = \frac{x}{R}$; $v = R\sqrt{2\pi\mu_a f\sigma}$; f – частота питающего индуктор тока; σ - электропроводность нагреваемого материала; μ_a - абсолютная магнитная проницаемость нагреваемого материала; $\mathbf{ber}\,z, \mathbf{bei}\,z, \mathbf{ber}'z, \mathbf{bei}'z$ - функции Кельвина и их первые производные.

В качестве неопределенных характеристик объекта принимаем величины начальной температуры $\theta_0 \in [\theta_{0_{\min}}, \theta_{0_{\max}}]$ и критерия Био $Bi \in [Bi_{\min}, Bi_{\max}]$, которые и будут составлять вектор неопределенных факторов $y = (\theta_0, Bi) \in Y$, где Y – множество всех допустимых по указанным ограничениям комбинаций величин θ_0 и Bi.

Пусть качество процесса управления оценивается по критерию оптимального быстродействия в интегральной форме:

(5) $$I = \int_0^{t_1} dt = t_1 \to \mathbf{min},$$

где t_1 – длительность процесса нагрева.

Требования к температурному состоянию $\theta(x,\tilde{y},t_1)$ после его разложения в ряд по собственным функциям $J_0\left(\eta_n \frac{x}{R}\right)$ в том случае, когда в системе автоматического управления (САУ) может быть получена в реальном масштабе времени достоверная информация о реализуемой в каждом конкретном случае величине $y = \tilde{y} \in Y$ путем наблюдения за поведением управляемой величины, принимают следующий вид:

$$(6)\quad \max_{x\in[0,R]} \left| \sum_{n=1}^{\infty} \bar{\theta}_n(\mu_n,\tilde{y},t_1) J_0\left(\eta_n \frac{x}{R}\right) - \theta^{**} \right| \le \tilde{\varepsilon}_0(\tilde{y}),$$

где $\tilde{\varepsilon}_0(\tilde{y})$ - допустимая точность равномерного приближения $\theta(x,\tilde{y},t_1)$ к заданному равномерному распределению температур $\theta^{**}(x) = \theta^{**} = \mathbf{const}$.

Сформулируем теперь задачу синтеза оптимального быстродействия.

Необходимо найти такое оптимальное управление u^* в условиях заданных ограничений (2), которое переводит объект, описываемый бесконечной системой уравнений (1) из заданного начального в требуемое конечное состояние (6) за минимально возможное время $t_1 = t_{1\min}$ для каждой из допустимых величин $y = \tilde{y} = \left(\theta_0^*, Bi^*\right) \in Y$.

В пренебрежении инерционностью и погрешностями процедур наблюдения и идентификации величина $\tilde{y}$ определяется по некоторой заранее фиксируемой детерминированной зависимости $F(\theta_u(x,t))$ от результатов всегда неполного наблюдения $\theta_u(x,t)$ за текущим состоянием $\theta(x,t)$ объекта:

$$(7)\quad \tilde{y} = F(\theta_u(x,t)),$$

где $\theta_u(x,t)$ и $F(\theta_u(x,t))$ выбираются из условия минимальной сложности технической реализации САУ.

Таким образом возникает задача проектирования идентификатора (7) и синтеза регулятора $u = u\left(\theta_u(x,t)\right)$, обеспечивающих решение детерминированной краевой задачи (1) - (3), (6), (7) за минимально возможное время $t_{1\min}$ при некоторых фиксированных значениях θ_0 и Bi.

2 Оптимальная по быстродействию САУ процессом индукционного нагрева

Задачу синтеза такой системы рассмотрим на примере построения оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева металлических изделий цилиндрической формы, математическая модель которого представлена уравнениями (1)-(4).

Пусть в соответствии с требованиями (6) к конечному температурному состоянию требуется обеспечить равномерный нагрев тела до заданной температуры θ^{**} = **const** с предельно достижимой в классе оптимальных по быстродействию двухинтервальных управляющих воздействий u(t) релейной формы (см. рисунок 1) абсолютной точностью $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ за минимально возможное время $t_1 = t_{1\min}$ при равномерно распределенной начальной температуре $\theta_0(x) = \theta_0 = \mathbf{const} < \theta^{**}$ в условиях интервальной неопределенности по величинам θ_0 и Bi.

В начале решается детерминированная задача синтеза оптимального по быстродействию САУ для любого заранее фиксируемого значения $y = \tilde{y} \in Y$.

Из [3] известно, что функция переключения релейного управления в задаче синтеза оптимального по быстродействию регулятора для рассматриваемого объекта управления в большинстве случаев может быть представлена в виде:

(8) $$h_1(\bar{\theta},\tilde{y}) = \sum_{j=1}^{N} \rho_j(\tilde{y})\left(\theta_j^T(\tilde{y}) - \theta_j(t)\right);$$
$$\bar{\theta} = \left(\theta_j(t)\right), j = \overline{1,N}.$$

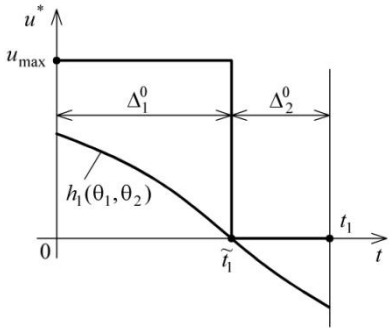


Рисунок 1 – Оптимальное по быстродействию двухинтервальное управление по мощности внутренних источников тепла

Это вполне реализуемая функция заранее фиксируемого простейшего вида, формируемая по измеряемым температурам $\theta_j(t)$ в некоторых N ≥1 точках $\tilde{x}_j \in [0,R]$ и эквивалентная по знаку температурам функции переключения $h(\bar{\theta})$, формально определяющей уравнение гиперповерхности переключения в бесконечном фазовом пространстве исследуемого объекта с распределенными параметрами (ОРП), задача отыскания которой практически неразрешима.

Коэффициенты $\rho_j(\tilde{y})$ в (8) являются нетривиальными решениями однородной системы $N-1$ линейных уравнений с N неизвестными:

(9) $$\sum_{j=1}^{N} \rho_j(\tilde{y})(\theta_j^T(\tilde{y}) - \theta_j(\tilde{t}_m)) = 0, m = \overline{1,N-1}.$$

Здесь $\tilde{t}_m, m = \overline{1,N-1}$ - расчетные моменты времени переключения оптимальной программы $u^*(t)$.

В рассматриваемом случае функция переключения (8) формируется при $N = 2$ интервалах постоянства оптимального управления по сигналам обратной связи в точках $\tilde{x}_1$ и $\tilde{x}_2$ по радиусу цилиндра, в качестве которых удобно принять точки $\tilde{x}_1 = R$ и $\tilde{x}_2 = 0$, где результирующие значения температур θ_1^T и θ_2^T в конце оптимального процесса независимо от начальной температуры будут равны минимально допустимым величинам $\theta^{**} - \varepsilon_{\min}^{(2)}$, что вытекает из альтернансных соотношений для $\theta(x,\Delta^0)$ [3]. Положим для определенности $\rho_1 = 1$, тогда функция переключения примет вид:

(10) $$h_1(\theta_1,\theta_2) = \theta^{**} - \varepsilon_{\min}^{(2)} - \theta(R,t) + \rho_2\left(\theta^{**} - \varepsilon_{\min}^{(2)} - \theta(0,t)\right).$$

Можно показать [3], что функция $h_1(\bar{\theta})$ проходит через нуль только в расчетные моменты времени (см. рисунок 1).

На этом основании получаем уравнение оптимального регулятора в детерминированной задаче быстродействия:

(11) $$u^* = \frac{u_{\max}}{2}\left[1 + \operatorname{sign}\left(\theta^{**} - \varepsilon_{\min}^{(2)} - \theta(R,t) + \rho_2\left(\theta^{**} - \varepsilon_{\min}^{(2)} - \theta(0,t)\right)\right)\right],$$

где коэффициент ρ_2 определяется известным способом по результатам расчета программного управления альтернансным методом.

Для построения замкнутой системы оптимального по быстродействию управления с регулятором (11) в условиях интервальной неопределенности $y \in Y$ необходимо дополнить её структуру идентификатором (7) реализуемых величин $\tilde{y} = (\theta_0, Bi)$ по результатам наблюдения текущего состояния $\theta_u(x,t) = \theta(\bar{x}_j,t) = \bar{\theta}_j(t)$ в некоторых точках r точках $\bar{x}_j \in [0,R], j = \overline{1,r}$

частично или полностью совпадающего, как в данном случае, с измеряемыми величинами $\theta_j(x,t)$ в (8).

Тогда, при $r = 2$ неопределенных факторах $\tilde{y} = (\theta_0, Bi)$ выражение (7) для реализуемых значений $\tilde{y}$ примет вид:

(12) $\tilde{y}^{(m)} = F_m\left(\bar{\theta}_1(t_\Phi), \bar{\theta}_2(t_\Phi)\right), m = 1,2,$

где $\bar{\theta}_1(t_\Phi)$ и $\bar{\theta}_2(t_\Phi)$ определяются по известным решениям уравнения объекта при $u(t) = u_{\max}, t = t_\Phi \in (0, \Delta_1^0)$ [3]:

(13) $\bar{\theta}_1(t_\Phi) = \theta(R, \Delta_1^0, t_\Phi) = \theta_0 + \frac{u_{\max} R^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\bar{F}_{b1n}(\eta_n, v)}{(\eta_n^2 + Bi^2) J_0(\eta_n)} \left(1 - e^{-\mu_n^2 t_\Phi}\right);$

(14) $\bar{\theta}_2(t_\Phi) = \theta(0, \Delta_1^0, t_\Phi) = \theta_0 + \frac{u_{\max} R^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\bar{F}_{b1n}(\eta_n, v)}{(\eta_n^2 + Bi^2)\ J_0^2(\eta_n)} \left(1 - e^{-\mu_n^2 t_\Phi}\right),$

и определяют значения $\tilde{y}$ в окрестности некоторой номинальной точки $\tilde{y} = y_{\text{Н}}$ как неявно заданные, однозначные, непрерывные и непрерывно дифференцируемые по всем аргументам функции (12) от наблюдаемых переменных $\bar{\theta}_j(t_\Phi)$ при условии, что якобиан системы уравнений (13), (14):

(15) $J = \frac{D(g_1^*, ..., g_r^*)}{D(\tilde{y}^{(1)}, ..., \tilde{y}^{(r)})} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial Q_0} & \frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial Bi} \\ \frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Q_0} & \frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Bi} \end{vmatrix} = \frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Bi} - \frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial Bi}$

не равен нулю в точке $\tilde{y} = y_{\text{Н}}$ [4] и $g_j^*(\tilde{y}^{(1)}, ..., \tilde{y}^{(r)}, \bar{\theta}_1(t_\Phi), ..., \bar{\theta}_r(t_\Phi)) = g_j(\tilde{y}^{(1)}, ..., \tilde{y}^{(r)}) - \bar{\theta}_j(t_\Phi)$.

Здесь $\frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial Bi}$ и $\frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Bi}$ находятся путем дифференцирования выражений (13), (14) и принимают следующий вид:

(16) $\frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial Bi} = \frac{2u_{\max} R^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G \cdot s - \bar{F}_{b1n}(\eta_n(Bi), v)\left[m_1' \cdot s - e^{-\mu_n^2 t_\Phi} t_\Phi \frac{d\mu_n^2}{dBi} \cdot z\right]}{z^2};$

(17) $\frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Bi} = \frac{2u_{\max} R^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{GJ_0(\eta_n(Bi))s - \bar{F}_{b1n}(\eta_n(Bi), v) \cdot \left[m_2' \cdot s - e^{-\mu_n^2 t_\Phi} t_\Phi \frac{d\mu_n^2}{dBi} z^2\right]}{z^2 \cdot J_0^2(\eta_n(Bi))},$

где $G = \frac{\partial \bar{F}_{b1n}(\eta_n(Bi), v)}{\partial Bi} z;\ z = (\eta_n^2(Bi) + Bi^2) J_0(\eta_n(Bi));\ s = \left(1 - e^{-\mu_n^2 t_\Phi}\right);\ \frac{d\mu_n^2}{dBi} = \frac{2a}{R^2} \eta_n(Bi) \frac{d\eta_n}{dBi};$

$\frac{\partial \bar{F}_{b1n}(\eta_n(Bi), v)}{\partial Bi} = \int_0^1 F_{b1}(l, v)(-l^2) J_1(\eta_n(Bi) l) \frac{d\eta_n}{dBi} dl;$

$$m_1' = 2J_0(\eta_n(Bi))\left(Bi + \eta_n(Bi)\frac{\partial \eta_n(Bi)}{\partial Bi}\right) - J_1(\eta_n(Bi))\frac{\partial \eta_n(Bi)}{\partial Bi}\left(\eta_n^2(Bi) + Bi^2\right);$$

$$m_2' = 2J_0^2(\eta_n(Bi))\left(\eta_n(Bi)\frac{\partial \eta_n(Bi)}{\partial Bi} + Bi\right) - z\left[2J_1(\eta_n(Bi))\frac{\partial \eta_n(Bi)}{\partial Bi}\right].$$

Функция F в уравнении идентификатора (7) определяется по значениям производных $\left(\frac{\partial\, \tilde{y}^{(m)}}{\partial \bar{\theta}_j}\right)_{\tilde{y}=y_{\text{Н}}}$ путем её разложения в ряд Тейлора по степеням $\bar{\theta}_j$. Воспользовавшись известными правилами дифференцирования неявно заданных функций [5] эти производные могут быть заранее вычислены в точке $\tilde{y} = y_{\text{Н}}$:

$$(18)\quad \left(\frac{\partial \tilde{y}^{(m)}}{\partial \bar{\theta}_j}\right)_{\tilde{y}=y_{\text{Н}}} = -\left[\frac{1}{J}\cdot\frac{D(g_1^*,...,g_r^*)}{D(\tilde{y}^{(1)},...,\tilde{y}^{(m-1)},\bar{\theta}_j,\tilde{y}^{(m+1)},...,\tilde{y}^{(r)})}\right]_{\tilde{y}=y_H}.$$

Для рассматриваемого типичного случая равенства (12) можно представить в линейном приближении в виде суммы сигналов линейных обратных связей по наблюдаемым переменным $\bar{\theta}_j(t_\Phi)$ с вычисленными по (18) коэффициентами передачи α_{mj}:

$$(19)\quad \begin{aligned} \tilde{y}^{(m)} &= \tilde{y}_{\text{Н}}^{(m)} + \sum_{j=1}^{2}\alpha_{mj}\left(\bar{\theta}_j(t_\Phi) - \bar{\theta}_{jH}\right); \\ \alpha_{mj} &= \left(\frac{\partial \tilde{y}^{(m)}}{\partial \bar{\theta}_j}\right)_{\tilde{y}=y_{\text{Н}}};\ m = 1,2, \end{aligned}$$

где значения $\bar{\theta}_{jH}, j = 1,2$ рассчитываются по формулам (13), (14) в окрестности номинальной точки $\tilde{y}_{\text{Н}} = \left(\theta_0^*, Bi^*\right)$.

Определим коэффициенты передачи α_{mj} с учетом (15)-(18):

$$(20)\quad \alpha_{11} = \left(\frac{\partial \tilde{y}^{(1)}}{\partial \bar{\theta}_1}\right)_{\tilde{y}=y_{\text{Н}}} = -\frac{1}{J}\begin{bmatrix} \frac{\partial g_1^*}{\partial \bar{\theta}_1} & \frac{\partial g_1}{\partial \tilde{y}^{(2)}} \\ \frac{\partial g_2^*}{\partial \bar{\theta}_1} & \frac{\partial g_2}{\partial \tilde{y}^{(2)}} \end{bmatrix}_{\tilde{y}=y_{\text{Н}}} = \frac{1}{J}\frac{\partial g_2}{\partial \tilde{y}^{(2)}} = \frac{\frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Bi}}{\frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Bi} - \frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial Bi}};$$

$$(21)\quad \alpha_{12} = \left(\frac{\partial \tilde{y}^{(1)}}{\partial \bar{\theta}_2}\right)_{\tilde{y}=y_{\text{Н}}} = -\frac{1}{J}\begin{bmatrix} \frac{\partial g_1^*}{\partial \bar{\theta}_2} & \frac{\partial g_1}{\partial \tilde{y}^{(2)}} \\ \frac{\partial g_2^*}{\partial \bar{\theta}_2} & \frac{\partial g_2}{\partial \tilde{y}^{(2)}} \end{bmatrix}_{\tilde{y}=y_{\text{Н}}} = -\frac{1}{J}\frac{\partial g_1}{\partial \tilde{y}^{(2)}} = \frac{\frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial Bi}}{\frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Bi} - \frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial Bi}};$$

$$(22)\quad \alpha_{21} = \left(\frac{\partial \tilde{y}^{(2)}}{\partial \bar{\theta}_1}\right)_{\tilde{y}=y_{\text{Н}}} = -\frac{1}{J}\begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial \tilde{y}^{(1)}} & \frac{\partial g_1^*}{\partial \bar{\theta}_1} \\ \frac{\partial g_2}{\partial \tilde{y}^{(1)}} & \frac{\partial g_2^*}{\partial \bar{\theta}_1} \end{bmatrix}_{\tilde{y}=y_{\text{Н}}} = -\frac{1}{J}\frac{\partial g_2}{\partial \tilde{y}^{(1)}} = -\frac{1}{\frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Bi} - \frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial Bi}};$$

(23) $$\alpha_{22} = \left(\frac{\partial \tilde{y}^{(2)}}{\partial \bar{\theta}_2} \right)_{\tilde{y}=y_{\text{H}}} = -\left(\frac{\partial \tilde{y}^{(2)}}{\partial \bar{\theta}_1} \right)_{\tilde{y}=y_{\text{H}}} = \frac{1}{\frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Bi} - \frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial Bi}};$$

Аналогичным образом по известным зависимостям $\rho_i(\tilde{y}), i = \overline{1,N}$, определяемым предварительным решением системы уравнений (9) для различных $\tilde{y} \in Y$, находятся их линейные приближения:

(24) $$\rho_i(\tilde{y}) = \rho_i(y_{\text{H}}) + \sum_{j=1}^{2} \beta_{mi} \left(\tilde{y}^{(m)} - \tilde{y}_{\text{H}}^{(m)} \right);$$
$$\beta_{mi} = \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial \tilde{y}^{(m)}} \right)_{\tilde{y}=y_{\text{H}}}; i = 1,2.$$

Тогда, с учетом (19), (24), получаем линейные приближения алгоритма автоматической коррекции коэффициентов обратных связей и определяемых подобным образом заданных конечных температурных состояний θ_j^T:

(25) $$\rho_i(\tilde{y}) = \rho_i(y_{\text{H}}) + \sum_{j=1}^{2} \gamma_{ij} \left(\bar{\theta}_j(t_{\Phi}) - \bar{\theta}_{jH} \right); i = 1,2;$$
$$\gamma_{ij} = \sum_{m=1}^{2} \alpha_{mj} \beta_{mi};$$

(26) $$\theta_i^T(\tilde{y}) = \theta_i^T(y_{\text{H}}) + \sum_{j=1}^{2} \gamma_{ij}^* \left(\bar{\theta}_j(t_{\Phi}) - \bar{\theta}_{jH} \right); i = 1,2;$$
$$\gamma_{ij}^* = \sum_{m=1}^{2} \alpha_{mj} \beta_{mi}^*.$$

Найти аналитические выражения для коэффициентов β_{mi} и β_{mi}^* не представляется возможным ввиду их сложной и неявной зависимости от параметров θ_0, Bi, поэтому их приближенные значения вычисляются для конкретных исходных данных процесса индукционного нагрева как приращение значения функции к приращению её аргумента:

(27) $$\beta_{mi} = \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial \tilde{y}^{(m)}} \right)_{\tilde{y}=y_{\text{H}}} \cong \frac{\Delta \rho_i}{\Delta \tilde{y}^{(m)}}; m = 1,2;$$

(28) $$\beta_{mi}^* = \left(\frac{\partial \theta_i^T}{\partial \tilde{y}^{(m)}} \right)_{\tilde{y}=y_{\text{H}}} \cong \frac{\Delta \theta_i^T}{\Delta \tilde{y}^{(m)}}; m = 1,2;$$

при достаточно малых значениях $\Delta \tilde{y}^{(m)}$.

Алгоритм оптимального по быстродействию управления в рассматриваемых условиях интервальной неопределенности величин $\tilde{y} = (\theta_0, Bi)$ примет вид:

(29) $$u^* = \frac{u_{\max}}{2} \left[1 + \operatorname{sign} \left(\theta_1^T(\tilde{y}) - \theta(R,t) + \rho_2(\tilde{y}) \left(\theta_2^T(\tilde{y}) - \theta(0,t) \right) \right) \right].$$

Таким образом, структурно-параметрический синтез замкнутой системы оптимального по быстродействию управления процессом индукционного нагрева при неполном измерении состояния в условиях интервальной неопределенности параметров объекта $\tilde{y} = (\theta_0, Bi)$ опреде-

ляется алгоритмом управления (8), (9), (29) с автоматически определяемым идентификатором (19), (24) -(26) коэффициентами обратных связей и конечными значениями контролируемых температур при априори фиксируемых коэффициентах $\gamma_{ij}, \gamma_{ij}^{*}$.

Соответствующая структура замкнутой системы с обратными связями приведена на рисунке 2.

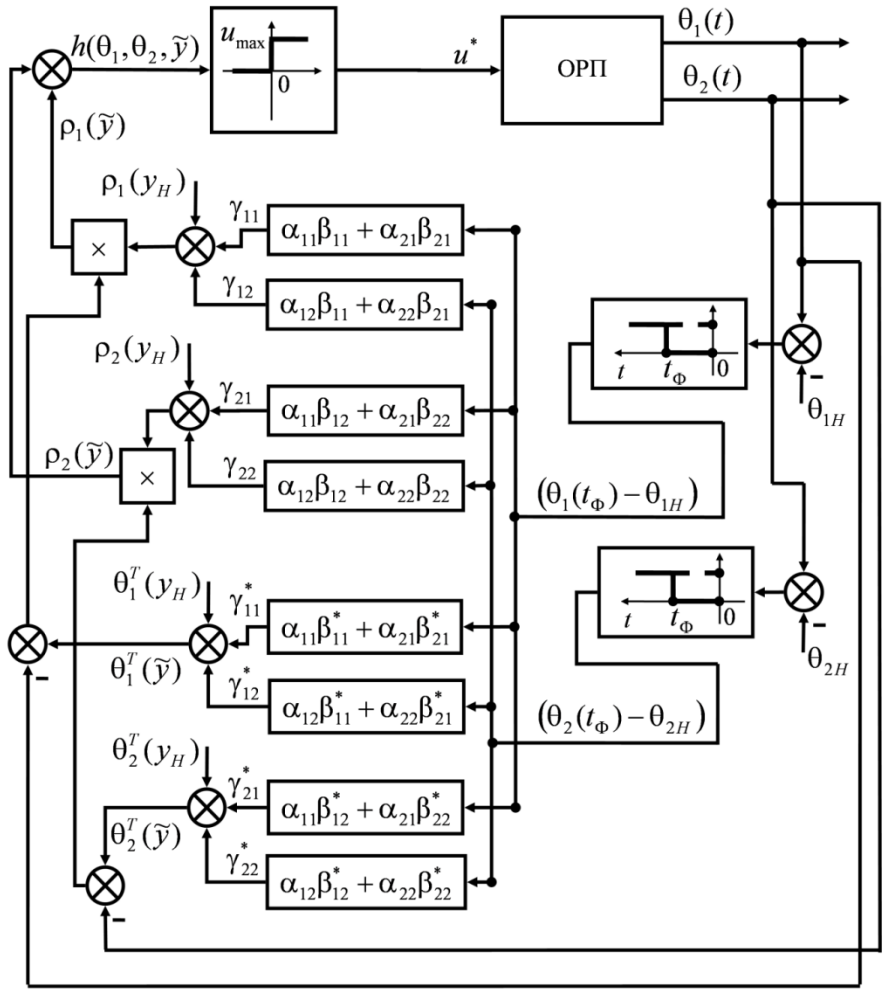


Рисунок 2 – Структура оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева заготовки под обработку давлением с неполным измерением состояния в условиях интервальной неопределенности

Для исходных данных рассматриваемого процесса индукционного нагрева цилиндрических слитков R = 0.08 м; Bi = 0.04; ν = 5; θ_0 = 300 ºС; θ^{**} = 460 ºС; λ = 130 Вт/(м • ºС); $P_{0\max}$ = 130 кВт/м^2 получены значения коэффициентов в (20)-(23), (25), (26): $\alpha_{11} = -1.04$, $\alpha_{12} = 2.04$, $\alpha_{21} = -0.08$, $\alpha_{22} = 0.08$, $\beta_{11} = \beta_{21} = 0$, $\beta_{12} = -0.002$, $\beta_{22} = 4.54$, $\beta_{11}^* = \beta_{12}^* = 0.003$, $\beta_{21}^* = \beta_{22}^* = -9.06$, $\gamma_{11} = \gamma_{12} = 0$, $\gamma_{21} = -0.36$, $\gamma_{22} = 0.36$, $\gamma_{11}^* = \gamma_{21}^* = 0.72$, $\gamma_{12}^* = \gamma_{22}^* = -0.71$.

По методике, описанной в [6], был произведен сравнительный анализ, оценивающий эффективность замкнутой системы управления с идентификатором состояния по сравнению с замкнутой системой управления в условиях полного объема информации об объекте.

Полученные результаты (см. рисунок 3) указывают на то, что система с алгоритмом автоматической коррекции коэффициентов обратной связи в среднем ближе к эталонному значению в 19 и 6 раз соответственно в случае отклонения начальной температуры θ_0 и критерия Bi, характеризующего уровень тепловых потерь, от своих номинальных значений.

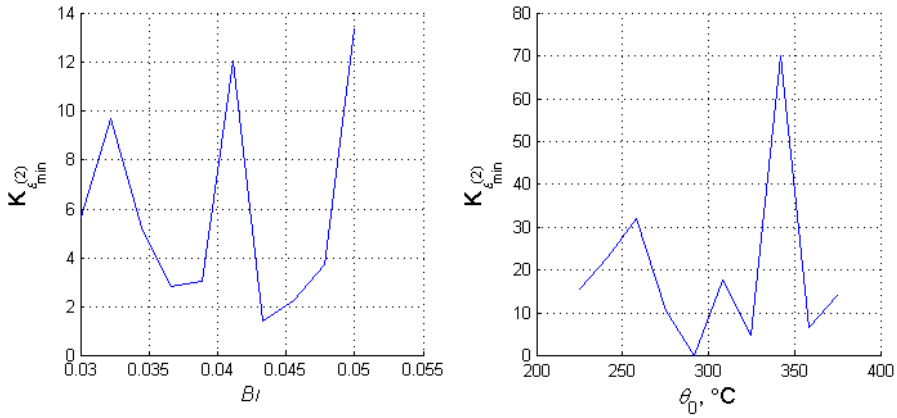


Рисунок 3 – График зависимости отношения отклонений конечного температурного распределения от заданного $K_{\varepsilon_{min}^{(2)}}$ двух сравниваемых систем от изменяемых в интервале ±25% значений величин Bi и θ_0

Заключение

Эффективность предлагаемой САУ с автоматической коррекцией коэффициентов в обратных связях продемонстрирована, а полученный регулятор может быть реализован технически.

Список литературы

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

[2] Поляк Б.Е., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002.

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

[4] Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление динамическими системами с распределенными параметрами в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIV Международной конференции. – Самара: СНЦ РАН, 2012. – С. 75-86.

[5] Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления, т. 1. – М.: Физматлит, 1962.

[6] Левин И.С. Моделирование оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки» № 3 (39)-2013 – Самара, – С. 167 – 174.

МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПО ТИПОВЫМ КРИТЕРИЯМ КАЧЕСТВА

Ю.Э. Плешивцева[1], А.В. Попов[2], А.И. Дьяконов[2]

[1]Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
cscmp@iccs.ru
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

[2]Самарский государственный технический университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
antonsam93@mail.ru
тел: +7 (927) 018-12-61

Ключевые слова: *индукционный нагрев, оптимальное управление, быстродействие, точность нагрева, минимум расхода энергии, альтернансный метод, численная модель, взаимосвязанные элетромагнитные и тепловые поля, Cedrat FLUX.*

Abstract
A process of induction heating of metal billets before hot forming is considered as an object to be optimized. With respect to typical optimization criteria time-optimal control problem, problem of maximum heating accuracy and minimum energy consumption problem are formulated. Parametric optimization of control algorithms is based on the alternance method of optimization of distributed parameters systems. Computational results for optimal heating of aluminum cylindrical billets are shown as examples of the problems solutions. Two-dimensional numerical model of interrelated electromagnetic and temperature fields has been developed in Cedrat FLUX software and integrated in optimization procedures.

Введение

В настоящее время традиционные и инновационные технологии, в которых применяется индукционный нагрев, заняли прочное место в различных отраслях промышленности. В последние три-четыре десятилетия индукционные нагревательные установки (ИНУ) находят все более широкое применение на практике благодаря ряду преимуществ перед нагревательными агрегатами других типов.

Актуальность решения задач оптимального управления (ЗОУ) процессами сквозного индукционного нагрева напрямую связана с постоянно возрастающей потребностью в повышении экономической эффективности и конкурентоспособности производственных процессов. Проблема достижения предельных качественных показателей процессов нагрева может быть решена с помощью оптимизации режимов работы и конструктивных характеристик периодических ИНУ по соответствующим критериям оптимальности.

1 Постановка задач оптимального по типовым критериям качества управления

Процесс индукционного нагрева цилиндрических заготовок перед обработкой давлением, в котором температурное распределение $T(r,l,t)$ по объему нагреваемого тела рассматривается в качестве функции состояния объекта управления с распределенными параметрами (ОРП), описывается взаимосвязанной системой уравнений Максвелла и Фурье [1, 2]:

$$curl\, H = \sigma(T)E + \frac{\partial \overline{D}}{\partial t};\ \ curl\, \overline{E} = -\frac{\partial \overline{B}}{\partial t};\ \ div\, \overline{B} = 0;\ \ div\, \overline{E} = 0; \tag{1}$$

$$(2)\quad c(T)\gamma(T)\frac{\partial T(r,l,t)}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda(T)r\frac{\partial T(r,l,t)}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial l}\left(\lambda(T)\frac{\partial T(r,l,t)}{\partial l}\right)+\frac{1}{\sigma(T)}\left(\frac{\partial H(r,l,t)}{\partial r}\right)^2$$

где $\overline{H}$ - вектор напряженности магнитного поля; $\sigma(T)$ - электрическая проводимость; $\overline{E}$ - вектор напряженности электрического поля; $\overline{D}$ - вектор плотности электрического потока; t - время; $\overline{B}$ - вектор плотности магнитного потока; $\gamma(T)$, $c(T)$, $\lambda(T)$ - соответственно, удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности нагреваемого металла; $\overline{V}$ - вектор скорости перемещения заготовки; $r\in[0;R]$ и $l\in[0;L]$ - соответственно, радиальная и продольная пространственные координаты, R и L - радиус и длина заготовки, соответственно.

В большинстве практических случаев требования к конечным температурным кондициям ОРП формулируются с помощью задания максимально допустимой величины ε отклонения температурного распределения $T(r,l,t)$ в конечный момент процесса нагрева $t=t^0$ от заданного температурного распределения $T^*(r,l)$:

$$(3)\quad \max_{r\in[0,R];l\in[0,L]}\left|T(r,l,t^0)-T^*(r,l)\right|\le\varepsilon.$$

В качестве сосредоточенного управляющего воздействия рассмотрим напряжение индуктора $u(t)$, которое связано нелинейной функцией $f(H(r,l,t),T(r,l,t))$, с напряженностью $H(r,l,t)$ магнитного поля на поверхности нагреваемого тела. Ограничение на управляющее воздействие $u(t)$ задается в виде диапазона его возможного изменения, в пределах допустимых границ $u_{\min}=0$ и $u_{\max}=const$:

$$(4)\quad u_{\min}\le u(t)\le u_{\max},\ t\in(0;t^0).$$

В случае, когда требуется обеспечить максимальную производительность ИНУ при заданных температурных кондициях нагреваемых изделий, в качестве критерия оптимальности выступает критерий быстродействия, минимизирующий длительность процесса нагрева t^0:

$$(5)\quad I_1=\int_0^{t^0}dt=t^0\to\min.$$

При необходимости достижения наименьшего разброса температурных кондиций заготовок от одного цикла обработки к другому, достижение максимальной точности нагрева при наличии резерва времени обеспечивает критерий, который может быть представлен в следующем виде:

$$(6)\quad I_2=\max_{r\in[0,R];l\in[0,L]}\left|T(r,l,t^0)-T^*(r,l)\right|\to\min.$$

Во многих случаях основную статью себестоимости процессов нагрева представляют энергетические затраты (расход потребляемой ИНУ мощности $P(t)$), которые и следует минимизировать, т.е. критерий оптимальности имеет вид:

$$(7)\quad I_3=\int_0^{t^0}P(t)dt\to\min,$$

Рассмотрим наиболее простой идеализированный вариант ЗОУ с полным объёмом информации об ОРП и предъявляемым к нему требованиям, считая, что возмущающие воздействия отсутствуют, и, не учитывая период транспортировки изделия к деформирующему обору-

дованию и технологические ограничения. Тогда можно сформулировать следующую общую постановку модельных ЗОУ по типовым критериям качества.

Требуется найти такой алгоритм изменения управляющего воздействия $u_{onm}(t)$ во времени, который обеспечивает перевод рассматриваемого ОРП, функция состояния которого $T(r,l,t)$ описывается уравнениями (1)-(2) с соответствующими краевыми условиями, из заданного начального состояния в требуемое конечное состояние $T^*(r,l)$ с допустимой абсолютной точностью ε, согласно (3), при минимально возможном значении выбранного критерия оптимальности из набора (5)-(7) в условиях заданных ограничений на управляющее воздействие вида (4). Для простоты будем далее считать начальное температурное состояние равномерным, принимая $T(r,l,0) = T_0(r,l) \equiv T_0 = const;\ \ r \in [0,R];\ l \in [0,L].$

2 Параметризация модельных задач оптимального управления

Известно [3-5], что в рамках сформулированных нелинейных задач оптимальное по быстродействию, точности нагрева и энергопотреблению управление $u_{onm}(t), t \in [0,t^0]$ есть релейная функция времени t:

$$(8)\quad u_{onm}(t) = \frac{u_{\max}}{2}\left[1+(-1)^{S+1}\right],\ \ t_{S-1} < t < t_S,\ \ s = \overline{1,N}.$$

Число $N \geq 1$ интервалов управления однозначно определяется заданной точностью нагрева ε и возрастает с уменьшением ε, а оптимальное управление заведомо задаётся с точностью до числа N и длительностей $\Delta_1, \Delta_2, \ldots, \Delta_N$ указанных интервалов, конкретные значения которых изначально неизвестны и должны быть найдены в процессе последующего расчёта. Тогда параметризованное представление управляющего воздействия (8) имеет вид [3-5]:

$$(9)\quad u_{onm}(t) = \frac{u_{\max}}{2}\left[1+(-1)^{j+1}\right],\ \sum_{i=1}^{j-1}\Delta_i < t < \sum_{i=1}^{j}\Delta_i,\ j = \overline{1,N}.$$

При этом условие (3) достижения заданных конечных температурных кондиций записывается в виде:

$$(10)\quad \Phi(\Delta) = \max_{r\in[0;R];l\in[0;L]}\left|T(r,l,\Delta) - T^*\right| \leq \varepsilon_0.$$

Дальнейшая задача оптимального управления сводится к определению таких длительностей, чередующихся интервалов нагрева и выравнивания температур, которые обеспечивают выполнение условия (10) за минимально возможное время, очевидно, равное сумме всех $\Delta_i, i = \overline{1, N}$. При этом в роли критерия оптимальности в задаче быстродействия выступает эта сумма:

$$(11)\quad I(\Delta) = \sum_{i=1}^{N}\Delta_i \to \min_{\Delta}.$$

В итоге, исходная задача оптимального по быстродействию управления сводится к задаче математического программирования (ЗМП) на минимум целевой функции (11) N переменных Δ_i с бесконечным числом ограничений, записываемых в форме требования (10), предъявляемого к конечному температурному состоянию ОРП, описываемого уравнениями (1)-(2).

В свою очередь ЗМП (10)-(11) может быть решена с помощью альтернансного метода оптимизации ОРП применительно к моделям конкретных технологических ПИНМ рассматриваемого класса.

В задаче на максимум абсолютной точности нагрева за заданное время $\tilde{t}^0$ параметризованное оптимальное управление имеет вид (9), как и в задаче быстродействия. В итоге эта задача сводится к ЗМП

$$(12)\quad I(\boldsymbol{\Delta}) = \max_{r\in[0;R];\, l\in[0;\,L]} \left| T(r,l,\boldsymbol{\Delta}) - T^* \right| \to \min_{\Delta};\ \Phi(\boldsymbol{\Delta}) = \sum_{i=1}^{N} \Delta_i = \tilde{t}^0$$

на минимум целевой функции $I(\boldsymbol{\Delta})$ с ограничением на $\Phi(\boldsymbol{\Delta})$, решение которой совпадает с решением задачи (10)-(11) [1-2].

В задаче оптимального по расходу энергии управления требуется найти такой закон изменения во времени оптимального управляющего воздействий $u_{onm}(t)$, стесненного ограничением (4), который позволяет получить в конце процесса нагрева требуемое распределение температуры $T^*(r,l)$ с заданной точностью ε, согласно (3), при минимально возможном значении критерия (7) в условиях моделирования ОРП уравнениями (1)-(2).

Известно [1, 2, 6], что оптимальное по расходу энергии управление также имеет вид (9), и, следовательно, в качестве критерия оптимальности может рассматриваться сумма длительностей нечетных интервалов управляющего воздействия. Тогда ЗМП принимает вид:

$$(13)\quad I_{\Im}(\boldsymbol{\Delta}) = \sum_{i=1,3,5,\ldots,N_1}^{N_1} \Delta_i \to \min_{\boldsymbol{\Delta}};\quad \Phi(\boldsymbol{\Delta}) = \max_{l\in[0;R];\, y\in[0;L]} \left| T(l,y,\boldsymbol{\Delta}) - T^*(r,l) \right| \le \varepsilon.$$

Зависимости $T(r,l,\boldsymbol{\Delta})$ от l, r и $\boldsymbol{\Delta}$ в задачах (10)-(11), (12), (13) могут быть найдены с помощью численных двумерных электротепловых моделей ПИНМ, либо в линейном приближении в явной аналитической форме разложения $T(r,l,\boldsymbol{\Delta})$ в ряд по собственным функциям соответствующей краевой задачи.

3 Решение задач параметрической оптимизация на базе альтернансного метода

ЗМП (10)-(11), (12), (13), к которым редуцируются сформулированные в разделе 1 модельные задачи оптимального по типовым критериям качества (5)-(7) управления, могут быть решены с помощью альтернансного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами. Данный метод опирается на качественные свойства температурных состояний оптимальных ПИНМ, подобные известным в математике свойствам наилучших равномерных приближений заданных функций к нулю [1, 2].

Поскольку альтернансный метод и базирующиеся на нем вычислительные процедуры детально описаны в литературе [1, 2, 7-12], ограничимся рассмотрением специфики применения метода в рамках рассматриваемых ЗОУ в условиях описания процесса нагрева двумерными нелинейными моделями.

Оптимальное управление, являющееся решением одной из сформулированных задач, отличается в каждом рассматриваемом случае от всех других N-интервальных управлений вполне определёнными длительностями $\Delta_1^0, \Delta_2^0, \ldots, \Delta_N^0$ интервалов постоянства, совокупность которых и является решением одной из ЗМП (10)-(11), (12), (13). Оптимальному значению $\boldsymbol{\Delta}^0$ вектора $\boldsymbol{\Delta}$ отвечает, в свою очередь, пространственное распределение температур $T(r,l,\boldsymbol{\Delta}^0)$ в конце оптимального процесса, которое должно удовлетворять соответствующим ограничениям и критерию оптимальности рассматриваемой задачи.

В теории альтернансного метода доказано [1-2], что температурное распределение $T(r,l,\boldsymbol{\Delta}^0)$ отличается от всех других конечных состояний $T(r,l,\boldsymbol{\Delta})$ при $\boldsymbol{\Delta} \ne \boldsymbol{\Delta}^0$ рядом свойств, на которых и базируется альтернансный метод. Основное свойство результирующего

распределения $T(r,l,\mathbf{\Delta^0})$ состоит в том, что число K точек $x_j^0=\{r_j^0,l_j^0\}$ по объему нагреваемой заготовки, в которых достигаются предельные допустимые абсолютные отклонения ε конечной температуры $T(r,l,\mathbf{\Delta^0})$ от требуемой T^*, всегда оказывается не меньшим числа N искомых параметров оптимального процесса, т.е. выполняются следующие соотношения:

$$\left|T(r_j^0,l_j^0,\mathbf{\Delta^0})-T^*\right|=\varepsilon,\ j=1,2,\ldots,K;\quad \mathbf{\Delta^0}=\left(\Delta_1^0,\Delta_2^0,\ldots,\Delta_N^0\right);$$

$$\frac{\partial T(r_i^0,l_i^0,\mathbf{\Delta^0})}{\partial l}=\frac{\partial T(r_i^0,l_i^0,\mathbf{\Delta^0})}{\partial r}=0;\ i=1,2,\ldots,K_1<K;\ \left(r_i^0,l_i^0\right)\in\left\{r_j^0,l_j^0\right\}, \tag{14}$$

$$K=\begin{cases}N,\ \text{если}\ \varepsilon_{\min}^{(N)}<\varepsilon<\varepsilon_{\min}^{(N-1)};\\ N+1,\ \text{если}\ \varepsilon=\varepsilon_{\min}^{(N)}.\end{cases}$$

Здесь $\varepsilon_{\min}^{(N)}$ – предельно достижимые отклонения результирующей температуры от заданной в классе управляющих воздействий с N интервалами постоянства, составляющие ряд неравенств:

$$\varepsilon_{\min}^{(1)}>\varepsilon_{\min}^{(2)}>\ldots>\varepsilon_{\min}^{(N)}>\varepsilon_{\min}^{(N+1)}>\ldots>\varepsilon_{\min}^{(N^*)}=\varepsilon_{\inf}\geq 0, \tag{15}$$

где $\varepsilon_{\inf}$ - предельно достижимая точность нагрева в классе кусочно-постоянных управлений вида (9) с любым числом интервалов постоянства.

Для рассматриваемого класса моделей число интервалов постоянства N оптимального управления однозначным образом связывается с заданным значением ε правилом:

$$N=S \text{ для всех } \varepsilon:\ \varepsilon_{\min}^{(S)}\leq\varepsilon=\varepsilon_0<\varepsilon_{\min}^{(S-1)}. \tag{16}$$

Указанные свойства (14), аналогии с одномерной задачей, а также непрерывный характер зависимостей $\mathbf{\Delta}^0$ и $T(r,l,\mathbf{\Delta}^0)$ от ε и физические свойства нестационарных температурных полей в ПИНМ в задаче быстродействия приводят к возможности построения в каждой из рассматриваемых ЗОУ систем уравнений, замкнутых относительно искомых параметров процесса. Решение данных систем приводит к решению исходных ЗОУ.

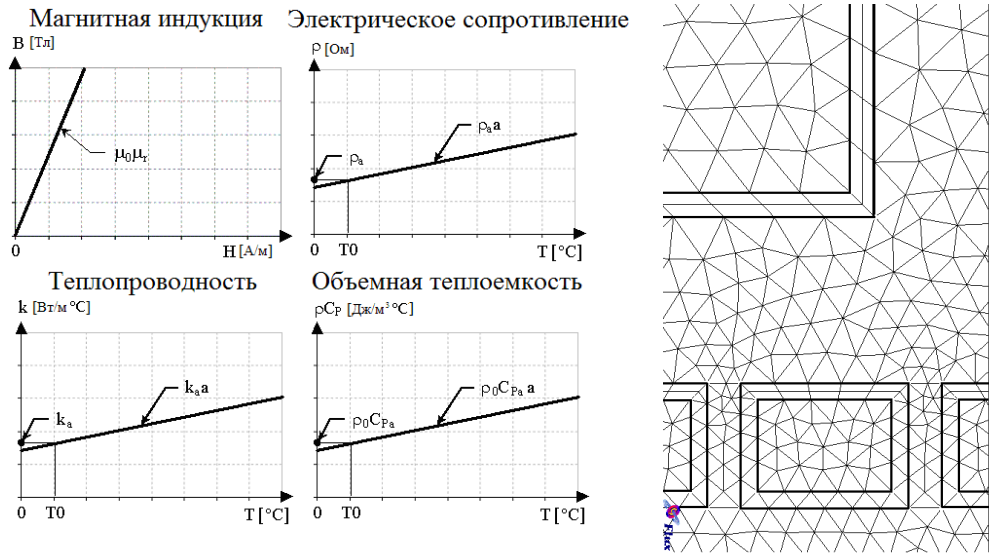
Рассмотрим решение сформулированных задач оптимального по типовым критериям качества управления процессом сквозного индукционного нагрева на частоте 50 Гц при $u_{\max}=470B$ алюминиевых цилиндрических слитков диаметром 0.5 м и длиной 1 м до температуры $450°C$. Конструктивные параметры индуктора: длина L=1.376 м, внутренний диаметр индуктора - 0.6 м, число витков - 69; размер витка - 0.016х0.012 м.

Конечно-элементный анализ взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей в процессе периодического индукционного нагрева проводится на базе специализированного пакета FLUX (Cedrat), в котором разработана численная двумерная электротепловая модель [13-14].

Теплофизические свойства алюминия проиллюстрированы графическими зависимостями на рисунке 1, а. Коэффициент лучистого теплообмена - 0,3, коэффициент конвективного теплообмена - 20. На рисунке 1, б представлено разбиение конечно-элементной сеткой нагревательной системы «индуктор-заготовка».

Поскольку решение задачи (12) оптимального по точности нагрева управления определяется однозначным образом по решениям ряда задач оптимального быстродействия (10)-(11) для различных значений ε, полученные ниже алгоритмы управления являются оптимальными одновременно по двум рассматриваемым критериям (5) и (6).

Задача оптимального по быстродействию и максимальной точности управления была решена для трех различных значений точности нагрева: $\varepsilon_{\min}^{(1)}$, $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ и $\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$ по приведенной в [1-2, 6, 12] методике решения двумерных ЗОУ процессом индукционного нагрева заготовок цилиндрической формы.



а б

Рисунок 1 – Теплофизические свойства алюминия (а) и конечно-элементная сетка нагревательной системы «индуктор-заготовка» (б)

При точности нагрева $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(1)}$, согласно основным соотношениям (14) альтернансного метода, оптимальное управление $u_{опт}(t)$ имеет один интервал нагрева длительностью Δ_1^0 с максимальным значением напряжения источника питания $u_{\max}$. При значениях точности нагрева $\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon = \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$ и $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ оптимальное управление $u_{опт}(t)$ является двухинтервальным. В этом случае после первого интервала нагрева с максимальным значением напряжения $u_{\max}$ следует интервал выравнивания температуры длительностью Δ_2^0 при отсутствии напряжения на источнике питания.

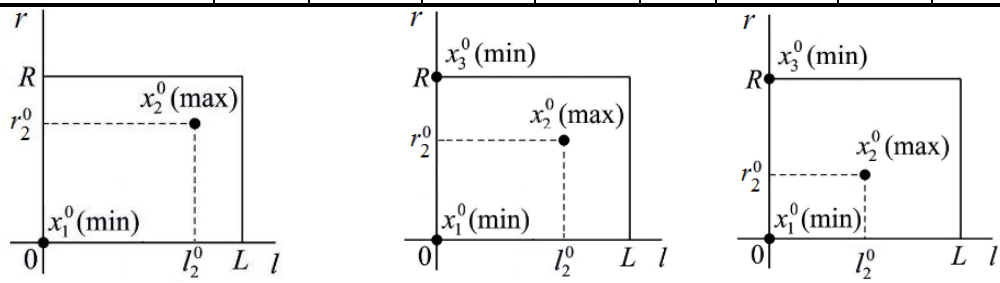
Соответствующие расчетные системы уравнений для каждого из рассматриваемых случаев точности конструируются в соответствии с (14) с учетом расположения точек с максимальной и минимальной температурами по объему цилиндра в конце оптимального по быстродействию и точности нагрева процесса (рисунок 2, а-в) [1-2, 6, 12].

В результате решения соответствующих систем уравнений, в которых зависимости $T(r, l, \Delta)$ от r, l и Δ рассчитываются по описанной выше численной двумерной электротепловой FLUX модели, получены основные параметры оптимальных по быстродействию и точности нагрева процессов управления, представленные в таблице 1: значения точности нагрева для каждого из рассмотренных случаев $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(1)}$, $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ и $\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon = \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$, длительности Δ_1^0 и Δ_2^0 интервалов нагрева и выравнивания температур, расход энергии $E_{инд}$ на нагрев заготовки.

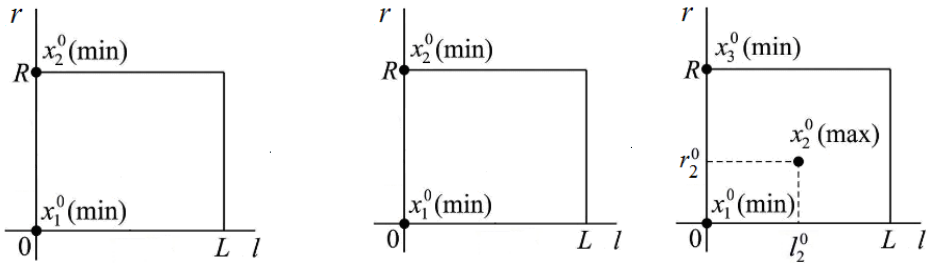
Задача на минимум расхода энергии также была решена для трех различных значений точности нагрева: $\varepsilon_{\min}^{(1)}$, $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ и $\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon = \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$, для которых, согласно альтернансному методу, оптимальное управление $u_{опт}(t)$ является двухинтервальным. Соответствующие системы уравнений записываются при расположении точек с максимальными температурными отклонениями от заданного значения, представленном на рисунке 2, г-е [13].

Таблица 1 – Результаты решения модельных ЗОУ

	Расчетные параметры оптимальных по быстродействию и точности ПИНМ				Расчетные параметры оптимальных по энергосбережению ПИНМ			
	$\varepsilon,^0C$	$\Delta_1^0, сек$	$\Delta_2^0, сек$	$E_{инд}$, $МДж$	$\varepsilon,^0C$	$\Delta_1^0, сек$	$\Delta_2^0, сек$	$E_{инд}$, $МДж$
$\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(1)}$	85	1552	-	228,8	85	1430	179	207,9
$\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon < \varepsilon_{\min}^{(1)}$	50,8	1640	45	243,4	39,1	1610	164	238,29
$\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$	25,4	1665	158	247,67	25,4	1665	158	247,67



а- при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(1)}$ б - при $\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$ в - при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$



г - при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(1)}$ д - при $\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon = \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$ е - при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$

(а)-(в) - в конце оптимального по быстродействию и точности нагрева процесса;
(г)-(е) - в конце оптимального по расходу энергии процесса

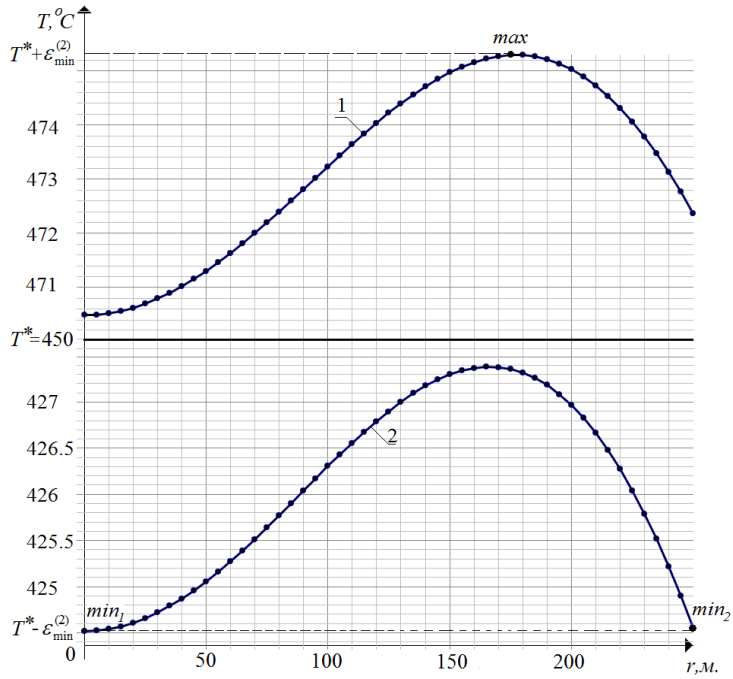
Рисунок 2 – Расположение точек с максимальной и минимальной температурами по объему цилиндра

Результаты решения задачи на минимум расхода энергии, полученные с помощью численной FLUX модели, представлены в таблице 1.

Радиальные температурные распределения для значения точности нагрева $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$, представленные на рисунке 3, совпадают в задачах на минимум расхода энергии, оптимального быстродействия и максимума точности нагрева.

На рисунке 4 приведены сравнительные результаты расчёта процессов индукционного нагрева массивного цилиндра, оптимальных по критериям быстродействия и расхода энергии при изменении требуемой точности нагрева ε в интервале от $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ до $\varepsilon_{\min}^{(1)}$. Согласно представленным данным, именно в этом диапазоне изменения ε_0 оптимальные алгоритмы управления по рассматриваемым критериям различаются, совпадая лишь на границе диапазона при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$. Таким образом, при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ полученный алгоритм оптимального управления является универсально-оптимальным, т.е. оптимальным по всем трем рассматриваемым критериям (5)-(7).

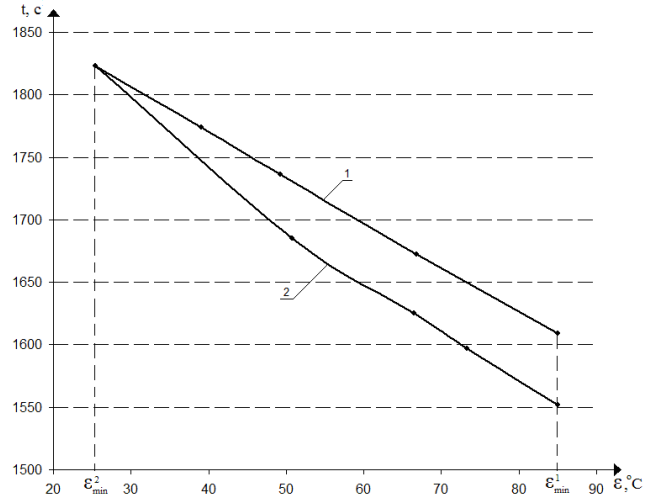
Полученные зависимости (рисунок 4) наглядно показывают, что при переходе от алгоритмов, оптимальных по быстродействию, к оптимальным по энергосбережению алгоритмам достигаются возрастающие с уменьшением точности нагрева выигрыш по расходу энергии и потери по производительности процесса.



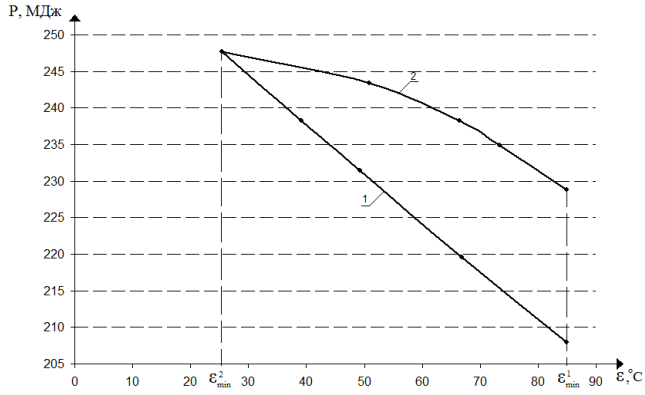
1 - в сечении, в котором достигается максимальная температура,
2 - в сечении, в котором достигается минимальная температура;

Рисунок 3 – Распределение температуры по радиусу заготовки в конце оптимального по быстродействию, точности и расходу энергии процесса нагрева для точности $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$

На рисунке 5 представлено температурное распределение по объему заготовки для значения точности $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$, при которой рассчитанный алгоритм управления является универсально-оптимальным.



а



б

1 - в задаче на минимум энергопотребления;
2 - в задаче оптимального быстродействия.

Рисунок 4 – Зависимости длительности процесса (а) и расхода энергии от точности нагрева (б) при $\varepsilon_{\min}^{(2)} \le \varepsilon \le \varepsilon_{\min}^{(1)}$

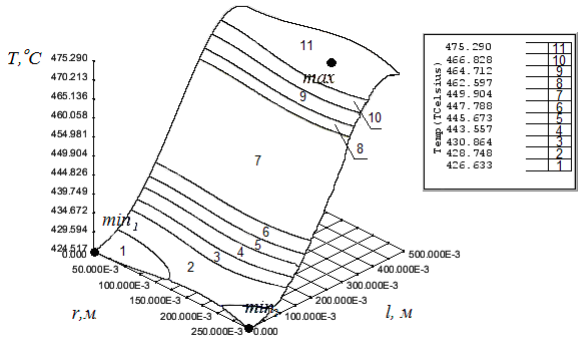


Рисунок 5 – Температурное поле по объему заготовки в конце оптимального по быстродействию, точности и расходу энергии процесса нагрева при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$

Заключение

В работе сформулированы задачи оптимального управления процессом периодического индукционного нагрева цилиндрических заготовок по критериям быстродействия, точности нагрева и минимума энергопотребления для трех различных значений точности нагрева заготовки. Исходные задачи редуцируются к задачам математического программирования, которые решаются на базе альтернансного метода прикладной оптимизации системами с распределенными параметрами. Анализ рассчитанных с помощью численной двумерной электротепловой модели оптимальных процессов показывает, что при переходе от оптимальных по быстродействию алгоритмов управления к алгоритмам, оптимальным по расходу энергии, достигается увеличение выигрыша по расходу энергии при уменьшении точности нагрева. При предельно достижимой в классе двухинтервальных управлений точности нагрева полученный алгоритм оптимального управления является универсально-оптимальным, т.е. оптимальным по всем трем рассматриваемым критериям.

Список литературы

[1] Rapoport E., Pleshivtseva Yu. Optimal Control of Induction Heating Processes. - London, N.Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, 2007. - 349 p.

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

[3] Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление нелинейными объектами технологической теплофизики // Автометрия, 2012. Т.48. №5. С. 3-13.

[4] E.Ya. Rapoport, Yu.E. Pleshivtseva. Optimal Control of Nonlinear Objects of Engineering Thermophysics // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2012. - Vol. 48. - No 5. - pp. 429-437.

[5] Рапопорт Э.Я. Оптимальное по быстродействию управление нелинейными объектами технологической теплофизики / Э.Я. Рапопорт// Элементы и системы опт. идент. и упр. технолог. процессом. – Тула, 1996. – С.81 – 91.

[6] Шарапова О.Ю. Численное моделирование и оптимальное управление процессами индукционного нагрева цилиндрических заготовок под обработку давлением: Автореф. дисс… канд. техн. наук. – Самара, 2011. – 22 с.

[7] *Плешивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я.* Метод последовательной параметризации управляющих воздействий в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами // Известия РАН. Теория и системы управления, 2009. №3. С. 22-33.

[8] *Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э.* Алгоритмически точный метод параметрической оптимизации в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами // Автометрия, 2009. т.45. №5. С. 103-112.

[9] *Э.Я. Рапопорт, Ю.Э. Плешивцева* Оптимизация систем с распределенными параметрами: программные и позиционные стратегии управления// Известия Южного Федерального университета. Технические науки. - 2011. - №6 (119). - С. 180-192.

[10] *Yu.E.Pleshivtseva, E.Ya. Rapoport* 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.

[11] *E.Ya. Rapoport, Yu.E.Pleshivtseva.* 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.

[12] *Плешивцева Ю.Э., Шарапова О.Ю.* Энергосберегающие алгоритмы оптимального управления процессами индукционного нагрева// Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки». – Самара: СамГТУ, 2011, № 4 (32), С. -172-180.

[13] *Шарапова О. Ю.* Численное моделирование процесса периодического индукционного нагрева на базе конечно-элементного программного пакета FLUX / О.Ю. Шарапова // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2011. – №7 (28). – С. 180 – 185.

ПРОБЛЕМА УПРАВЛЯЕМОСТИ В СИСТЕМАХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Э.Я. Рапопорт

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
cscmp@iccs.ru
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *система с распределенными параметрами, программная управляемость, управляемость по стационарному состоянию, интегральные уравнения, внутренние и граничные управляющие воздействия*

Abstract

The controllability problem of distributed parameter systems is considered. Necessary and sufficient conditions of controllability for the different type control actions are established. Examples showing an opportunity of using these results for applied problems, constituting also a point of independent interest are presented.

Введение

Решение любой задачи автоматического управления становится возможным только в соответствующих постановочным аспектам условиях управляемости объекта, приобретающих тем самым первостепенную роль при определении принципиальной возможности достижения требуемого поведения управляемой величины [1].

Проблема управляемости оказывается наиболее сложной применительно к объектам с распределенными параметрами (ОРП) [2-5], для которых ее практическая значимость существенно возрастает ввиду неуправляемости ОРП в целом ряде случаев относительно типичных для приложений требуемых конечных состояний, в том числе, по характерной причине их несогласованности с граничными условиями соответствующей краевой задачи [5, 6].

Понятие управляемости ОРП обычно сводится к существованию допустимых по априори фиксируемым условиям управляющих воздействий, переводящих объект за некоторое время на заданное целевое множество конечных состояний при любых возмущениях заранее заданного класса [3-5]. Подобное определение формулирует требования, обеспечивающие достижимость целевого множества, оставляя свободу выбора реализуемых алгоритмов их выполнения. Большое практическое значение имеет малоисследованная конкретизированная постановка (называемая далее задачей программной управляемости), в которой необходимо обеспечить перевод объекта в требуемое конечное состояние на заданном множестве программных траекторий в пространстве состояний ОРП [1].

Именно решение такой задачи открывает возможные пути синтеза замкнутых систем автоматического управления ОРП с обратными связями, реализующими требуемую динамику движения объекта к заданному целевому множеству.

Исследование задач управляемости в бесконечномерном пространстве состояний ОРП связано с серьезными теоретическими затруднениями, особенно для пространственно-многомерных моделей объекта. В частности, такие задачи во многих случаях сводятся к соответствующей бесконечномерной проблеме моментов с трудно проверяемыми достаточными условиями существования их решений [2, 7, 8].

В настоящей работе предлагается другая методика решения непосредственно задачи программной управляемости ОРП, использующая более простые условия ее разрешимости применительно к линейным моделям ОРП параболического типа различной пространственной размерности с внутренними и граничными управляющими воздействиями, в том числе с заданным по условиям технической реализации характером их пространственного распределения. Устанавливаются существенные зависимости достижимых областей пространственно-временного распределения состояний ОРП от размерности пространственных аргументов управляющих воздействий.

1 Модели объекта управления

Пусть управляемая величина $Q(X,t)$ объекта с распределенными параметрами описывается в зависимости от времени t и пространственных координат $X \in V;\ X = (x_i);\ i = \overline{1,j};\ 1 \le j \le 3$, в пределах заданной односвязной области V с кусочно-гладкой поверхностью S линейным неоднородным уравнением в частных производных параболического типа [9]

$$(1)\quad \frac{\partial Q}{\partial t} = \sum_{i=1}^{j} a_i(X)\,\frac{\partial^2 Q}{\partial x_i^2} + \sum_{i=1}^{j} b_i(X)\frac{\partial Q}{\partial x_i} + c(X)Q + u(X,t)$$

с начальными и граничными условиями

$$(2)\quad Q(X,0) = f(X),\ X \in \overline{V} = V \cup S;$$

$$(3)\quad \frac{\partial Q}{\partial N} + KQ = g(X,t),\ X \in S,$$

внутренним $u(X,t)$ или (и) граничным $g(X,t)$ управляющими воздействиями, где N - вектор внешней нормали к S; $K = const \ge 0$ и дифференциальный оператор в правой части (1) самосопряженный или может быть приведен к самосопряженной форме.

Здесь $f(X)$ и коэффициенты $a_i(X), b_i(X), c(X)$ являются известными достаточно гладкими функциями своих аргументов, причем не все a_i в (1) одновременно равны нулю.

Общее решение краевой задачи (1) – (3), понимаемое в обобщенном смысле [10], может быть получено в следующем виде [9]

$$(4)\quad Q(X,t) = \int_0^t \int_V u(Y,\tau)G(X,Y,t-\tau)\,dV\,d\tau + \int_V f(Y)G(X,Y,t)\,dV + \int_0^t \int_S g(Y,\tau)G(X,Y,t-\tau)\,dS\,d\tau,$$

где Y и τ - переменные интегрирования соответственно по пространственным координатам и времени, и функция Грина $G(X,Y,t-\tau)$ рассматриваемого ОРП определяется методом конечных интегральных преобразований в форме ее разложения в бесконечный сходящийся в среднем ряд по собственным функциям $\Phi_n(X), \Phi_n(Y)$ модели (1) – (3) [4, 7, 9, 11, 12]:

$$(5)\quad G(X,Y,t-\tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Phi_n(X)\Phi_n(Y)r(Y)}{\|\Phi_n\|^2} \exp\left[-M_n^2(t-\tau)\right].$$

Здесь $\|\Phi_n\|^2$ - квадрат нормы собственной функции Φ_n, $r(Y)$ – весовая функция конечного интегрального преобразования и M_n^2 - собственные числа.

Подобное разложение управляемой величины $Q(X,t)$ в сходящийся в среднем бесконечный ряд по ортогональной системе функций $\Phi_n(X)$:

$$(6)\quad Q(X,t)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\overline{Q}_n(t)\Phi_n(X)}{\|\Phi_n\|};\ \overline{Q}_n(t)=\int_V Q(X,t)\frac{\Phi_n(X)}{\|\Phi_n\|}r(X)\,dV$$

приводит после подстановки (5), (6) в (4) к описанию модели объекта бесконечной системой обыкновенных дифференциальных уравнений относительно модальных составляющих $\overline{Q}_n(t)$ управляемой величины:

$$(7)\quad \frac{d\overline{Q}_n}{dt}=-M_n^2\overline{Q}_n+F_n(t);\ \overline{Q}_n(0)=\bar{f}_n;\ F_n(t)=\bar{u}_n(t)+F_n^{(1)}(t),$$

$$(8)\quad F_n^{(1)}(t)=\int_S g(Y,t)\frac{\Phi_n(Y)}{\|\Phi_n\|}r(Y)\,dS;$$

$\bar{f}_n$ и $\bar{u}_n$ - определяемые аналогично (6) модальные составляющие начального состояния $f(\bar{x})$ и внутреннего управления $u(x,t)$.

$$(9)\quad \bar{f}_n=\int_V f(Y)\frac{\Phi_n(Y)}{\|\Phi_n\|}r(Y)\,dV;\ \bar{u}_n(t)=\int_V u(Y,t)\frac{\Phi_n(Y)}{\|\Phi_n\|}r(Y)\,dV,$$

которые восстанавливаются по этим составляющим в форме разложения в ряд, подобный (6):

$$(10)\quad f(X)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\bar{f}_n\Phi_n(X)}{\|\Phi_n\|};\ u(X,t)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\bar{u}_n(t)\Phi_n(X)}{\|\Phi_n\|}.$$

При различных управляющих воздействиях $g_i(Y,\tau)$ на разных гладких частях S_i поверхности $S=\sum_{i=1}^{q}S_i$ при $q>1$ последнее слагаемое в решении (4) заменяется суммой [9]

$$(11)\quad \sum_{i=1}^{q}\int_0^t\int_{S_i}G_i(X,Y,t-\tau)\,g_i(Y,\tau)\,dS_i\,d\tau.$$

Имея в виду, что анализ управляемости рассматриваемого объекта должен быть выполнен отдельно для каждого из различающихся управлений $g_i(Y,\tau)$ в (11), будем считать далее, что в такой ситуации $g(Y,\tau)$ в (4) задается только на одной из частей S_β граничной поверхности S, полагая в (11) $g_\beta(Y,\tau)=g(Y,\tau),\ \beta\in\{\overline{1,q}\};\ g_i(Y,\tau)=0$ для всех $i\neq\beta$ и $S=S_\beta$; $G(X,Y,t-\tau)=G_\beta(X,Y,t-\tau)$ в (4).

2 Редукция к интегральным уравнениям Фредгольма в изображениях Лапласа

Полагая для простоты $f(X)=0$ в (2) без потери общности получаемых далее результатов, запишем равенство (4) в изображениях Лапласа по переменной t отдельно для краевой задачи (1) – (3) с внутренним (при $g(X,t)=0$) и граничным (при $u(X,t)=0$) управлением:

$$(12)\quad \widetilde{Q}(X,p)=\int_V \widetilde{G}(X,Y,p)\widetilde{u}(Y,p)\,dV;\ X,Y\in V;$$

$$(13)\quad \widetilde{Q}(X,p)=\int_S \widetilde{G}(X,Y,p)\widetilde{g}(Y,p)\,dS;\ X\in V,\ Y\in S,$$

где p – комплексная переменная преобразования Лапласа и $\widetilde{Q}(X,p)$, $\widetilde{G}(X,Y,p)$, $\widetilde{u}(Y,p)$, $\widetilde{g}(Y,p)$ - изображения функций соответственно $Q(X,t),G(X,Y,t),u(Y,\tau),g(Y,\tau)$.

Если граничная поверхность S в (3), или ее часть S_β в (11), на которой действует управление $g(X,t)$, задается в декартовой системе координат $X=(x,y,z)$ в явной форме, например, уравнением $z=f_1(x,y)$, то поверхностный интеграл первого типа в (13) сводится при $Y=(\xi,\eta,v=f_1(\xi,\eta))$ к вычислению обыкновенного двойного интеграла по области D, являющейся проекцией S на плоскость (x,y) [13]:

$$(14)\quad \widetilde{Q}(X,p)=\int_D \widetilde{G}(X,\xi,\eta,f_1(\xi,\eta),p)\,\widetilde{g}(\xi,\eta,f_1(\xi,\eta),p)\sqrt{1+\left(\frac{\partial f_1}{\partial\xi}\right)^2+\left(\frac{\partial f_1}{\partial\eta}\right)^2}\,d\xi\,d\eta.$$

Аналогичный результат имеет место и в любой другой системе криволинейных координат [12, 13].

Проблема программной управляемости сводится теперь к определению условий разрешимости относительно искомых управляющих воздействий $\widetilde{u}(Y,p)$ или $\widetilde{g}(Y,p)$ интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода [14], образуемых параметрически зависимыми от оператора p равенствами (12) или (14) для заданных в форме $\widetilde{Q}(X,p)$ программ изменения $Q(X,t)$ на некотором временном интервале.

Интегральные уравнения (12) и (13) с симметричными или приводимыми к симметричным в силу (5) ядрами имеют при достаточно гладких зависимостях $\widetilde{Q}(X,p)$ от X единственное решение в классе интегрируемых с квадратом функций $\widetilde{u}(Y,p)$, $\widetilde{g}(Y,p)$ пространственных переменных, представляемое в форме разложения в сходящийся в среднем бесконечный ряд по собственным функциям ядра $\Phi_n^*(Y)$ или $\Phi_n^{**}(Y)$:

$$(15)\quad \widetilde{u}(Y,p)=\sum_{n=1}^{\infty}\widetilde{K}_{1n}(p)\Phi_n^*(Y),\ Y\in V;$$

$$(16)\quad \widetilde{g}(Y,p)=\sum_{n=1}^{\infty}\widetilde{K}_{2n}(p)\,\Phi_n^{**}(Y),\ Y\in D$$

если сумма квадратов коэффициентов этого ряда, зависящих от $\overline{Q}_n$ в (6), также образует сходящиеся ряды [14]:

$$(17)\quad \sum_{n=1}^{\infty}\widetilde{K}_{1n}^2(p)<\infty;\ \sum_{n=1}^{\infty}\widetilde{K}_{2n}^2(p)<\infty.$$

Сходимость этих рядов является, таким образом, необходимым и достаточным условием разрешимости рассматриваемой задачи программной управляемости, выполнение которого позволяет найти в указанной выше форме управляющие воздействия, реализующие предъявляемые требования к программным траекториям движения объекта.

Соответствующие решения интегральных уравнений существуют только при совпадении областей определения пространственных аргументов X и Y выхода объекта и управляющих воздействий [14].

Это означает, что если задача программной управляемости может быть решена для заданных траекторий $\widetilde{Q}(X,p)$, $X \in V$ во всей области пространственного распределения управляемой величины при внутреннем управлении $\widetilde{u}(Y,p)$, $Y \in V$ в (12), то программная управляемость при граничном управляющем воздействии $\widetilde{g}(Y,p)$, $Y=(\xi,\eta,f_1(\xi,\eta))$ в (14) осуществима для $\widetilde{Q}(X,p)$ лишь на некоторой поверхности $z=f_2(x,y)$ при $X=(x,y,f_2(x,y))$, где $\xi,\eta \in D;\ x,y \in D$.

Сказанное приводит к существенным особенностям задачи граничной управляемости, для которой решение интегрального уравнения (14) значительно усложняется в общем случае необходимостью определения собственных функций его ядра в области D, не совпадающих (в отличие от задачи (12)) с $\Phi_n(X)$ в (5) при задании произвольных достаточно гладких поверхностей $v=f_1(\xi,\eta)$ и $z=f_2(x,y)$.

3 Задача программной управляемости с внутренними управляющими воздействиями

Оригинал решения интегрального уравнения (12) может быть получен [14] непосредственно в виде (10), где модальные составляющие $\overline{u}_n(t)$ управляющего воздействия $u(X,t)$, $X \in V$, связываются с требуемым поведением $\overline{Q}_n^*(t)$ временных мод $\overline{Q}_n(t)$ управляемой величины $Q(X,t)$, $X \in V$, дифференциальными уравнениями (7) (при $F_n^{(1)}(t)=0,\ n=1,2,...$):

$$(18)\quad u(X,t)=\sum_{n=1}^{\infty}\left(M_n^2\overline{Q}_n^*+\frac{d\overline{Q}_n^*}{dt}\right)\frac{\Phi_n(X)}{\|\Phi_n\|},$$

а $\overline{Q}_n^*(t)$, $\dfrac{d\overline{Q}_n^*}{dt}$ определяются по заданной программе $Q^*(X,t)$ соотношениями вида (6):

$$(19)\quad \overline{Q}_n^*(t)=\int_V Q^*(X,t)\frac{\Phi_n(X)}{\|\Phi_n\|}r(X)\,dV;\ \frac{d\overline{Q}_n^*}{dt}=\int_V \frac{\partial Q^*(X,t)}{\partial t}\frac{\Phi_n(X)}{\|\Phi_n\|}r(X)\,dV.$$

Проблема управляемости ОРП (1) – (3) в ее типичной постановке заключается в определении условий существования управляющих воздействий, переводящих объект в заданное состояние $Q^*(X,t_1)$, $X \in V$, в конечный момент времени $t=t_1$ при отсутствии каких-либо ограничений на характер программных траекторий $Q^*(X,t)$, $t \in [0,t_1]$, его достижения кроме требований к конечной точке при $t=t_1$ [2-5].

Подобная задача обычно сводится к решению относительно $u(X,t)$ бесконечномерной проблемы моментов, образуемой решениями системы уравнений (7) при $t = t_1$. При этом достаточные условия существования такого решения оказываются сложными и труднопроверяемыми [2-4, 7, 8].

Рассмотрим далее характерный для приложений частный случай этой задачи применительно к управляемости по асимптотически устойчивому стационарному состоянию объекта $Q^{**}(X)$ при $t_1 \to \infty$, отвечающему предельным соотношениям

$$(20)\quad \lim_{t_1\to\infty} Q^{*}(X,t_1) = Q^{**}(X); \qquad \lim_{t_1\to\infty} \frac{\partial Q^{*}(X,t_1)}{\partial t} = \frac{\partial Q^{**}(X)}{\partial t} = 0,\ X \in V,$$

с модальными составляющими в (19)

$$(21)\quad \overline{Q}_n^{**} = \int_V Q^{**}(X)\frac{\Phi_n(X)}{\|\Phi_n\|} r(X)\,dV = \text{const}; \frac{d\overline{Q}_n^{**}}{dt} = 0,\ n = 1,2,...$$

которые соответствуют, в частности, конечной точке заданной программной траектории в типичных системах автоматической стабилизации выхода объекта [5].

При $t = t_1 \to \infty$ модальные составляющие $M_n^2\overline{Q}_n^{*} + \frac{d\overline{Q}_n^{*}}{dt}$ управляющего воздействия $u(X,t_1)$ в (18), равные $M_n^2\overline{Q}_n^{**} + \frac{d\overline{Q}_n^{**}}{dt}$, превращаются на основании (21) в соответствующие составляющие $M_n^2\overline{Q}_n^{**}$ стационарного состояния $Q^{**}(X)$, что приводит, согласно (18), к неизменному во времени управлению

$$(22)\quad u(X,t_1) = u(X) = \sum_{n=1}^{\infty} M_n^2\overline{Q}_n^{**}\frac{\Phi_n(X)}{\|\Phi_n\|}, \quad (3.4)$$

которое заведомо обеспечивает управляемость рассматриваемого объекта по конечному пространственному распределению $Q^{**}(x)$ в классе интегрируемых с квадратом в области V функций $u(X)$, если согласно (17), выполняется сравнительно просто проверяемое условие

$$(23)\quad \sum_{n=1}^{\infty}\left(M_n^2\overline{Q}_n^{**}\right)^2 < \infty$$

ограниченности суммы квадратов коэффициентов ряда (22).

Подобно (22), (23), управляющее воздействие (18) обеспечивает управляемость рассматриваемого объекта по заданной траектории $Q^{*}(X,t)$, если выполняется неравенство

$$(24)\quad \sum_{n=1}^{\infty}\left(M_n^2\overline{Q}_n^{*} + \frac{d\overline{Q}_n^{*}}{dt}\right)^2 < \infty,\ t \in (0,t_1)$$

для требуемого поведения ее временных мод на всем протяжении процесса управления длительностью t_1.

Сходимость ряда (24) в этом случае всегда обеспечивается для любой заданной траектории $Q^{*}(X,t)$ при выполнении условия (23) для стабилизируемого стационарного состояния, если согласно теоремам о сравнении положительных рядов выполняется неравенство [19]:

(25) $\lim\limits_{n\to\infty}\dfrac{\left(M_n^2\overline{Q}_n^* + \dfrac{d\overline{Q}_n^*}{dt}\right)^2}{(M_n^2\overline{Q}_n^{**})^2} = C^* < \infty,\ t \in (0,t_1)$.

Характер пространственного распределения управляющих воздействий $u(X,t)$ во многих прикладных задачах диктуется техническими возможностями их реализации и задается проектными решениями объекта управления следующего вида [5, 18]:

(26) $u(X,t) = \sum\limits_{i=1}^{\rho} \upsilon_i(t) F_i^*(X)$

в форме, не совпадающей с требуемыми, согласно (18) зависимостями, с заранее фиксируемыми интегрируемыми с квадратом функциями $F_i^*(X)$ пространственных координат $X \in V$ (чаще всего, кусочно-постоянного характера) и искомыми $\rho \geq 1$ сосредоточенными управляющими воздействиями $\upsilon_i(t),\ i = \overline{1,\rho}$.

При подобном описании $u(X,t)$ интегральное уравнение (12) сводится к системе ρ линейных алгебраических уравнений

(27) $\widetilde{Q}^*(X_j,p) = \sum\limits_{i=1}^{\rho} W_{Xi}(X_j,p)\widetilde{\upsilon}_i(p),\ j = \overline{1,\rho};\ X_j \in V$ (3.23)

относительно изображений $\widetilde{\upsilon}_i(p)$ с известными передаточными функциями распределенных X-блоков [3, 17]

(28) $W_{Xi}(X_j,p) = \int\limits_V \widetilde{G}(X_j,Y,p)F_i^*(Y)dV;\ i,j = \overline{1,\rho}$,

решение которой может быть получено только для ρ заранее фиксируемых точек $X_j \in V,\ j = \overline{1,\rho}$, и следовательно в данной ситуации можно обеспечить программную управляемость объекта лишь применительно к заданным траекториям изменения управляемой величины в этих точках.

Здесь, согласно (5), выражения $W_{Xi}(X_j,p)$ в (28) представляются в виде

(29) $W_{Xi}(X_j,p) = \sum\limits_{n=1}^{\infty}\dfrac{\Phi_n(X_j)}{\|\Phi_n\|(p+M_n^2)}\overline{F}_{in}^*;\ \overline{F}_{in}^* = \int\limits_V F_i^*(Y)\dfrac{\Phi_n(Y)}{\|\Phi_n\|}r(Y)dV$.

Нетрудно показать, что в силу определения по (29) модальных составляющих $\overline{F}_{in}^*$ функций $F_i^*(Y)$ все бесконечные ряды в (29) сходятся в среднем, их суммы отличны от нуля, и в условиях линейной независимости $\widetilde{Q}(X_j,p),\ j = \overline{1,\rho},\ \rho > 1$

(30) $E(p) = \det[W_{Xi}(X_j,p)] \neq 0;\ i,j = \overline{1,\rho}$.

В таком случае искомые управления определяются по заданному поведению $\widetilde{Q}^*(X_j,p)$ формулами Крамера [20]:

(31) $\widetilde{\upsilon}_i(p) = \sum\limits_{j=1}^{\rho}\dfrac{E_{ji}(p)}{E(p)}\widetilde{Q}^*(X_j,p),\ i = \overline{1,\rho}$,

где $E_{ji}(p)$ - алгебраическое дополнение j-го элемента i-го столбца E, и сумма в (31) имеет ограниченные значения коэффициентов при $\widetilde{Q}(X_j, p)$ для всех $i = \overline{1,\rho}$.

В итоге, вычисляемые (точно или приближенно с допустимой погрешностью) после перехода к оригиналам в (31) управляющие воздействия $\upsilon_i(t), i = \overline{1,\rho}$, обеспечивают программную управляемость ОРП по любым достаточно гладким и ограниченным на $[0, t_1]$ траекториям $Q^*(X_j, t)$, в заданных точках $X_j \in V$, $j = \overline{1,\rho}$, в том числе путем построении многомерной системы автоматического управления по задающим воздействиям $Q^*(X_j, t)$.

Приближенное решение задачи программной управляемости с управляющими воздействиями (26) для заданной траектории $Q^*(X,t)$ во всей области $V \ni X$ может быть получено, если каждая из функций $F_i^*(X)$ в (26) и $Q(X,t)$, $X \in V$, с удовлетворительной точностью описывается поведением только конечного числа $N = \rho$ их модальных составляющих, соответственно $\overline{F}_{in}^*$, $n = \overline{1,\rho}$, $i = \overline{1,\rho}$ в (29) и $\overline{Q}_n$, $n = \overline{1,\rho}$ в (7) [5, 17].

В таком случае, согласно (26)

$$(32)\quad \overline{u}_n(t) = \sum_{i=1}^{\rho} \upsilon_i(t)\, \overline{F}_{in}^*,\ n = \overline{1,\rho}$$

и равенства (32) образуют систему ρ линейных уравнений относительно ρ управлений $\upsilon_i(t)$, решение которой имеет подобный (31) вид

$$(33)\quad \upsilon_i(t) = \sum_{n=1}^{\rho} \frac{E_{ni}^*}{E^*}\, \overline{u}_n(t),\ i = \overline{1,\rho}$$

с ненулевым в условиях малостеснительных допущений [5] определителем

$$(34)\quad E^* = \det[\overline{F}_{in}^*];\ i, n = \overline{1,\rho}.$$

Полагая в (33) согласно укороченной системе уравнений (7) при $F_n^{(1)} = 0$

$$\overline{u}_n(t) = M_n^2 \overline{Q}_n^* + \frac{d\overline{Q}_n^*}{dt},\ n = \overline{1,\rho},$$

получаем реализуемое в СМУ ρ модами $\overline{Q}_n^*$, $n = \overline{1,\rho}$ [5, 17] управление (26)

$$(35)\quad u(X,t) = \sum_{i=1}^{\rho} F_i^*(X) \sum_{n=1}^{\rho} \frac{E_{ni}^*}{E^*} \left(M_n^2 \overline{Q}_n^* + \frac{d\overline{Q}_n^*}{dt} \right),$$

обеспечивающее программную управляемость по заданной траектории $Q^*(X,t)$, $X \in V$ с точностью, определяемой выбором числа ρ в (26), для заданных гладких и ограниченных зависимостей $\overline{Q}_n^*(t)$, $n = \overline{1,\rho}$, уже во всей области V.

Поскольку решение описывающей программную траекторию $Q^*(X,t)$ бесконечной системы (7) при $F_n^{(1)} = 0$ с правыми частями, удовлетворяющими усиленным условиям Коши-Липшица в силу сходимости рядов в (6), (10), с любой допустимой погрешностью аппроксимируется решением укороченной системы, образуемой учетом только достаточно большого

числа $\rho = \rho_0 < \infty$ ее первых уравнений [21], то и требуемая точность описания $u(X,t)$, определяемая в зависимости от точности описания $Q^*(X,t)$, может быть обеспечена при выборе $\rho = \rho_0$ в (35).

4 Задача программной управляемости с граничными управляющими воздействиями

Оригинал решения интегрального уравнения (13) уже нельзя получить, подобно решению (12) в задаче с внутренним управлением $u(X,t)$ в виде, аналогичном (18), поскольку в дифференциальных уравнениях (7) при $\bar{u}_n = 0$ функции $F_n^{(1)}(t)$, заданные в форме поверхностных интегралов в (8), уже не являются модальными составляющими граничного управления $g(Y,t)$ в области V.

Рассмотрим далее типичные случаи правильной формы области V и ее кусочно-гладкой границы S в многомерных моделях ОРП (1) – (9), для которых удается привести интегральное уравнение (14) (или его аналоги в другой системе координат) для проекции D, геометрически подобной S, к виду, аналогичному (12) при $z = z_c = \text{const}$:

$$(36)\quad \widetilde{Q}(x,y,z_c,p) = \int_D \widetilde{H}(x,y,z_c,\xi,\eta,p)\,\widetilde{g}(\xi,\eta,p)\,d\xi d\eta$$

$$(x,y) \in D;\ (\xi,\eta) \in D;\ (x,y,z_c) \in V$$

с граничным управлением $\widetilde{g}(\xi,\eta,p)$, зависящим только от пространственных аргументов в D и симметричным или приводимым к симметричному ядром $\widetilde{H}$, имеющим известные собственные функции в D.

Для заданных в пределах каждого сечения области V плоскостью $z = z_c = \text{const}$ достаточно гладких и ограниченных траекторий $\widetilde{Q}(x,y,z_c,p)$ (и только для траекторий в таких сечениях) уравнение (36) имеет единственное решение в классе интегрируемых с квадратом функций $\widetilde{g}(\xi,\eta,p)$ вида (18) при $X = (x,y)$ [14], если выполняется условие его существования типа (24), которое опять можно рассматривать в качестве необходимого и достаточного условия программной управляемости ОРП.

Редукция уравнения (14) к виду (36) может быть выполнена следующим образом.

Последовательное применение конечных интегральных преобразований [11, 12] в области D по пространственным аргументам x,y граничного управляющего воздействия $\widetilde{g}(x,y,p)$ к уравнениям модели объекта (1) – (3), записанным в изображениях Лапласа по переменной t, приводит при канонической форме области V и границы S к обыкновенному дифференциальному уравнению по переменной z относительно модальной составляющей $\widetilde{\widetilde{Q}}_n(z,p)$ такого двукратного преобразования $\widetilde{Q}(x,y,z,p)$ с соответствующими граничными условиями.

Решение этой задачи может быть получено стандартными методами в следующем виде

$$(37)\quad \widetilde{\widetilde{Q}}_n(z,p) = \widetilde{H}_n(z,p)\,\widetilde{\widetilde{g}}_n(p);\ \ \widetilde{\widetilde{g}}_n(p) = \int_D \widetilde{g}(\xi,\eta,p)\frac{\Phi_n^*(\xi,\eta)}{\left\|\Phi_n^*\right\|} r(\xi,\eta)\,d\xi d\eta\ ,$$

где $\widetilde{H}_n(z,p)$ - задаваемая таким решением явная функция аргументов z и p, а $\widetilde{\widetilde{g}}_n$ - независящие от z моды граничного управления $\widetilde{g}(\xi,\eta,p)$, определяемые аналогично (9) и согласно

(37) известными собственными функциями Φ_n^* конечных интегральных преобразований в области D.

В итоге, $\widetilde{Q}(x,y,z,p)$ восстанавливается подобно (6) в форме бесконечного ряда

$$(38)\quad \widetilde{Q}(x,y,z,p)=\sum_{n=1}^{\infty}\widetilde{\widetilde{\widetilde{Q}}}_n(z,p)\frac{\Phi_n^*(x,y)}{\left\|\Phi_n^*\right\|},$$

который с подстановками (37) и приводит к интегральному уравнению вида (36)

$$(39)\quad \widetilde{Q}(x,y,z_c,p)=\int_D\left[\sum_{n=1}^{\infty}\widetilde{H}_n(z_c,p)\frac{\Phi_n^*(x,y)\Phi_n^*(\xi,\eta)}{\left\|\Phi_n^*\right\|^2}r(\xi,\eta)\right]\widetilde{g}(\xi,\eta,p)\,d\xi\,d\eta$$

с ядром

$$(40)\quad \widetilde{H}(x,y,z_c,\xi,\eta,p)=\sum_{n=1}^{\infty}\widetilde{H}_n(z_c,p)\frac{\Phi_n^*(x,y)\Phi_n^*(\xi,\eta)}{\left\|\Phi_n^*\right\|^2}r(\xi,\eta).$$

Искомое управление $\widetilde{g}(\xi,\eta,p)$, $\xi,\eta\in D$, определяется его разложением в ряд вида (38)

$$(41)\quad \widetilde{g}(\xi,\eta,p)=\sum_{n=1}^{\infty}\widetilde{\widetilde{\widetilde{g}}}_n(p)\frac{\Phi_n^*(\xi,\eta)}{\left\|\Phi_n\right\|},$$

сходимость суммы квадратов коэффициентов которого, определяемых подобно (18) по заданному поведению мод управляемой величины [14], и обеспечивает программную управляемость по траекториям $\widetilde{Q}(x,y,z,p)$ в сечениях $z=z_c=\text{const}$.

Дальнейший анализ задачи управляемости по стационарному состоянию, по заданной траектории и при фиксированном характере пространственного распределения граничных управляющих воздействий проводится по схеме, описанной в разделе 3.

5 Граничное управление трехмерным температурным полем в прямоугольном параллелепипеде

Рассмотрим в качестве примера, представляющего самостоятельный интерес, ОРП вида (1) – (3), описываемый трехмерным уравнением теплопроводности для температурного поля $Q(X,t)=Q(x,y,z,t)$ в прямоугольном параллелепипеде

$$(42)\quad \frac{\partial Q}{\partial t}=a\left(\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 Q}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 Q}{\partial z^2}\right);\ 0<x<l_1,\ 0<y<l_2,\ 0<z<l_3,\ t>0$$

с краевыми условиями третьего рода [9]:

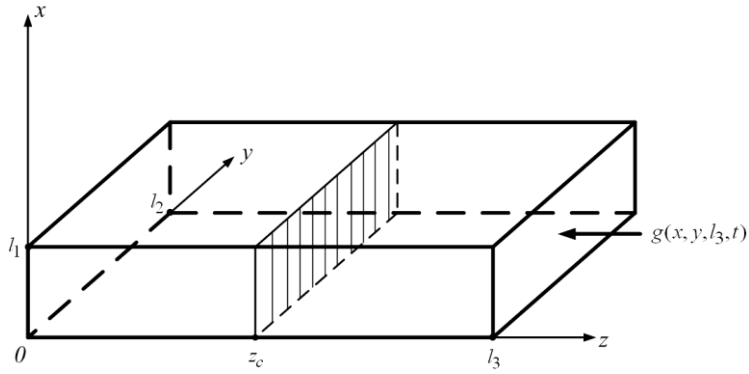
$$Q(x,y,z,0)=0;\ \frac{\partial Q(0,y,z,t)}{\partial x}=\frac{\partial Q(x,0,z,t)}{\partial y}=\frac{\partial Q(x,y,0,t)}{\partial z}=0;$$

$$(43)\quad \lambda\frac{\partial Q(l_1,y,z,t)}{\partial x}+\alpha_1 Q(l_1,y,z,t)=g_1(y,z,t);\ \lambda\frac{\partial Q(x,l_2,z,t)}{\partial y}+\alpha_2 Q(x,l_2,z,t)=g_2(x,z,t);$$

$$\lambda\frac{\partial Q(x,y,l_3,t)}{\partial z}+\alpha_3 Q(x,y,l_3,t)=g_3(x,y,t);$$

где $a, \lambda, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - заданные значения теплофизических постоянных, а $g_1 - g_3$ - граничные управляющие воздействия на соответствующих гранях параллелепипеда.

Ограничимся исследованием задачи программной управляемости объектом (42), (43) с управляющим воздействием $g(x, y, t)$ на одной из граней параллелепипеда, например, считая в соответствии с (11) $S_\beta = \{x \in [0, l_1], y \in [0, l_2], z = l_3\}$, и полагая $g(x, y, t) = g_3(x, y, t)$ при $g_1(y, z, t) = g_2(x, z, t) = 0$ (см. рисунок).



По схеме, описанной в разделе 4, получаем интегральное уравнение (39), (40):

$$\widetilde{Q}(x, y, z_c, p) =$$

$$(44) \quad = \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} [\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \widetilde{H}_{nm}(z_c, p) \frac{\varphi_n(\mu_n, x) \varphi_n(\mu_n, \xi) \psi_m(\lambda_m, y) \psi_m(\lambda_m, \eta)}{a^2 \|\varphi_n\|^2 \|\psi_m\|^2}] \widetilde{g}(\xi, \eta, p) d\xi d\eta;$$

и его решение вида (41):

$$(45) \quad \widetilde{g}(\xi, \eta, p) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \overline{\overline{\widetilde{g}}}_{nm}(p) \frac{\varphi_n(\mu_n, \xi) \psi_m(\lambda_m, \eta)}{\|\varphi_n\| \cdot \|\psi_m\|},$$

где в (44)

$$\widetilde{H}_{nm}(z_c, p) = \frac{\mathrm{ch}(A^*_{nm} z_c)}{\lambda A^*_{nm} \mathrm{sh}(A^*_{nm} l_3) + \alpha_3 \mathrm{ch}(A^*_{nm} l_3)}; \; A^*_{nm} = \frac{A_{nm}(p)}{\sqrt{a}},$$

собственные функции

$$(46) \quad \varphi_n(\mu_n, x) = \cos\left(\mu_n \frac{x}{l_1}\right); \; \psi_m(\lambda_m, y) = \cos\left(\lambda_m \frac{y}{l_2}\right);$$

и μ_n^2, λ_m^2 – известные собственные числа [17].

Можно показать, что аналогично (10), (18), (24) необходимое и достаточное условие управляемости рассматриваемого объекта с граничным воздействием (45) сводится к выбору его модальных составляющих $\overline{\overline{\widetilde{g}}}_{nm}(p)$ в (45), обеспечивающих выполнение неравенства

$$(47) \quad \frac{1}{h} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \left[(\mu_{1n}^2 + \lambda_{1m}^2) \overline{\overline{Q}}^*_{1nm} + \frac{d\overline{\overline{Q}}^*_{1nm}}{dt} \right]^2 < \infty, \; t \in (0, t_1); \quad \mu_{1n}^2 = \frac{a\mu_n^2}{l_1^2}; \; \lambda_{1m}^2 = \frac{a\lambda_m^2}{l_2^2}; \; n, m = 1, 2, ...,$$

где $\overline{\overline{Q}}^{*}_{1nm}(t)$ - модальные составляющие температурного состояния $Q^{*}_{1}(x,y,t)$, отвечающего заданной зависимости $Q^{*}(x,y,z_c,t)$ от пространственных координат (*x,y*).

$$(48)\quad \overline{\overline{Q}}^{*}_{1nm}(t)=\int_0^{l_1}\int_0^{l_2} Q^{*}_{1}(x,y,t)\frac{\varphi_n(\mu_n,x)\psi_m(\lambda_m,y)}{a^2\|\varphi_n\|\cdot\|\psi_m\|}dxdy\,.$$

В случае оценки управляемости по стационарному состоянию $Q^{**}(x,y,z_c)$ будем иметь согласно (47) для соответствующих значений мод $\overline{\overline{Q}}^{**}_{1nm}$ при $\frac{d\overline{\overline{Q}}^{**}_{1nm}}{dt}=0$:

$$(49)\quad \frac{1}{h}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\left[(\mu^2_{1n}+\lambda^2_{1m})\overline{\overline{Q}}^{**}_{1nm}\right]^2<\infty.$$

Для типичной ситуации $Q^{**}_{1}(x,y)=Q^{**}=\text{const}\,\forall\, x,y\in[0,l_1]\times[0,l_2]$, получим, вычисляя интегралы в (48) в условиях (46):

$$(50)\quad T_{nm}=(\mu^2_{1n}+\lambda^2_{1m})\overline{\overline{Q}}^{**}_{1nm}=B_{nm}Q^{**}\frac{\mu^2_{1n}+\lambda^2_{1m}}{\mu^2_{1n}\lambda^2_{1m}}\,,$$

где B_{nm} - коэффициенты, для которых выполняются предельные соотношения $\lim\limits_{n,m\to\infty} B_{nm}\neq 0$.

Для выполнения неравенства (49) должны сходиться все однократные ряды $\sum\limits_{n=1}^{\infty} T^2_{nm_1},\forall m_1=1,2,...$ и $\sum\limits_{m=1}^{\infty} T^2_{n_1m},\forall n_1=1,2,...$

Согласно (50) здесь

$$(51)\quad \begin{aligned}&\lim_{n\to\infty} T^2_{nm_1}=\lim_{n\to\infty}\left[B_{nm_1}Q^{**}\frac{\mu^2_{1n}+\lambda^2_{1m_1}}{\mu^2_{1n}\lambda^2_{1m_1}}\right]^2\neq 0\ \text{при}\ m_1<\infty,\ \lim_{n\to\infty}\mu^2_{1n}=\infty;\\ &\lim_{m\to\infty} T^2_{n_1m}=\lim_{m\to\infty}\left[B_{n_1m}Q^{**}\frac{\mu^2_{1n_1}+\lambda^2_{1m}}{\mu^2_{1n_1}\lambda^2_{1m}}\right]^2\neq 0\ \text{при}\ n_1<\infty,\ \lim_{m\to\infty}\lambda^2_{1m}=\infty\end{aligned}$$

и следовательно, указанные ряды заведомо расходятся, а значит, объект неуправляем по равномерному распределению температур $Q^{**}_{1}(x,y)=Q^{**}=\text{const}$, несогласующемуся с граничными условиями (43).

Если требуемое состояние $Q^{**}_{1}(x,y)$ задается в виде

$$(52)\quad \begin{aligned}&Q^{**}_{1}(x,y)=\left[\left(\frac{x}{l_1}\right)^2-\frac{2+K_1}{K_1}(1+v_0)\right]\left[\left(\frac{y}{l_2}\right)^2-\frac{2+K_2}{K_2}(1+v_0)\right],\ v_0=const\geq 0,\\ &K_1=\frac{\alpha_1 R}{\lambda};\ \ K_2=\frac{\alpha_2 R}{\lambda},\end{aligned}$$

удовлетворяющем при $v_0=0$ граничным условиям (43), то аналогично (50) будем иметь при $v_0=0$ вместо (51)

(53) $$\lim_{n\to\infty} T^2_{nm_1} = \lim_{m\to\infty} T^2_{n_1 m} = \lim_{n\to\infty}\left[B^*_{nm_1}\frac{\mu^2_{1n}+\lambda^2_{1m_1}}{\mu^4_{1n}\,\lambda^2_{1m_1}}\right]^2 = \lim_{m\to\infty}\left[B^*_{n_1 m}\frac{\mu^2_{1n_1}+\lambda^2_{1m}}{\mu^2_{1n_1}\,\lambda^4_{1m}}\right]^2 = 0\,,$$

где опять $B^*_{nm_1}$, $B^*_{n_1 m}$ - известные отличные от нуля коэффициенты.

При этом ряд (49) сходится по признаку Даламбера, и объект оказывается управляемым по температурному распределению (52). При $v_0 \neq 0$ граничные условия (43) не выполняются для $Q^{**}_1(x,y)$ в (52).

В этом случае предельные значения $T^2_{nm_1}$, $T^2_{n_1 m}$, отличающиеся от указанных в (53), становятся неравными нулю, и такое состояние объекта опять оказывается неуправляемым.

Неравенство (47), обеспечивающее управляемость по программной траектории $\widetilde{Q}^*(x,y,z_c,p)$, выполняется при сходимости ряда (49), т.е. для объекта, управляемого по стационарному состоянию, если, аналогично (25), эта траектория удовлетворяет условиям

(54)
$$\lim_{n\to\infty}\frac{\left[\left(\mu^2_{1n}+\lambda^2_{1m_1}\right)\overline{\overline{Q}}^*_{1nm_1}+\dfrac{d\overline{\overline{Q}}^*_{1nm_1}}{dt}\right]^2}{\left[\left(\mu^2_{1n}+\lambda^2_{1m_1}\right)\overline{\overline{Q}}^{**}_{1nm_1}\right]^2} = C^*_1 < \infty\ \forall m_1 = 1,2,...,\ t\in(0,t_1);$$

$$\lim_{m\to\infty}\frac{\left[\left(\mu^2_{1n_1}+\lambda^2_{1m}\right)\overline{\overline{Q}}^*_{1n_1 m}+\dfrac{d\overline{\overline{Q}}^*_{1n_1 m}}{dt}\right]^2}{\left[\left(\mu^2_{1n_1}+\lambda^2_{1m}\right)\overline{\overline{Q}}^{**}_{1n_1 m}\right]^2} = C^*_2 < \infty\ \forall n_1 = 1,2,...,\ t\in(0,t_1).$$

В частности, при автоматической стабилизации заданного достижимого стационарного состояния $Q^{**}(x,y,z_c)$ в системе модального управления [18], конструируемой в виде совокупности автономных контуров регулирования его временных мод $\overline{\overline{Q}}_{nm}(z_c,p)$ с модальными управляющими воздействиями $\overline{\overline{g}}_{nm}(p)$, в каждом из которых объект управления описывается, в соответствии с (44), передаточной функцией

$$W_{0nm}(z_c,p) = \frac{\overline{\overline{Q}}_{nm}(z_c,p)}{\overline{\overline{g}}_{nm}(p)} = \widetilde{H}_{nm}(z_c,p),$$

выполнение соотношений (54) достигается соответствующим выбором индивидуальных регуляторов $W_{1nm}(p)$ с выходом $\overline{\overline{g}}_{nm}(p)$ в каждом из этих контуров.

Если граничное управление задается в форме вида (26)

(55) $$g(x,y,t) = \sum_{i=1}^{\rho} \upsilon_i(t)\,F^*_i(x,y)$$

с заранее фиксируемым характером его пространственного распределения, определяемом заданными функциями $F^*_i(x,y)$, и искомыми ρ сосредоточенными управляющими воздейст-

виями $\upsilon_i(t), i=\overline{1,\rho}$, то интегральное уравнение (44) при $z=z_c$ сводится, аналогично (27), (28), к системе ρ линейных алгебраических уравнений

$$\widetilde{Q}^*(x_j,y_j,z_c,p)=\sum_{i=1}^{\rho} W_{Xi}(x_j,y_j,z_c,p)\widetilde{\upsilon}_i(p),\ j=\overline{1,\rho} \tag{56}$$

с передаточными функциями

$$W_{Xi}(x_j,y_j,z_c,p)=\int_0^{l_1}\int_0^{l_2}\widetilde{H}(x_j,y_j,z_c,\xi,\eta,p)F_i^*(\xi,\eta)\,d\xi d\eta, \tag{57}$$

разрешимой относительно $\widetilde{\upsilon}_i(p)$ только в заранее фиксируемых ρ точках $(x_j,y_j)\in D$, $j=\overline{1,\rho}$, и следовательно, при управлении вида (55) программная управляемость по траекториям $\widetilde{Q}^*(x_jy_j,z_c,p)$ обеспечивается только в этих точках при $z=z_c$. Здесь $\widetilde{H}$ в (57) представляет собой двойную сумму в (44).

Решение системы уравнений (56), реализуемое, в частности, в многомерной системе регулирования температур $\widetilde{Q}^*(x_jy_j,z_c,p)$, $j=\overline{1,\rho}$, принимает вид (31) при $X_j=(x_j,y_j,z_c)$ с подстановкой $W_{Xi}(X_j,p)$ в (30) в форме (57).

Подобно (35), с точностью, определяемой выбором ρ, реализуемое в СМУ ρ модами $\overline{\overline{\widetilde{Q}}}^*_{nm}(z_c,p), n=\overline{1,n_1}; m=\overline{1,m_1}$, $n_1m_1=\rho$, управление

$$g(x,y,t)=\frac{1}{h}\sum_{i=1}^{\rho}F_i^*(x,y)\sum_{n=1}^{n_1}\sum_{m=1}^{m_1}\frac{E^*_{nmi}}{E^*}\left[\left(\mu_{1n}^2+\lambda_{1m}^2\right)\overline{\overline{Q}}^*_{1nm}+\frac{d\overline{\overline{Q}}^*_{1nm}}{dt}\right],\ h=\frac{2(l_1+l_2)}{l_1l_2c\gamma} \tag{58}$$

обеспечивает программную управляемость по заданным траекториям уже во всей области $D\ni x,y$.

E^* и E^*_{nmi} в (58) определяются так же, как в (33), (34) по модам $\overline{\overline{F}}^*_{inm}$ разложения $F_i^*(x,y)$ в двухкратный ряд по собственным функциям $\varphi_n(\mu_n,x),\ \psi_m(\lambda_m,y)$.

Аналогичные результаты имеют место при управляющих воздействиях $g_1(y,z,t)$ или $g_2(x,z,t)$ в (43) на других гранях параллелепипеда.

Список литературы

[1] Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987.
[2] Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1965.
[3] Бутковский А.Г. Структурная теория распределенных систем. М.: Наука, 1977.
[4] Мартыненко Н.А., Пустыльников Л.М. Конечные интегральные преобразования и их применение к исследованию систем с распределенными параметрами. М.: Наука, 1986.
[5] Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем управления с распределенными параметрами. М.: Высш. шк., 2005.
[6] Рапопорт Э.Я. Минимаксная оптимизация стационарных состояний в системах с распределенными параметрами // Известия РАН. ТиСУ, 2013, №2. С. 3-18;
[7] Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1975.
[8] Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М.: Высш. шк., 2009.

[9] Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. М.: Физматлит, 2001.
[10] Егоров А.И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами. М.: Наука, 1978.
[11] Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа, 1970.
[12] Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высш. шк., 2001.
[13] Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления, т.3. М.: Наука, 1966.
[14] Интегральные уравнения. Забрейко П.П., Кошелев А.И., Красносельский М.А., Михлин С.Г., Раковщик Л.С., Стеценко В.Я. М.: Наука. 1968.
[15] Рапопорт Э.Я. Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации. М.: Наука, 2000.
[16] Плешивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я. Метод последовательной параметризации управляющих воздействий в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами // Изв. РАН. ТиСУ. 2009. №3. С.22-23;
[17] Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2003.
[18] Рапопорт Э.Я. Структурно-параметрический синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами // Изв. РАН. ТиСУ, 2006. №4, с. 47-60;
[19] Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления, т.2. М.: Наука, 1962.
[20] Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. М.: Наука, 1984.
[21] Валеев Г.К., Жаутыков О.А. Бесконечные системы уравнений. Алма-Ата: Наука Казахской ССР, 1974.
[22] Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. Формулы, графики, таблицы. – М.: Наука, 1977.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ НА УСТАНОВКЕ АТМОСФЕРНО-ВАКУУМНОЙ ТРУБЧАТКИ

С.П. Сетин

ЗАО «Хоневелл»
443001, Самара, ул. Молодогвардейская, 204, оф. 19, Россия
Sergey.Setin@Honeywell.com, SetinSP@mail.ru
тел: +7 (915) 016-30-48

Ключевые слова: *системный анализ, переработка нефти, качество управления, установка атмосферно-вакуумной трубчатки, оптимизация*

Abstract
Control quality performances of technological processes of primary oil refining in atmospheric and vacuum crude distillation units (A/VCDUs) are analyzed on the basis of developed system strategy.

Введение

Условия усиливающейся конкуренции и перехода к новым стандартам качества и экологической безопасности обусловливают необходимость разработки новых системных подходов к модернизации производственных процессов на предприятиях нефтяной отрасли. Улучшение качества управления процессами первичной нефтепереработкой позволит при минимальных затратах обеспечить снижение себестоимости переработки сырья, гарантировать качество нефтепродуктов, получить экономию ресурсов и энергии и др.

Возможные улучшения качества управления не могут рассматриваться без соответствующего системного исследования взаимосвязанных технологических стадий первичной нефтепереработки как единого объекта оптимизации[1].

Системный подход к анализу уровня автоматизации и качества управления основными технологическими процессами на установках атмосферно-вакуумной трубчатки (АВТ) позволяет получить формализованные (количественные) оценки, отражающие технологическую и энергетическую эффективность производственного цикла. На основе сравнительного анализа интегральных оценок, полученных с помощью DEA-методики, разработаны рекомендации по повышению уровня автоматизации и по оптимизации структуры и параметров многосвязных систем управления технологическими процессами при одновременной минимизации затрат материальных ресурсов и энергии [1,2].

1 Основные задачи системного анализа производственного цикла первичной переработки нефти

Системный подход к анализу качества управления процессами первичной переработки нефти предполагает решение следующих основных задач:

- установление регламента системного анализа многостадийного технологического процесса первичной переработки нефти как объекта оптимизации,
- разработку алгоритмов получения, сортировки и обработки данных для анализа уровня автоматизации и качества управления технологическим процессом первичной переработки нефти;
- формулировку единых требований к форме представления первичной информации и результатов её анализа;

- формирование рекомендаций по модернизации базы контрольно-измерительных приборов для повышения эффективности существующих автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП),
- разработку алгоритмов оптимизации режимов работы локальных АСУ ТП по критериям быстродействия, ресурсосбережения и энергоэффективности;
- формирование рекомендаций по оптимизации по системным критериям качества состава, структуры и параметров многосвязных систем управления технологическими процессом на установке АВТ.

Решение перечисленных задач базируется на следующих принципах:

1) Технологический процесс переработки нефти, заключающийся в многостадийном последовательном преобразовании потоков сырья и энергии, имеет сложную и развитую топологическую структуру, которая может быть представлена в виде системы взаимосвязанных технологических операторов и технологических потоков.

   Динамический процесс первичной переработки нефти подвергается действию различных возмущений (включая аварийно-опасные факторы). С учетом явного доминирования возмущения, связанного с изменением качества сырья, интегральная оценка качества технологического управления установкой первичной переработки нефти может быть произведена, в первую очередь, с помощью сравнения вариации качества сырья с вариацией качества продуктовых фракций.
2) В структуре АСУ ТП на типовой установке первичной переработки нефти, в том числе на установке АВТ, можно выделить следующие основные подсистемы:

- информационно-измерительную подсистему, осуществляющую непосредственные прямые измерения параметров объекта управления;
- подсистему технологического управления, решающую задачи контроля и непосредственного цифрового регулирования параметров процесса;
- подсистему промышленной безопасности, обеспечивающую надежность производства и минимизацию рисков деятельности нефтеперерабатывающего предприятия в целом.

2 Основные этапы анализа производственного цикла первичной переработки нефти

Системный анализ качества управления многостадийным технологическим процессом первичной переработки нефти на установке АВТ с целью его модернизации и оптимизации предполагает реализацию следующих этапов [3]:

1) Отображение технологической топологии нефтепереработки на установке АВТ в виде укрупненной и детализированной технологической схем и операторной схемы, устанавливающей взаимосвязи технологических операторов.
2) Анализ локальных АСУ ТП на установке АВТ, включающий составление паспортов оценки качества процессов управления в локальных автоматизированных системах регулирования технологического режима по абсолютным и интегральным показателям качества.
3) Анализ информационно-измерительной подсистемы установки АВТ, включающий характеристики комплекса технических средств и оценку качества и требований к измерениям параметров технологических потоков и оборудования блоков и узлов.
4) Анализ подсистем блокировки (АСБ) и защит (ПАЗ) установки АВТ, включая их оценку на соответствия предъявляемым требованиям работоспособности.
5) Анализ энергоэффективности АСУ ТП установки АВТ.
6) Анализ оценок уровня автоматизации установки АВТ.
7) Анализ надежности АСУ ТП установки АВТ, включающий оценку интенсивности отказов всех компонентов системы: от датчиков, измерительных каналов и средств отображения информации до регуляторов, каналов связи и исполнительных органов.

8) Сравнительный анализ эффективности АСУ ТП, производимый на основе DEA (Data Envelopment Analysis) - метода многокритериального оценивания сравнительной эффективности.

3 Оценка качества управления и параметрическая оптимизация многоконтурной САУ температурой мазута

Согласно разработанному регламенту был проведен анализ качества управления процессом первичной переработки нефти на установке АВТ-4 ОАО «Куйбышевский нефтеперерабатывающий завод», позволивший провести сравнение эффективности работы локальных АСУ ТП атмосферного и вакуумного блоков. В соответствии с разработанным алгоритмом на начальном этапе исследовались технологический регламент установки, её функциональные и технологические схемы, суточные и недельные графики изменения контролируемых параметров технологических потоков и другая нормативно-техническая документация. В результате анализа и обработки исходных данных были разработаны:

- укрупненная функциональная схема технологического процесса, которая позволила установить взаимосвязи технологических потоков для основных блоков и узлов установки;
- операторные схемы блоков, которые позволили выделить в составе блоков и оборудования элементарные технологические операции (нагрев, расширение, смешение, теплообмен и др.) и связать их с технологическими потоками;
- паспорта локальных АСУ ТП, характеризующие основные показатели качества работы систем в динамическом и установившемся режимах, внутренние и внешние возмущения, параметры оборудования АСУ ТП.

Основываясь на методике оценки качества управления, был проведен анализ АСУ ТП печью, предназначенной для подогрева мазута (сырья) с целью получения вакуумного газойля широкого фракционного состава (350-500°С) и перегрева пара, который в дальнейшем подается в вакуумную колонну и в отпарные колонны установки АВТ. Структура системы автоматического регулирования (САР) температуры мазута вакуумного блока перегонки нефти установки АВТ представлена на рисунке 1.

САР температуры мазута (перерабатываемого сырья) на выходе из печи представляет собой двухконтурную систему регулирования. Внутренний контур (регулятор К0) обеспечивает регулирование расхода жидкого топлива в печь, который является управляющим воздействием (u_1) во внешнем контуре (регулятор К1). Управляющим воздействием (u_0) во внутреннем контуре является изменение давления жидкого топлива, подаваемого в печь.

Объектом управления внутреннего контура является участок трубопровода, служащий для подачи топлива в печь, с передаточной функцией W0. Линейная комбинация передаточной функции замкнутой системы регулирования внутреннего контура и передаточной функции W1, описывающей динамику температуры (z_1) нагреваемого в печи объема сырья и представленную апериодическим звеном второго порядка, задает передаточную функцию объекта управления для внешнего контура регулирования.

Основными внешними возмущениями, отрабатываемыми САР, являются изменение расхода (f_1) перегретого пара в печь и изменение расхода (f_2) перерабатываемого сырья (мазута). При этом расход (подача) перегретого пара в печь (z_2) регулируется локальной САР.

САР расхода пара в печь представляет собой одноконтурную систему регулирования с регулятором К2, в качестве управляющего воздействия (u_2) выступает изменение подачи (расхода) пара в змеевики печи. Объектом управления является участок паропровода, служащий для подачи пара в печь, описываемый передаточной функцией W2.

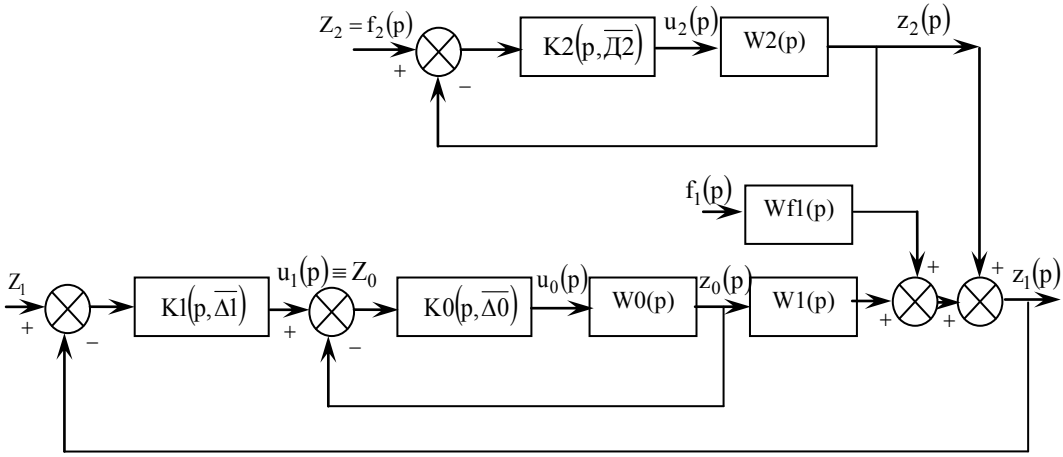


Рисунок 1 - Структурная схема системы автоматического регулирования температуры мазута вакуумного блока установки АВТ.

По сравнению с другими объектами управления вакуумного блока установки АВТ, динамические звенья, характеризующие движение жидкости и пара по трубопроводам, намного менее инерционны, поэтому передаточные функции указанных объектов (W0, W2) можно приближенно описать апериодическими звеньями первого порядка .

Были проанализированы такие основные параметры технологического процесса как температура мазута на выходе из печи, расходы мазута в печь (поток I и II), уровень в атмосферной колонне, температура низа вакуумной колонны, расход I, II и III циркуляционного орошения в вакуумной колонне, расход гудрона из вакуумной колонны, расход дизельной фракции на выходе из вакуумной колонны, расход тяжелого вакуумного газойля на выходе из вакуумной колонны.

Данные технологические параметры оценивались по прямым показателям качества переходных процессов управления (максимальное перерегулирование, время регулирования степень затухания переходного процесса, статическая ошибка) и интегральным оценкам их эффективности, полученным на основе прямых показателей качества с помощью широко используемого в настоящее время DEA-метода многокритериального оценивания [5]. Данный метод позволяет по совокупности данных о фактических значениях технологических параметров, имеющих различную физическую природу и количественные оценки, получить сравнимые результирующие интегральные оценки в относительных единицах. В данном случае полученные с помощью DEA-метода интегральные оценки характеризуют техническую эффективность процесса управления анализируемыми технологическими параметрами, показывая степень реализации доступных системе управления технологических возможностей. Результаты использования DEA-метода весьма информативны и эффективны для оценки качества управления, поскольку они позволяют не только установить параметры, управление которыми соответствует технологическим требованиям, но и выявить, насколько показатели неэффективно управляемых параметров далеки от своих потенциально возможных эффективных значений.

Как следует из результатов оценивания, значения таких параметров, как температура мазута на выходе из печи, расход I циркуляционного орошения в вакуумной колонне, расход III циркуляционного орошения в вакуумной колонне, имеющие интегральные оценки, равные единице, соответствуют предъявляемым к установившимся и переходным режимам работы технологическим требованиям. При этом остальные взаимосвязанные параметры локальных

АСУ ТП, имеющие интегральные оценки в диапазоне 0.2694-0.9343, не соответствуют установленным требованиям, что означает необходимость разработки решений по оптимизации структуры и параметров локальных систем для улучшения качества управления.

С этой целью на последующих этапах была решена задача определения оптимальных параметров настройки регуляторов многоконтурной системы автоматического управления температурой мазута вакуумного блока установки АВТ.

Предложенный авторами инженерный подход, основанный на альтернансном методе параметрической оптимизации [9], позволил найти точное решение задачи параметрического синтеза оптимальной системы автоматического управления, обеспечивающее требуемые показатели качества работы локальных контуров управления, и гарантировать их минимально возможную реакцию на взаимосвязанные возмущающие воздействия.

Заключение

Проведенные исследования позволили разработать:

- регламент системного анализа многостадийного технологического процесса первичной переработки нефти как объекта модернизации и оптимизации,
- алгоритмы обработки данных для анализа уровня автоматизации и качества управления технологическим процессом первичной переработки нефти;
- алгоритмы оптимизации режимов работы локальных АСУ ТП по критериям быстродействия, ресурсосбережения и энергоэффективности;
- рекомендации по оптимизации по системным критериям качества состава, структуры и параметров многосвязных систем управления технологическими процессом на установке АВТ.

Полученные результаты могут быть использованы как в нефтеперерабатывающей промышленности, так и в других ключевых отраслях, для анализа уровня автоматизации и оценки качества работы многосвязных систем управления широким классом сложных многоступенчатых производственных процессов.

Список литературы

[1] Анализ и синтез химико-технологических систем: [Учеб.] / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин. - М. : Химия, 1991. - 432 с. : ил. - ISBN 5-7245-0366(в пер.)

[2] Методы анализа АСУ химико-технологическими процессами: [Учеб.]/ И.Н. Минскер, Э.Л. Ицкович. – М. : Химия, 1990. - 120 с. : ил. - ISBN 5-7245-0539-8.

[3] Сетин С.П., Егоров А.А., Шендрик С.Н. Разработка алгоритма обследования автоматизированных систем управления технологическим процессом переработки нефти на установках АВТ/ Труды VIII Международного форума по проблемам науки, техники и образования, г. Москва. – Т.1 – 2013. – С.124-125.

[4] Диагностика и надежность автоматизированных систем [Текст]: учеб. / Б.М.Бржозовский, А.А.Игнатьев, В.В.Мартынов, А.Г.Схиртладзе. - Старый Оскол: ТНТ, 2006. - 379 с. : схем.,граф.,табл. - ISBN 5-94178-116-4(в пер.)

[5] Дилигенский Н.В., Цапенко М.В. Формирование системных оценок эффективности региональных промышленных комплексов (применительно к нефтеперерабатывающим производствам) / Труды III Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» СНЦ РАН, г.Самара. – Т.1 – 2001. – С.308-320.

[6] Дилигенский Н.В., Цапенко М.В. Методология DEA: оценка эффективности экономических объектов, анализ метода и свойств решений/ Межвузовский сборник научных трудов «Высшее образование, бизнес, предпринимательство 2001», г.Самара. – 2001. – С.149-159.

[7] Сетин С.П., Глазков И.В., Шураев М.В. Применение системы усовершенствованного управления (APC-системы) на установке первичной переработки нефти АВТ-5. / Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». – 2013. - № 1. – С. 44-47.

[8] Сетин С.П., Егоров А.А., Шендрик С.Н. Разработка алгоритма обследования автоматизированных систем управления технологическим процессом переработки нефти на установках АВТ/ В сб.: Труды XVII Международного Форума по проблемам науки, техники и образования. – Москва: Академия наук о Земле, 2013. – С.124-126.
[9] Афиногентов А.А., Плешивцева Ю.Э., Сетин С.П., Снопков А.С. Структурно-параметрический синтез многоконтурной системы автоматического управления технологическим процессом первичной переработки нефти/ Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки». – Самара: СамГТУ, 2013, № 4 (40), С. -102-113.
[10] Рапопорт Э.Я. Аналитическое конструирование агрегированных регуляторов в системах с распределенными параметрами // Известия РАН. Теория и системы управления, 2012. №3. С. 38-54.
[11] Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимизация систем с распределенными параметрами: программные и позиционные стратегии управления // *Известия Южного Федерального университета. Технические науки*, 2011. №6(119). С. 180-192.
[12] Рапопорт Э.Я. Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации [Текст] / Э. Я. Рапопорт. - М. : Наука, 2000. - 336 с. - ISBN 5-02-013069-9 (в пер.). Библиогр.:с.329-336

Intellectual Technologies in Complex Systems
Интеллектуальные технологии в сложных системах

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЦЕПОЧКАМИ ПОСТАВОК

В. Madsen[1], А.В. Царев[3], И.В. Майоров[2], Д.С. Очков[3]

[1]Multi-Agent Technology LTD
London, United Kingdom
bm@multiagenttechnology.com

[2]Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия,
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70
tsarev@smartsolutions-123.ru,

[3]ООО «РПК «Разумные Решения»
443013 Россия, Самара, ТОЦ "Вертикаль", Московское шоссе, 17, офис 1201
mail@kg.ru
тел: + 7 (846) 279-37-78

Ключевые слова: *цепочки поставок, мультиагентные технологии, реальное время, адаптивность, планирование.*

Abstract

The paper describes a concept of multi-agent scheduling based management of supply chains. It shows the modern business requirements for such systems and the principles of system design needed to cope with these requirements. The paper gives details about the developed prototype of the supply chain management system, its main functions, and the logic of agent negotiations. The paper also shows the current drawbacks and the commercial potential of the approach.

Введение

Планирование и моделирование цепочек поставок (закупки, формирование запасов, перераспределение товара в сети, маршруты доставки, удовлетворение спроса и обеспечение ассортимента) востребовано в широком спектре отраслей (сырье, химическая промышленность, автомобилестроение, детские игрушки, продукты питания и многие другие) и среди компаний разного масштаба (от отдельных магазинов до интернациональных корпораций). Планирование работы цепочки поставок на определенный горизонт является ключевым элементом как оперативного управления, так и моделирования различных вариантов стратегического развития сети поставок [1,2].

При этом растет сложность цепочек поставок, любой расчет плана работы сети требует значительных вычислительных ресурсов и занимает много времени. Современные цепочки поставок приводят к задачам большой размерности (номенклатура товаров может составлять десятки тысяч, материалов – сотни и тысячи, десятки центров хранения и дистрибуции, и т.д., поэтому обычно в системе $>10^6$ переменных), и адекватность «упрощенных» решений часто вызывает сомнения у пользователей. Кроме того, быстро меняющаяся конъюнктура рынка, колебания спроса и предложения, неточности прогноза спроса, влияние погодных условий на транспортные коммуникации и другие внешние условия, воздействующие на потоки данных в моделях разных частей системы, приводят к неконсистентности создаваемых планов поставок. Дополнительные неопределенности вносятся различными сбоями в цепях поставок – отказами поставщиков, недоступностью данного ресурса в определенный момент времени и т.д. Развитие неустойчивостей распространяется по всей цепочке и приводит, например, к хорошо известному «эффекту хлыста», связанному с быстрым накоплением излишних товаров и материалов на складах.

Традиционные централизованные системы управления цепочками поставок перестают справляться с современными задачами планирования. В существенной степени, это связано с тем, что применяемые в них алгоритмы планирования, основанные на методах математического линейного и динамического программирования, дискретной и смешанной оптимизации, плохо поддаются модификации и развитию вслед за развитием бизнеса, появлением новых факторов, которые нужно учитывать [3]. Часто случается, что используемая на предприятии система оптимизации оказывается непригодна для эксплуатации при внедрении новых бизнес-процессов (например, на предприятии переходят от ежедневного планирования к планированию по часам, или вводят небольшой производственный процесс – комплектация в точке продажи, который не учитывался при написании оптимизирующего модуля). Поскольку исторически оптимизирующие модули писались без учета легкости модификации, их часто приходится переписывать с нуля. Это также является следствием того, что применяемые методы, например, симплекс-метод, являются централизованными по сути, и их конкретная реализация под определенную постановку задачи получается очень специфической. Кроме того, такие алгоритмы ориентированы на пакетную обработку и полностью строят расписание заново при появлении даже небольших изменений во входных данных (событиях).

Одним из подходов к преодолению указанных сложностей может являться построение распределенных мультиагентных систем, базирующихся на фундаментальных принципах самоорганизации и эволюции, присущих живой природе. В этом подходе речь идет о создании систем, в которых решение достигается за счет унифицированно взаимодействующих сущностей с собственной логикой и целями (агентов) – поставщиков материалов, производства (фабрик), транспорта (грузовых компаний), центров хранения и переработки, а также утилизации товаров, согласованно и координировано действующих и способных как к расширению такой сети новыми членами, так и к адаптивной обработке событий [4,5].

В данной статье рассматривается опыт создания прототипа системы управления, построенной с применением мультиагентных технологий и учитывающей указанные требования.

1 Применение мультиагентных технологий в управлении цепочками поставок

Современные торгово-производственные компании находятся в постоянно меняющихся внешних рыночных условиях, выпускают огромный ассортимент продукции, обладают широкими связями с предприятиями по закупке сырья, транспортными и финансовыми компаниями.

При этом ассортимент продукции компании постоянно расширяется и модифицируется, не только отвечая изменяющимся потребностям потребителей, но и формируя эти потребности. В этих условиях одной из важнейших задач управления компанией становится согласованное гибкое планирование производства и продажи продукции, базирующееся на прогнозах сбыта и складывающейся ситуации в производстве [6]. Так, если запускается мощная реклама нового продукта на телевидении, фабрики к заданному сроку должны не только произвести данный товар в нужном объеме, но и довести его до оптовых потребителей и, в конечном счете, до полок в магазине. Иначе рекламная кампания может оказаться малоэффективной, не достигнет ожидаемых результатов или просто не окупит затрат. В свою очередь, чтобы действовать согласованно, как единый организм со всей компанией и подразделениями по сбыту, фабрики должны заранее позаботиться о получении нужных компонентов для производства этой новой или уже потребляемой рынком продукции, наладке оборудования для запуска нового продукта в серию, доставке продукции в срок, обучении персонала и т.д.

Такая согласованность в действиях предполагает необходимость своевременного выявления и разрешения конфликтов между подразделениями по рекламе, производству и продаже продукции, а также другими подразделениями компании в реальном времени. Действительно, если подразделением по сбыту продукции планируется запуск новых рекламных кампаний, то

нужно быть уверенным, что производители и транспорт обеспечат к нужному сроку доводку продукции до прилавка в требуемых объемах. С другой стороны, если сбыт неожиданно оказался больше или меньше запланированного, нужна соответствующая корректировка рекламной кампании. Наличие такого рода постоянных конфликтов между подразделениями по производству и продаже продукции, по определению имеющие собственные интересы, предпочтения и ограничения, не является чем-то неожиданным в жизнедеятельности компании – напротив, это отражает естественный порядок поддержки принятия и согласования решений для любой такого рода компании. В свою очередь, признание положительной роли конфликтов предполагает наличие соответствующих бизнес-процессов и программных средств для поддержки потенциально многосторонней активности по разрешению конфликтов, в которой стороны взаимодействуют как равные участники, каждый из которых, со своей стороны, может инициировать согласованные изменения в планах в любой момент времени.

Следует учитывать, что для компании рассматриваемого масштаба речь идет о координации работы десятков тысяч работников, взаимодействующих, в конечном счете, с миллионами потребителей, и значительных финансовых ресурсах. Цена ошибки в принятии решений, например, простая несогласованность решений или ошибка в планировании на несколько дней, может приводить к значительным финансовым потерям, резкому возрастанию рисков, неудовлетворенности покупателей и ряду других серьезных последствий.

В то же время, существующий в настоящее время бизнес-процесс работы рассматриваемых подразделений компаний предусматривает весьма «прямолинейный» и «жесткий» порядок в этом процессе, который, к сожалению, поддерживается существующими средствами автоматизации бизнес-процессов, не позволяющими своевременно выявлять и согласованно разрешать конфликты между подразделениями в интересах всего предприятия в целом. Например, сейчас если фабрика запланировала производство некоторой продукции, то будет ее производить в течение двух недель, даже если это уже в текущий момент не требуется для потребителей.

В этой связи, целью создания рассматриваемой системы является повышение качества и эффективности процессов управления компанией за счет внедрения механизмов гибкого планирования и согласованного взаимодействия всех участников жизненного цикла производства и продажи продукции компании.

Для решения поставленной задачи разрабатывается автоматизированная система поддержки согласованной деятельности по планированию производства, транспортировки и сбыта продукции, основой которой является динамический планировщик работ на основе мультиагентных технологий, реализующий новую технологию гибкого планирования в сочетании с поддержкой взаимодействия с исполнителями в основных подразделениях компании для согласования или пересмотра планов.

Функциональные возможности системы помогают менеджерам создавать планы производства и сбыта продукции и управлять процессом планирования этих работ для достижения наилучших результатов с заданными критериями, предпочтениями и ограничениями, адаптировать планы при возникновении непредвиденных событий, предлагать изменения в плане в расчете на улучшение важных показателей, согласовывать решения при возникновении важных событий, отслеживать результаты работы и контролировать основные показатели этого процесса, а также вырабатывать рекомендации и опции участникам процесса по решению возникающих проблем.

Динамические планировщики, лежащие в основе подхода, способны не только изначально запланировать рассматриваемые процессы производства и сбыта продукции, но и постоянно перепланировать эти планы по мере поступления новых событий в реальном масштабе времени [7-10]. При этом события вводятся любым из участников системы в каждом из подразделений, в том числе, менеджерами производства или сбыта продукции, в соответствии со своими ролями, полномочиями и правами в предлагаемой системе.

Введенные события порождают варианты изменения планов работ, которые оцениваются другими участниками данного процесса с учетом собственных критериев, предпочтений и ограничений, и далее согласовываться путем переговоров, в ходе которых возможны компромиссы и уступки сторон по выбранным критериям. При этом всем участникам наглядно показывается, какие и где согласовываются, и где нарушаются критерии, предпочтения и ограничения. Например, возможно, что рост сбыта продукции одного наименования вынуждает отложить производство другой и т.д.

Фактически, между пользователями основных подразделений предприятия организован постоянно действующий виртуальный «круглый стол» (Рисунок 1), в котором по определенному регламенту будут осуществляться согласования решений, как по первоначальному планированию, так и по последующему исполнению и изменению планов производства и сбыта продукции, с включением в этот процесс всех заинтересованных участников.

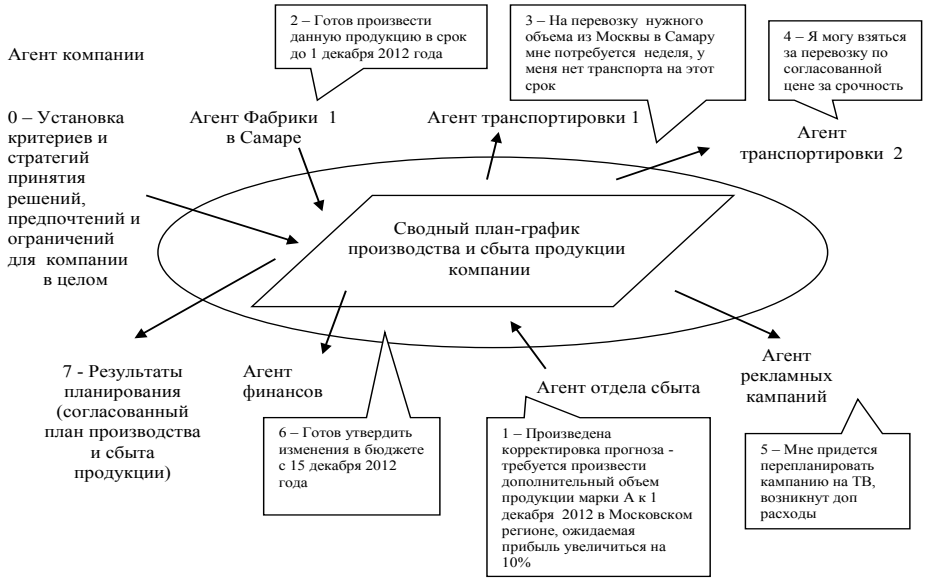


Рисунок 1 – Упрощенный пример взаимодействий в сети поставок для формирования и согласования планов производства и сбыта продукции

Для создания виртуального «круглого стола» использованы мультиагентная технология и технология баз знаний (онтологий). В этом подходе все участники процесса получают своих программных агентов с присущими им критериями, расписаниями работ, предпочтениями и ограничениями, способными действовать от лица и по поручению своих владельцев. Агенты пользователей, соответствующие различным подразделениям компании и лицам, принимающим решения, смогут взаимодействовать путем обмена сообщениями для выработки согласованных решений и достижения компромиссов для формирования сводного плана компании.

Результатом работы системы являются варианты сводного плана производства и сбыта продукции, удовлетворяющих заданным требованиям, сформированным на основе целей, предпочтений и ограничений всех участников процесса.

На представленном рисунке показана цепочка взаимодействий агентов, вызванная событием ввода менеджером по сбыту задачи по дополнительному производству продукции некоторого наименования, обусловленной расхождением между прогнозом и фактом исполнения плана продаж (шаг 1). В ответ на это событие активируется агент одной из фабрик (шаг 2),

способных произвести данную продукцию, но требуемый исходный срок не может быть выполнен. Фабрика предлагает встречный план производства на этом шаге, который далее согласовывается с транспортными компаниями (шаги 3 и 4). С учетом возникающей задержки требуется пересмотр объемов и сроков рекламной кампании, что частично увеличивает расходы (шаг 5), но с учетом ожидаемой дополнительной прибыли может быть утверждено агентом финансов (шаг 6) или отвергнуто в случае каких-либо других приоритетных расходов на данный период.

Взаимодействуя между собой, агенты различных подразделений могут договориться, какая из опций наилучшим образом подходит для текущей ситуации, с учетом заданных предпочтений и ограничений, и сформировать согласованный сводный план производства и сбыта продукции. Если же вдруг какие-то планы на каком-то из шагов выходят за рамки важных ограничений, агенты могут вернуться на один или несколько шагов назад и пересмотреть принятые ранее решения, чтобы найти варианты сокращения сроков работ, расходов и т.д. Тогда каждый из агентов обращается к своей ситуации и ищет возможные опции для уступок, если таковые имеются в наличии, например, по сокращению сроков работы. Из найденных опций агенты коллективно выбирают решения, обладающие наибольшей ценностью как для всех участников, так и для компании в целом.

Рассмотренный пример регламента согласования решений является лишь одним из возможных вариантов организации процесса согласования и принятия многокритериальных решений в условиях общих ценностей подразделений компании, показывающим потенциальные возможности системы, которые будут уточняться и дорабатываться во взаимодействии с уполномоченными менеджерами и специалистами в ходе реализации первого этапа проекта.

Таким образом, предлагаемый подход основан на моделировании процессов переговоров участников проекта в соответствии с заданными и явно декларируемыми целями, предпочтениями и ограничениями. При этом агенты, действующие от лица и в интересах своих пользователей, ищут решения в соответствии с заданными им установками и сами находят компромиссы без каких-либо эмоций, опираясь на декларированные цели, роли, стратегии и регламенты, но если выполнить требуемые установки не удается, то агенты приходят назад к своим владельцам с опциями для переговоров, направленных на изменение самих установок.

В этом случае пользователь системы может воспользоваться специальным редактором логики согласования и принятия решений, открывающим доступ в базу знаний системы, где можно удобно задавать и гибко менять критерии, предпочтения и ограничения, соглашаясь на уступки по самим установкам.

Базы знаний, построенные как семантические сети (Рисунок 2), содержат классификаторы продуктов, описания этапов процессов производства продукции, виды транспортных средств и т.д. В семантической сети выделяются концепты и отношения, к числу концептов могут быть отнесены как объекты, так и процессы, которые, в свою очередь, могут иметь атрибуты и т.д. На рисунке условными прямоугольниками выделены объекты и процессы, а стрелками – отношения различных типов («Является классом», «Забронирован» и т.п.). Используя данные сведения, а фактически – модель бизнеса компании в части принятия решения по планированию и сбыту продукции, программные агенты могут анализировать ситуацию, планировать требуемые операции, отслеживать их исполнение и т.д.

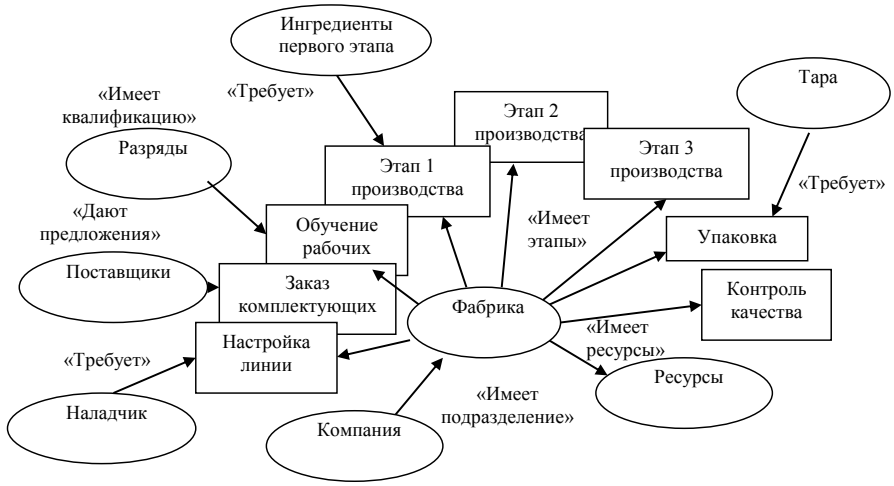


Рисунок 2 – Упрощенный фрагмент онтологии базы знаний о сети поставок

Важным преимуществом баз знаний о предметной области является тот факт, что знания в значительной степени отделены от программного кода и могут пополняться менеджерами организации без перепрограммирования системы, в то время, как агенты, помогающие планировать или согласовывать работы, разработаны как универсальные компоненты для динамического планирования, по возможности независимо от особенностей и специфики рассматриваемой предметной области конкретной компании.

2 Реализованный прототип системы управления цепочками поставок

Реализованный в соответствии с изложенными принципами прототип системы управления представляет собой комплекс из:

1) мультиагентного модуля планирования, имеющего собственный API (программный интерфейс), который можно встраивать в уже существующие системы и, передавая на вход начальные данные и события, получать на выходе расписание сети или его изменения;
2) web-сервиса, принимающего авторизуемые сетевые подключения пользователей, который обеспечивает хранение, фильтрацию и группировку данных, передаваемых между клиентами и модулем планирования, который встроен в него;
3) клиентского web-приложения, которое запускается в окне браузера и подключается к серверу через интернет (Рисунок 3).

Система планирует движение продукции в сети поставок таким образом, чтобы общая прибыль сети была как можно больше, обеспечивая при этом быструю реакцию на все изменения и, как следствие, постоянное наличие актуального плана действий, ориентированного на извлечение максимума из текущей и предполагаемой в будущем ситуации.

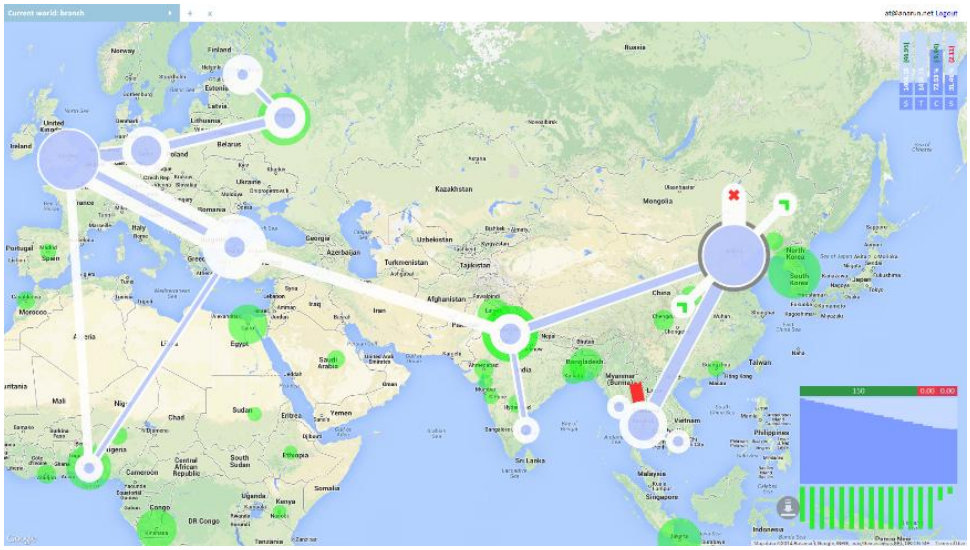


Рисунок 3 – Общий вид клиентского web-приложения

Т.е. в систему вносится описание сети, включая все фабрики, центры дистрибуции, склады, магазины, каналы доставки, ограничения по пропускной способности, доступное для хранения пространство, производственные линии, реализуемую продукцию и используемые материалы, формулы расчета стоимости хранения, транспортировки, производства, и многие другие параметры, если их нужно учитывать.

Затем в систему поступает информация о текущих остатках разной продукции на складах во всей сети и прогнозы реализации во всех частях сети. Остатки, прогнозы (или отдельные заказы), цены, стоимости и другие параметры могут меняться в реальном времени, вызывая частичное перепланирование и адаптацию плана действий к изменившимся условиям. План содержит информацию о том, что, где и когда надо закупать, производить, транспортировать, хранить и реализовывать. Запланированные действия распространяются на тот горизонт в будущее, на который известен (задан) прогноз спроса.

Функциональные возможности системы включают:

- планирование по отдельным заказам и по прогнозу спроса на любой горизонт и с любой детализацией (минуты, часы, дни, недели);
- учет пропускных способностей каналов и вместимости транспорта (грузовиков);
- учет доступного места для хранения продукции и материалов;
- гибкие модели учета стоимости транспортировки и хранения;
- ситуативный выбор наиболее эффективных каналов доставки (маршрутов в сети);
- планирования многостадийного производства с учетом потребности в материалах, оборудования;
- учет контрактных обязательств по объемам поставок и производства;
- учет различных цен на продукцию в разных частях сети;
- формирование страховых запасов для управления уровнем сервиса;
- управляемое планирование задержек заказов в условиях ограниченных возможностей сети;
- формирование предложений по изменению параметров сети;
- балансировку спектра реализуемой продукции, когда доставить все невозможно;
- консолидацию грузов и минимизацию стоимости доставок;
- учет графика доступности и рабочего времени отдельных узлов сети;

- учет длительности доставок и производства;
- учет карантина на продукцию.

Пользовательский интерфейс максимально интерактивен и нагляден (Рисунок 4). Управление сетью выполняется на карте, где видно расположение узлов сети, связывающие их каналы и основные параметры. Размеры узлов и каналов характеризуют их пропускную способность и величину потока продукции через них. Выделяя канал или узел (фабрика, склад, магазин), можно посмотреть детали (график поставок, прогноз спроса, график остатков, упущенные продажи) и поменять настройки (размер склада, канала, текущие остатки, прогноз на конкретный день). Финансовые (прибыль, доход, расходы на доставку, хранение) и другие показатели (загрузка каналов, складов) представлены как для всей сети, так и для отдельных узлов. Показывается отличие в показателях «слепка» от оригинальной сети.

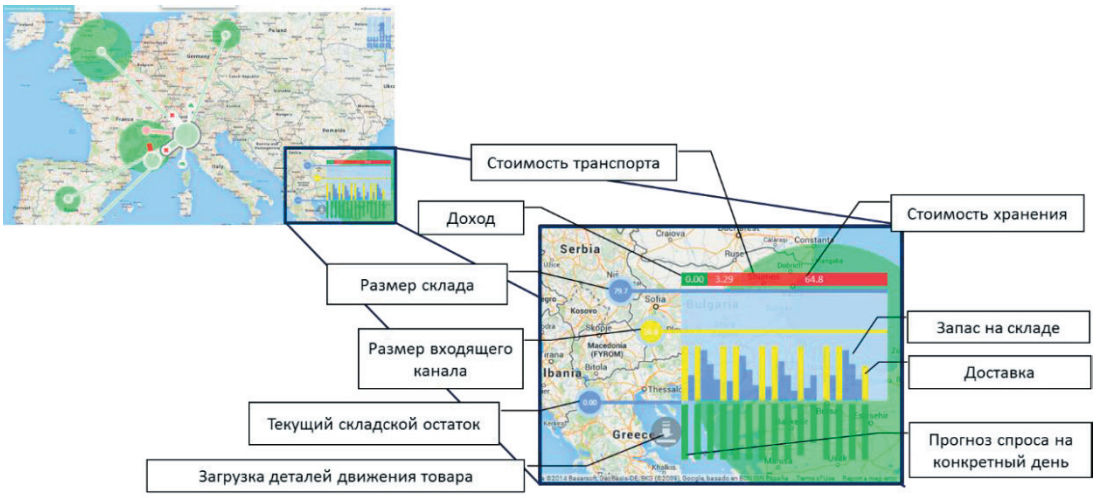


Рисунок 4 – Элементы пользовательского интерфейса

Систему можно применять для управления в реальном времени, когда она в автоматическом режиме обрабатывает изменения (события) и показывает, что нужно изменить в работе, чтобы наиболее эффективно сработать в изменившейся ситуации. Например, в таком режиме появление нереализованного товара на складе одного из магазинов (продажи ниже, чем ожидалось), может сразу показать, что надо поменять порядок производства и график закупок материалов.

Кроме того, адаптивный характер обработки изменений позволяет использовать систему для интерактивного моделирования сетей, когда пользователь делает «слепок» текущей ситуации с реальными остатками и прогнозами спроса и затем вносит изменения в конфигурацию сети (например, новый центр дистрибуции, другие каналы, другая модель производства) или меняет параметры отдельных узлов и каналов (Рисунок 5). Система немедленно перепланирует потоки продукции под вносимые изменения и показывает прибыль или убыток от вносимых изменений.

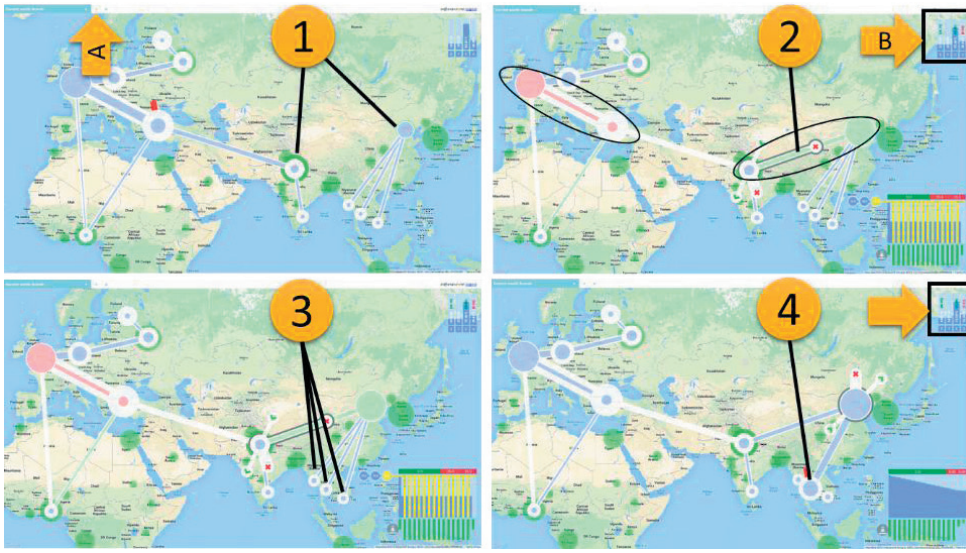


Рисунок 5 – Моделирование изменений в сети

Аналогично, используя «слепок» рабочей сети, можно проверять, как предполагаемые заказы повлияют на работу сети, и увидеть предполагаемую прибыль с учетом реалистичной ситуации.

В различных ситуациях (разные типы бизнеса) решаемые системой задачи могут фокусироваться на формировании графика поставок, на выборе наиболее эффективных каналов из доступных, на балансировке дефицитных ресурсов, на производстве или на других возможностях.

3 Логика взаимодействия агентов в процессе планирования

Рассмотрим непредвиденно возникшую проблемную ситуацию, состоящую в том, что в одном из магазинов, на 10-й день от начальной нулевой точки, заданной на горизонте планирования (сегодня – нулевая точка), неожиданно изменяется прогноз потребления картофеля в объеме от 30 - до 100 кг. Предполагается, что в магазине имеются некоторые запасы картофеля и других овощей, а также уже запланированы некоторые более ранние доставки.

Далее при упоминании сущностей Сайт, Продукт, Потребность, Доставка, Производственная линия, Канал, Контракт, Склад, имеются в виду их агенты. Данное описание не является полным описанием логики работы системы, а затрагивает лишь те ее аспекты, которые актуальны в рассматриваемом примере.

Общая схема и логика действий агентов будет следующей:

1) Магазин получает сообщение о новой потребности в 100 кг картофеля на 10-й день горизонта (на 10-й день от текущего момента надо реализовать 100 кг).
2) Потребность в картофеле на 10-й день запрашивает у Склада запланированное наличие картофеля к этому моменту. Допустим, на складе к 10-му дню уже запланировано 30 кг (это могут быть как начальные остатки, так и запланированные ранее доставки).
3) Потребность в картофеле рассматривает доступные опции для удовлетворения еще 70 кг. К доступным опциям, в данном случае, относится дополнение уже существующих неполных доставок до 10-го дня и создание новой доставки на одном из входящих каналов.

4) Потребность запрашивает у ограниченного количества (количество регулируется параметром планировщика) существующих Доставок предварительную (без учета расходов на других сайтах) стоимость добавления 70 кг.
5) Потребность запрашивает у Каналов предварительную (без учета расходов на других сайтах) стоимость создания новой доставки на 70 кг непосредственно к 10-му дню.
6) Доставки возвращают Потребности максимальный допустимый объем (из запрошенных 70 кг) и дополнительную стоимость его размещения. Допустим, в нашем случае, можно добавить все 70 кг в доставку на 7-й день за 1000 руб. или 50 кг в доставку на 4-й день за 300 руб.
7) Каналы возвращают ограничение и стоимость для новых доставок. Допустим, канал один и доставку можно сделать за 900 руб. на 9-й день.
8) Для всех опций Потребность запрашивает у Склада дополнительную стоимость хранения и ограничение, связанное с размером склада. При этом надо учитывать, что увеличение доставки, например, на 4-й день, увеличит складские остатки, начиная с 4-го дня вперед, вплоть, возможно, до конца текущего горизонта. Если в любой из дней это приводит к превышению размера склада, то он должен сообщить об ограничении. Если стоимость хранения нелинейно зависит от объема, то он должен просуммировать увеличение стоимости в каждый день.
9) Склад возвращает дополнительные затраты на хранение. Допустим, в нашем примере, стоимость хранения – фиксированная (не зависит от объема хранения – арендуется весь склад), а размер склада большой, так что дополнительный объем не добавит стоимости.
10) Потребность оценивает прибыль, которую принесет каждая рассматриваемая опция, с учетом ограничений на объем и затрат по каждой опции. В нашем примере, если цена картофеля 20 руб. за кг, то абсолютная (предварительная – без учета планирования на других сайтах) прибыть для разных опций будет следующая:

Опция	**Количество**	**Выручка**	**Затраты**	**Прибыль**
Доставка на 4-й день	50	1000	300	700
Доставка на 7-й день	70	1400	1000	400
Доставка на 9-й день	70	1400	900	500

11) Потребность предварительно выбирает самый выгодный вариант (доставка 50 кг на 4-й день), и ей остается найти способ доставить еще 20 кг.
12) После аналогичного опроса Доставок и Каналов, опции по доставке 20 кг могут выглядеть так:

Опция	**Количество**	**Выручка**	**Затраты**	**Прибыль**
Доставка на 7-й день	20	400	500	-100
Доставка на 9-й день	20	400	300	100

13) Полный предварительный план удовлетворения Потребности выглядит так:

	Количество	**Выручка**	**Затраты**	**Прибыль**
Остаток на складе	30	600	0	600
Доставка на 4-й день	50	1000	300	700
Доставка на 9-й день	20	400	300	100
Итог	**100**	**2000**	**600**	**1400**

14) После его формирования все неудовлетворенные (предварительно запланированные) доставки формируют сообщения сайтам-поставщикам, содержащие запросы на отправку кар-

тофеля (для сайта-поставщика это новые потребности) за определенное время до их доставки в сайт-магазин (время транспортировки).

15) Сайты-поставщики присылают Сайту-магазину уточненные ограничения на поставляемое количество и точные затраты на отправку (обработка внутри Сайтов происходил аналогично). Если в нашем примере весь необходимый картофель нашелся, это вызывает корректировку затрат. Например, если по обеим доставкам дополнительные затраты единственного поставщика составили по 200 руб., то Потребность получает следующую картину:

	Количество	**Выручка**	**Затраты**	**Затраты поставщиков**	**Прибыль**
Остаток на складе	30	600	0	0	600
Доставка на 4-й день	50	1000	300	200	500
Доставка на 9-й день	20	400	300	200	-100
Итог	**100**	**2000**	**600**	**400**	**1000**

16) При получении такого уточнения затрат, Потребность отказывается от невыгодной доставки, оставляя, в данной ситуации, 20 кг в виде потерянных продаж.

	Количество	**Выручка**	**Затраты**	**Затраты поставщиков**	**Прибыль**
Остаток на складе	30	600	0	0	600
Доставка на 4-й день	50	1000	300	200	500
Итог	**80**	**1600**	**300**	**200**	**1100**

4 Анализ возможностей системы

Разработанный модуль планирования и прототип системы были протестированы на различных синтетических тестах и на реальных данных коммерческих компаний. Кроме того, было проведено сравнение с работой оптимизирующего алгоритма, решающего стандартную транспортную задачу.

Рассматривалась стандартная задача снабжения в сети из M источников и N потребителей. Каждый потребитель способен потребить ограниченное количество продукта, а каждый источник – поставить ограниченное количество. Доставка по каждому каналу из источника потребителю (всего $M*N$ каналов) имеет свою стоимость (линейно зависит от количества), но такую, при которой доставка остается выгодной (цена реализации > стоимость). Требуется определить, сколько нужно доставить по каждому каналу так, чтобы при доставке максимально возможного количества (т.к. доставка в любом случае прибыльна) стоимость доставки была минимальна.

Проводилась серия экспериментов, в которой количество источников остается постоянным (M=50), а количество потребителей N изменяется от 50 до 300. Стоимости доставки по каналам, ограничения на поставку и потребление назначаются случайно. В каждом эксперименте, применяя симплекс-метод, находится худшее и лучшее решение и замеряется время вычисления.

Затем для каждого набора данных в серии решение находится при помощи разработанного модуля планирования двумя методами. При этом потребности задаются на всех сайтах-потребителях в один момент времени. Ограничения на поставку задаются в виде текущего значения остатка на складах сайтов-источников.

В первом методе стоимость доставки задается непосредственно в виде линейной функции стоимости доставки по каналу. При этом размер доставки не ограничивается.

Во втором методе стоимость доставки задается в виде закупочной цены между соответствующими источником и потребителем.

Для каждого решения полученная сумма расходов на доставку нормируется относительно диапазона [худшее решение; лучшее решение], т.е. нормированное значение показывает качество решения транспортной задачи соответствующим методом.

Решение через закупочные цены дает среднее качество 93% (Рисунок 6).

Решение через стоимость канала дает среднее качество 96% (Рисунок 7).

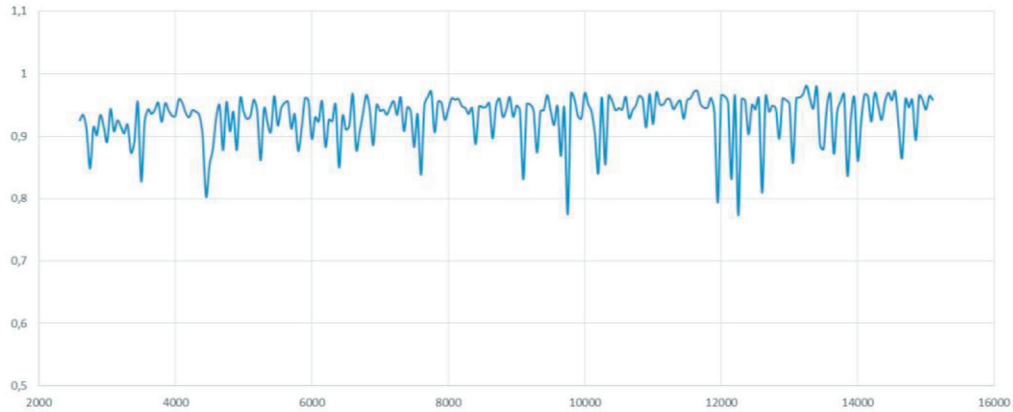


Рисунок 6 – Качество планирования через цены относительно оптимального

Рисунок 7 – Качество планирования через затраты относительно оптимального

При этом время полного перепланирования мультиагентным модулем, в сравнении с временем поиска решения симплекс-методом, оптимизированным под транспортную задачу, существенно больше и показывает степенную зависимость от объема входных данных. Это связано еще и с тем, что модуль при планировании учитывает потребности, распределенные

по времени, ограничения на объемы доставок и хранения, нелинейные функции стоимости доставки и хранения, многослойные сети доставки, производство и другие особенности, которые исключены из рассмотрения специализированным методом оптимизации.

Более подробное изучение поведения модуля планирования в адаптивных сценариях, когда меняется небольшая часть исходных данных и план не перестраивается полностью, показывает существенное сокращение времени перепланирования по отношению к полной перестройке плана (Рисунок 8).

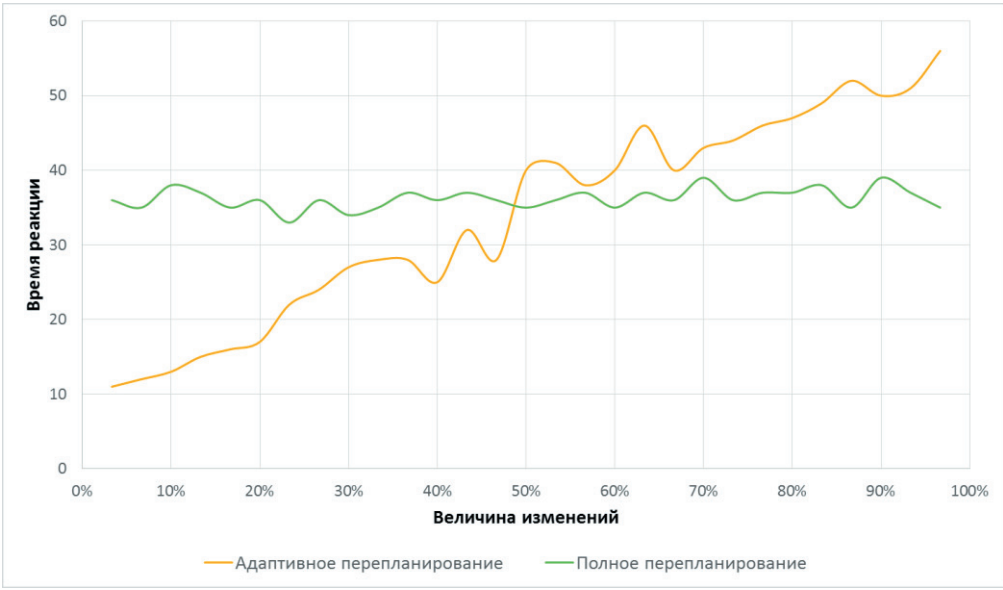


Рисунок 8 – Скорость адаптивного и полного перепланирования

Заключение

Реализованный прототип системы управления цепочками поставок показывает, что применение мультиагентного подхода позволяет строить интерактивные решения с легко расширяемой функциональностью и возможностью балансировать конфликтные интересы многих участников [11].

Качество получаемых решений ниже оптимального в простых случаях, но позволяет конкурировать с ними за счет более своевременного перестроения плана и за счет учета большего числа факторов в сложных случаях. Кроме того, применение технологии более оправдано в ситуациях, когда требуется адаптировать план к небольшим, но важным отклонениям во входных данных, а не обрабатывать полностью новый набор данных.

Проведенные исследования и моделирование показывают, что переход к планированию и управлению в реальном времени может повысить прибыль компании (на примере фактических данных LEGO) на 25% за счет более быстрой адаптации к изменяющимся условиям (Рисунок 9).

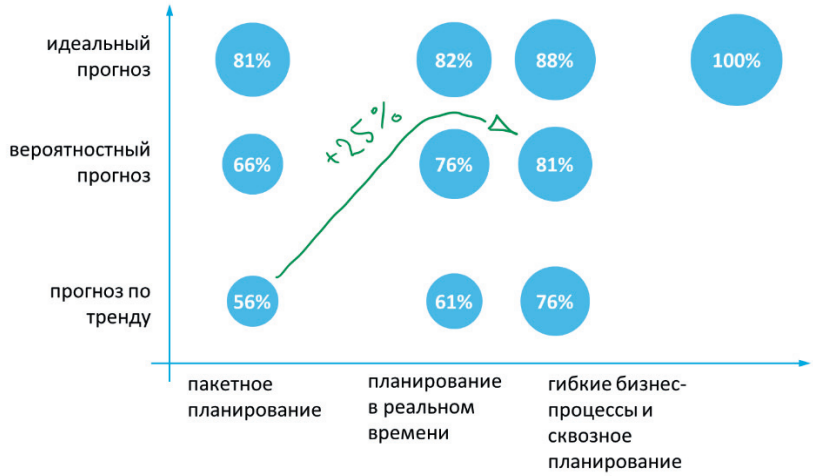


Рисунок 9 – Прибыль относительно абсолютного недостижимого максимума (отсутствие затрат) при применении разных подходов к прогнозированию, планированию и управлению.

Список литературы

[1] Механизмы управления. Управление организацией: планирование, организация, стимулирование, контроль, В. Н. Бурков и др., под ред. Д. А. Новикова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва: ЛЕНАНД, 2013. – 215 с.

[2] Dynamic modeling and control of supply chain systems: A review // Computers & Operations Research. – Vol. 35, Issue 11, November 2008. – pp. 3530–3561.

[3] Leung, J.: Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis. Chapman & Hall, CRC Computer and Information Science Series. – 2004.

[4] Leitao Paulo, Vrba Pavel. Recent Developments and Future Trends of Industrial Agents // Proc. of 5th International Conf. on Holonic and Multi-Agent systems in Manufacturing, France, Tolouse, 2011. – Springer. Berlin. – P. 15-28.

[5] Yann Chevaleyre at al. Issues in Multiagent Resource Allocation // Informatica. – Vol. 30. – 2006. – P. 3–31.

[6] Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука. – 2000. – 549 с.

[7] Pinedo, M.: Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. – Springer. – 2008.

[8] Malti Baghel, Shikha Agrawal and Sanjay Silakari, Survey of Metaheuristic Algorithms for Combinatorial Optimization // International Journal of Computer Applications, 58(19):21-31, November 2012.

[9] Davis, R. I. and Burns, A. 2011. A survey of hard real-time scheduling for multiprocessor systems // ACM Comput. Surv. 43, 4, Article 35 (October 2011). DOI = 10.1145/1978802.1978814

[10] Lawrence Barsanti, Angela C. Sodan, Adaptive Job Scheduling Via Predictive Job Resource Allocation, In: Job Scheduling Strategies for Parallel Processing // Lecture Notes in Computer Science. – Vol. 4376, 2007. – P. 115-140.

[11] Madsen B., Rzevski G., Skobelev P., Tsarev A. Real-time multi-agent forecasting & replenishment solution for LEGOs branded retail outlets // Proc. of 13th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD 2012), August 8-10, 2012, Kyoto, Japan. – P. 451-456.

О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ АКСИОМАТИЗАЦИИ ТЕОРИИ МНОГОМЕСТНЫХ ОТНОШЕНИЙ

А.Е.Баранович, Д.Б.Ханковский

Институт информационных наук и технологий безопасности (ИИНТБ)
Российского государственного гуманитарного университета (РГГУ)
117534, Москва, ул. Кировоградская 25-2, Россия
barae@rambler.ru, khankovskiy_d@mail.ru
+7 906-734-35-00, факс: +7 (495) 388-06-77

Ключевые слова: *информация, множеств теория, моделирование, отношение многоместное, система сложная, целостность системная*

Abstract
The analysis of the adequacy of classical axiomatic set theory using in modeling complex systems is held. In the phenomenological aspect of the “identity-difference” paradigm it is offered to involve the additional system “integrity” attribute in determining the finite set in system analysis problems. The possibility of reducing multiplace (polyadic) relations to the combination of relations of smaller –adic is considered. "Complexity" of system is characterized by number of distinguishable objects in its abstract model.

Введение

С нашей позиции, актуальная сложность материальных систем любого генезиса определяющим образом характеризуется структурой системы, представленной, в общем случае, разнообразным набором многоместных отношений на ее элементах (см. раздел 3). Вследствие чего существование прагматической теории многоместных отношений для решения обширного класса практических задач весьма оправдано.

В рамках информационно-эволюционного подхода (ИЭП) к анализу и моделированию объективной реальности синтезированы универсальные модели информационной составляющей произвольных систем объективной реальности (от физических неживой природы до биологических, интеллектуальных), спроецированные на область образно-логического мышления – семиотико-хроматические гипертопографы и гипертопосети (в развитие теорий алгебраических систем по А.И.Мальцеву и обобщений графов) [1-8]. Важнейшим атрибутом предложенного семейства моделей является априорная многоместность отношений на элементах топологических структур *k*-гиперпространства $Гs^m$, основанная на феноменологии системной целостности и эмерджентности моделируемых объектов.

Существенная часть вопросов теоретической и прагматической типизации двуместных отношений успешно разрешены, в частности, в работах Смирнова С.В. [9,10] и Осипова Г.С. [11,12]. В теории же многоместных отношений решение подобных задач, как и задача синтеза новой аксиоматической системы, отражающей текущее состояние эволюции предметной области системного анализа и моделирования на пороге XX-XXI вв., находится в весьма неопределенном состоянии. Среди доступных источников можно выделить работы по реляционной алгебре (Кодд Э., Дейтом К., Дарвен Х.), а также работы Кулика Б.А. [13] по моделированию и систематизации многоместных отношений в рамках алгебры кортежей. Стоит заметить, что упомянутые источники носят в основном прикладной характер. В ряде из них многие понятия теории множеств переопределены в рамках собственной терминологии, что зачастую приводит к существенным трудностям восприятия: «Алгебра кортежей представляет собой алгеб-

раическую систему, носителем которой является *произвольный* набор многоместных отношений, выраженных в специфических структурах – кортежах».

В свою очередь, многоместность отношений в математических моделях сложных систем, интерпретируемая многими исследователями в рамках известных теоретико-множественной и теоретико-графовой парадигм, оказалась существенно более емким феноменом, чем может показаться при поверхностном анализе. Истоки принципиального различия теорий двуместных и многоместных отношений формируются уже на уровнях аксиоматических систем дефиниции теории множеств. Выявлению особенностей модельной характеризации многоместных отношений в сложных системах и посвящен предлагаемый материал.

1 Теоретико-множественная характеризация системы

При решении задач синтеза адекватных математических моделей сложных систем необходимым образом возникает вопрос о том, какую аксиоматическую теорию использовать в качестве базовой. Вполне естественно, что большинство исследователей выбирают для этой роли одну из известных наиболее емких, детально проработанных и апробированных на практике теоретико-множественных или теоретико-графовых аксиоматических систем [2]. Однако, при более детальном рассмотрении упомянутой методологии, появляется ряд сомнений в том, что данный подход действительно способен в полной мере отобразить феномены моделируемых систем.

Приведем современные (2010-2014 гг.) дефиниции основных понятий, отражающие сущность моделируемых объектов [14]:

Система абстрактная (др.-греч. σύστημα – целое, составленное из частей; соединение) – множество элементов, связанных структурой, характеризуемое вполне определенной целостностью. Абстрактная модель системы объективной реальности (ОР) и системы знаний интеллектуальной системы (ИС).

Элементы системы есть подсистемы. Система есть элемент надсистемы. Неделимый элемент системы есть праэлемент системы.

Целостность (системная) – атрибут вполне определенных локусов представлять собой нечто целостное, взаимосвязанное, характеризуемое, в частности, следующими свойствами:

- принципиальным отличием от внешней среды (надсистемы),
- наличием вполне определенных границ актуального существования,
- стабильностью существования (устойчивостью) на вполне определенном периоде эволюции,
- наличием внутренней структуры (взаимосвязанных частей целого),
- преобладанием «значимости» внутренней структуры элементов системы над «значимостью» структуры элементов системы и надсистемы (внешней среды),
- эмерджентностью, т.е. наличием специфических свойств, отсутствующих у составляющих её частей (подсистем) и их отношений в локусе,
- потерей целостности при изменении структуры системы (исключении вполне определенных частей-элементов или их отношений).

Синтезируемые модели должны быть адекватны моделируемому прообразу. Уточним основные понятия теории множеств в различных ее интерпретациях.

Сущность интуитивного понимания множества содержится в классическом изречении Г.Кантора в его Mengenlehre (учение о множествах): «Под множеством мы понимаем любое соединение *M* определенных различных (различимых) объектов нашего умозрения или нашей мысли (которые будут называться элементами *M*) в единое целое»[1]. Множество есть то, что имеет

[1] “Unter einer Menge verstehen wir jede Zusammenfassung *M* von bestimmten wohlunterschiedenen Objekten in unserer Anschauung oder unseres Denkens (welche die Elemente von *M* genannt werden) zu einem ganzen” [15].

элементы, но при этом само мыслится как некое новое единство, новый объект более высокого уровня. Отнюдь не любой набор предметов будет образовывать множество [16].

В классической теории множеств предопределено, что любое подмножество некоторого множества есть множество. При этом не вполне ясно, что означает понятие «единое целое» - некоторая общность элементов в множестве или их системная целостность. В последнем предположении, возникает естественный вопрос – сохраняется ли свойство системной целостности для произвольного набора элементов множества, любой ли набор элементов некоторого множества сам мыслится единым целым, т.е. является множеством?

Разумеется, достаточно трудно подойти к этому вопросу формально, тем более, что для описания математических объектов это не играет ключевого значения. Более того, введение такого ограничения может существенно сузить понятие множества. Вполне достаточным оказалось формализация того факта, что множество *X* состоит из (всех?) элементов *x*, обладающих некоторым свойством *P*: «Совокупность предметов или понятий, объединенных каким-нибудь общим свойством, называется множеством» и далее «Множество А называется подмножеством или частью множества В, если каждый элемент А является элементом В» [17]. Исходя из последнего определения, множеством «человек» может являться, например, набор (рука, нога, шея, голова, туловище), но также и набор (рука, нога, шея), ведь в обоих случаях элементы множества будут обобщены по одному и тому же свойству принадлежности человеческому телу.

К настоящему времени канторово Mengenlehre оформилось в ряд аксиоматических теорий множеств, позволяющих, в частности, избежать появления логических парадоксов. В основу большинства из них положена непротиворечивая система 9 аксиом Цермело-Френкеля ZFC (ZF+Choice): ZF1 (аксиома экстенсиональности), ZF2 (аксиома существования ($\varnothing$[2])), ZF3 (аксиома неупорядоченных пар), ZF4 (аксиома объединения), ZF5 (аксиома бесконечности), ZF6 (аксиома подстановки) или ZF6' (аксиома подмножеств: для любого множества x и любого свойства P существует множество всех $y \in x$ обладающих свойством P), ZF7 (аксиома степени), ZF8 (аксиома выбора), ZF9 (аксиома регулярности, иначе, аксиома фундирования: пусть $y \neq \varnothing$, тогда существует такой элемент $x \in y$, что для любого элемента $z \in y$ выполняется $z \notin x$[3]). В системе ZFC единственный тип объектов - множества, единственное отношение $\in$ и всего одна константа – $\varnothing$.

Современная дефиниция математического понятия «множество» состоит в том, что множества и отношение принадлежности удовлетворяют аксиомам ZF1-ZF9 перечисляющим все основные общепринятые способы образования множеств. Множеством может называться то, что «либо состоит из конечного числа объектов, либо является множеством всех натуральных чисел, либо получается … взятием подмножества уже имеющегося множества, либо является объединением уже имеющегося множества уже имеющихся множеств, либо является множеством всех подмножеств уже имеющегося множества» [16]. Стоит отметить, что существуют и другие аксиоматические системы теории множеств: ZFU с «праэлементами» (нем. - Urelement), ZFC^{-} (ZFC без аксиомы фундирования), более общая системы GB (система Гделя-Бернайса) и др.

В рамках моделирования реальных физическим систем особое внимание уделяется конечным множествам[4]. В феноменологическом аспекте парадигмы «тождества-различия» (по Г.

[2] Любой ("несуществующий") элемент пустого множества обладает любым свойством, а также отрицанием этого свойства.

[3] Аксиома явным образом запрещает включения: $x \in x$, $x \in y \in x$, $x \in y \in z \in x$, и так далее, предполагая тем самым, существование элементов множества не являющихся подмножествами самих себя (неделимых или "фундированных").

[4] Такая постановка вполне устраивает большинство практических приложений.

Лейбницу) в понятии конечного множества задействованы следующие два базовых атрибута модели [18]:

1) Атрибут «общности»[5] множества.
2) В конструктивном плане данный атрибут может быть охарактеризован как наличие общего свойства $p(x)$ у всех элементов x множества (со значениями $\lambda p(x)$)[6]. Наличие общего свойства произвольного набора объектов (неделимых материальных систем) определим как отличительный признак «совокупности» $S: \{x \mid p(x)\}$. Модель неканторовой совокупности допускает наличие в ней тождественных элементов[7].
3) Атрибут «различимости» элементов множества.
4) В множестве любой элемент $x \in X$ отличен от любого элемента подмножества $X \setminus x$. Данный атрибут может быть охарактеризован как дополнительное свойство $q(x)$ всех элементов X с необходимо различными значениями $\lambda q(x)$ для каждого x. Тогда, допустимы следующие представления множества (порожденного атрибутами «единства» и «различимости» и, через совокупность различимых элементов) - $M: \{x \mid p(x), q(x)\}$ и $M: \{S \mid q(x)\}$ [8].
5) По нашему мнению, наличие лишь этих двух базовых атрибутов делает теорию множеств отличным инструментом для моделирования абстрактного набора объектов, определенных на заданном уровне антропного моделирования, но, однако, не являющимся достаточным при моделировании систем, объединенных структурой и обладающих вполне определенной целостностью. В целях дополнительной характеризации системных свойств модели множества введем следующий (по Г. Кантору – Г. Лейбницу[9]) атрибут:
6) Атрибут «целостности» («системной») множества (А.Е. Баранович, Д.Б. Ханковский).
7) Любое подмножество A множества X $A \subset \mathsf{B}_1^X$ должно обладать некоторым дополнительным свойством обеспечения «целостности» $t_X(A)$, значение которого $\lambda t_X(A)$ определяет значимость данного подмножества A для сохранения целостности множества X. Тогда целостность множества X определяется значением $\lambda t_X(X)$. По умолчанию примем, что $\lambda t_X(\varnothing)=0$, $0 \le \lambda t_X(A) \le 1$, где $A \subset \mathsf{B}_1^X$, определив, тем самым, номинальную шкалу «значимости» подмножеств для сохранения «целостности» основного множества.

Будем считать, что множество X является «целостным», если $\lambda t_X(X)=1$, и «не вполне целостным», если $0 < \lambda t_X(X) < 1$. Для функционально-полной теоретико-множественной модели системы её основное множество должно быть «целостным».

---

[5] В работе [18] данный атрибут проходил под наименованием «единства - целостности». В целях уточнения понятия «единого целого» в контексте общности элементов множества переопределим его как атрибут «общности». Более предпочтительным, очевидно, является поименование атрибута термином «общность», т.к. «единое целое» ≠ «целостность»

[6] Вследствие исключения в ZFC парадоксов типа аксиомы Г.Фреге ($\forall$ свойства $p(x)$ существует множество $\{x \mid p(x)\}$), выражение $S = \{x : p(x)\}$ корректно лишь в случае, когда оговорено, что свойство $p(x)$ является “коллективизирующим” или отвечает аксиоме ZF6’ (подмножеств) ZFC.

[7] Понятие “тождественных” объектов в совокупности интерпретируется *apriori* аксиоматическим образом в отношении вполне определенного набора атрибутов (свойств) и их значений. Элементы неразличимы для заданного набора атрибутов, но нетождественны на уровне метатеории (вне упомянутого набора). Формальная запись (x, x) свидетельствует о том, что объекты x тождественны и различимы лишь на метауровне (например, в пространственно-семиотическом аспекте).

[8] В качестве различающего свойства $q(x)$ в соответствующей постановке можно использовать и свойство объединения $p(x)$ с необходимо различными для всех элементов значениями $\lambda p(x)$. Тогда, $M = \{x \mid p(x), \lambda p(x)\}$.

[9] Отметим, что введение дополнительного атрибута в дефиницию множества в интерпретации аксиоматических систем ZFC или ZFU влечет существенную модернизацию упомянутых систем.

Введение данной нормированной шкалы значений свойства «целостности» в определенном смысле напоминает введение функции принадлежности в теории «*fuzzy sets*» Л. Заде. Тогда множество с введенным атрибутом «целостности» можно представить посредством выражений $M_{sys}: \{M \mid t_X(x)\}$ или $M_{sys}: \{x \mid p(x), q(x), t_X(x)\}$, поименовав его как «системное множество».

2 Фундаментальная гипотеза теории многоместных отношений

До настоящего момента остается открытой проблема (гипотеза) сводимости/несводимости произвольного многоместного отношения к комбинации (возможно, суперпозиции - композиции) двуместных (А.Баранович), весьма напоминающая 13 проблему Д. Гильберта, разрешенную В.И. Арнольдом совместно с А.Н. Колмогоровым (о представимости функций нескольких переменных … в виде суперпозиции нескольких непрерывных функций двух переменных) [19].

Разрешение сформулированной проблемы необходимым образом связано с формированием обоснованного ответа на следующий вопрос – на исследование каких феноменов моделируемых предметных областей направлены известные аксиоматические системы для многоместных отношений в современной постнеклассической парадигме, в частности, в теории графов и её обобщениях? На исследование множества объектов, связанных двуместными (попарно, без петель) отношениями (связями), типа транспортной сети, продуктопроводов или проводников (в историческом контексте) электрических схем, или, на исследование произвольных структур сложных систем, абстрагированных от конкретного наполнения и актуального определения объектов в структуре?

Рассмотрим понятие отношения на множествах [16].

Отношением между $X_1,...,X_n$ называется любое подмножество их декартова (прямого) произведения $R \in X_1 \times ... \times X_n$. В случае, когда $X_1 \equiv ... \equiv X_n$ отношение R называется внутренним. В случае, если $n \geq 3$ отношение R называется многоместным. Примером 3-местного отношения может служить отношение сравнимости $l \cong m \pmod{n}$, $l,m,n \in \mathbf{Z}$. Примером 4-местного отношения является отношение пропорциональности: $(a,b,c,d) \in R \leftrightarrow a/b = c/d \leftrightarrow ad = bc$, $a,b,c,d \in \mathbf{Z}$.

Вопрос о представимости многоместного отношения в виде комбинаций двуместных отношений можно попытаться свести к вопросу об ассоциативности прямого произведения множеств. Если прямое произведение ассоциативно, то, расставив скобки соответствующим образом, упорядоченную *n*-ку можно превратить в упорядоченную пару.

Пусть $X_1,...,X_n$ суть *n* множеств. Их декартово (прямое) произведение определяется как

$$X_1 \times ... \times X_n \equiv \{(x_1,...,x_n) \mid x_i \in X_i\},$$

где $(x_1,...,x_n)$ обозначает упорядоченную *n*-ку.

В общем случае, прямое произведение множеств не ассоциативно и не коммутативно. Например, для *n* =3 $(X_1 \times X_2) \times X_3 \neq X_1 \times X_2 \times X_3 \neq X_1 \times (X_2 \times X_3)$, так как второе из них состоит из упорядоченных троек, в то время как первое и третье состоят из упорядоченных пар. Более того, первое и третье из них определено на множестве B_1^X, а второе – на множестве X. Однако, с точностью до канонического изоморфизма $(X_1 \times X_2) \times X_3 \approx X_1 \times X_2 \times X_3 \approx X_1 \times (X_2 \times X_3)$. В этом же смысле $X_1 \times X_2 \approx X_2 \times X_1$ (коммутативность) [16].

Сводимость/несводимость многоместного отношения к комбинации двуместных может быть рассмотрена и в рамках декомпозиции многоместного отношения. Интуитивно понятно, что формальная декомпозиция может привести к потере информации, к разрыву связей в ре-

альных системах, к потере целостности. Простейшим примером может служить разрезанное яблоко в отношении целого или известная индийская притча о пяти слепых мудрецах. В реляционной алгебре, которая активно применяется для решения различных (в основном оптимизационных) задач в рамках построения и управления базами данных, выделяют «корректную декомпозицию» или «декомпозиция без потерь» (имеется возможность собрать исходное отношение из декомпозированных отношений без потери информации) и «некорректную декомпозицию», а также определены критерии «корректности» декомпозиции. Аналогичная задача возникает при построении эффективного покрытия графа подграфами [2].

В ряде работ можно найти утверждения о том, что многоместное отношение может быть выражено через композицию двуместных (без доказательства) [20], в иных – о несводимости 3-местных отношений к отношениям меньшей местности.

Рассмотрим определение композиции двуместных отношений [16]. Пусть $R \in Rel(X,Y)$, $S \in Rel(Y,Z)$. Композиция (произведение, суперпозиция) $R \cdot S$ отношений R и S это отношение $R \cdot S \in Rel(X,Z)$ определяемое следующим образом:

$$R \cdot S = \{(x,z) \in X \times Z \mid \exists y \in Y, (x,y) \in R, (y,z) \in S\}.$$

Из определения видно, что композиция двуместных отношений суть двуместное отношение. Соответственно, не вполне понятно, каким образом многоместное отношение можно получить при помощи операции композиции двуместных. В целом, можно констатировать, что по известным источникам вопросы алгебраизации отношений остаются весьма туманными в рамках существующей теоретико-множественной парадигмы.

Разрешение вопроса сводимости многоместного отношения к комбинации двуместных в рамках теории множеств с использованием атрибутов «общности» и «различимости» сводится к ряду тривиальных утверждений.

Утверждение 1. Пусть R^n есть *n*-местное отношение $R^n \subseteq \prod_{i=1}^{n} X_i$. В рамках классической теоретико-множественной парадигмы на конечных множествах ($M : \{x \mid p(x), q(x)\}$) при существовании произвольных проекций[10] $R^n \to R^2$ произвольное *n*-местное отношение R_m^n, интерпретируемое как некоторое подмножество $X : \{(x_1, x_2, ..., x_n)\}$, где $m \le |X_1| \cdot ... \cdot |X_n|$, всегда может быть представлено заданным разбиением X элементами из R^2 ($X \equiv \bigcup_{i,j,k} (x_{i_k}, x_{j_k})$, $(x_{i_k}, x_{j_k}) \cap (x_{i_{k+1}}, x_{j_{k+1}}) \equiv \varnothing$) $\lhd$

Стоит отметить, что такое формальное разбиение приведет к потере всех потенциальных связей между непересекающимися элементами.

---

[10] Пусть $M = M_1 \times ... \times M_n$ - декартово произведение множеств. Тогда отображения вида $pr_i : M \to M_i$ множества M на множество M_i, отвечающие соотношению $pr_i (m_1, \ldots, m_n) = m_i$ и определенные для каждого *i* из множества $\{1, \ldots, n\}$, называются *проекцией декартова произведения по выделенному индексу i*.

Пусть $1 \le k \le n$ и $1 \le i_1 < i_2 ... < i_k \le n$. Тогда отображения вида $pr_{i_1, ..., i_k} : M \to M_{i_1} \times ... \times M_{i_k}$ множества M, отвечающие соотношению $pr_{i_1, ..., i_k}(m_1, \ldots, m_n) = (m_{i_1}, \ldots, m_{i_k})$, называются *проекцией декартова произведения по выделенной совокупности индексов* $\{i_1, \ldots, i_k\}$.

Аналогичным образом определяются проекция $R^M \to R_i^M$ произвольного подмножества $R^M \subseteq M$ на допустимое подмножество $R_i^M \subseteq M_i$ *i*-й компоненты декартового произведения M и проекция $R^M \to R_{i_1}^M \times ... \times R_{i_k}^M$ по выделенной совокупности индексов $\{i_1, \ldots, i_k\}$.

Утверждение 2. Пусть R^n есть *n*-местное отношение $R^n \subseteq \prod_{i=1}^{n} X_i$. В рамках классической теоретико-множественной парадигмы на конечных множествах ($M: \{x \mid p(x), q(x)\}$) при существовании произвольных проекций $R^n \to R^2$ произвольное *n*-местное отношение R_m^n, интерпретируемое как некоторое подмножество $X: \{(x_1, x_2, ..., x_n)\}$, где $m \le |X_1| \cdot ... \cdot |X_n|$, представимо, в общем случае, покрытием его элементами из R^2 ◁

Доказательство. При существовании проекций $R_m^n \to X$, $X \subseteq \bigcup_{i=1}^{n} X_i$, X: $\{(x_1, x_2, ..., x_n)\}$, где $m \le |X_1| \cdot ... \cdot |X_n|$. Т.е. X есть упорядоченное множество, где все элементы множества X различимыми по индексу. Множество X всегда может быть представлено его покрытием парами элементов $X \equiv \bigcup_{i=1}^{n-1} (x_i, x_{i+1})$. При чем, каждая пара (x_i, x_{i+1}) есть элемент R^2, таким образом, R^n можно представить в виде покрытия (избыточного) из элементов R^2 ◁◁

Отметим, что избыточное покрытие позволит сохранить все потенциальные связи между любыми элементами исходного множества .

При добавлении атрибута «целостности», в случае, когда отношение R^n представляет собой «целостное» «системное множество», проекций вида $R^n \to R^k$, $k < n$ может не существовать в принципе вследствие нарушения «целостности» элементов R^k.

В качестве примера приведем устойчивую симбиотическую систему («трава», «травоядное животное», «хищник»), где «трава» - медленно восполняемым ресурс. В рамках классической аксиоматики теории множеств существуют проекции исходного множества на пары вида («трава», «травоядное животное»), («травоядное животное», «хищник»), («трава», «хищник») и с помощью покрытия из таких пар можно восстановить исходное множество («трава», «травоядное животное», «хищник»). Однако, в действительности описанные выше проекции не существуют в природе, ибо разбиение симбиотической системы приводит к гибели все ее элементы и пары вида («трава», «травоядное животное»), («травоядное животное», «хищник»), («трава», «хищник») просто не могут существовать по отдельности.

Пусть задана номинальная нормированная шкала численных значений атрибута «целостности», и пусть значение свойства «целостности» на наборе $(x_1, x_2, ..., x_n)$ равняется 1, а для всех остальных наборов < 1.

Определим операцию композиции «системных множеств» правилом:

Для любой пары «системных множеств» Y_{sys} и Z_{sys} со значениями свойства «целостности» $\lambda t(Y_{sys}) = \lambda_1$, $\lambda t(Z_{sys}) = \lambda_2$, значение свойства «целостности» «системного множества» $Y_{sys} \circ Z_{sys}$ есть $\lambda t(Y_{sys} \circ Z_{sys}) = max(\lambda_1, \lambda_2)$.

Согласно введенной *операции композиции «системных множеств»* восстановить «системное множество» без потери «целостности» возможно лишь в случае, если существует хотя бы одна его проекция, являющаяся «целостным» «системным множеством».

3 Многоместность отношений как основной характеризующий атрибут сложности систем

Выберем из множества известных показателей сложности системы следующий: сложность системы есть число различимых объектов в ее абстрактной модели.

Из определения абстрактной системы следует, что основные различимые объекты в ее модели есть: 1) элементы основного множества, 2) объекты структуры системы.

Выбрав в качестве абстрактной метамодели системы *k*-гиперпространство семиотико-хроматических гипертопографов (СХ-$\eta\tau$-графов) $\Gamma\mathsf{s}$, отметим следующее.

Известно, что произвольный опорный гипертопограф $g^k_{\eta\tau}$ уровня топологизации k представим элементом (представителем) булеана B^V_{k+2} $k+2$ уровня топологизации множества-носителя V и далее элементом булева гиперпространства $[GF(2)]^{|\mathsf{B}^V_{k+1}|}$. В свою очередь, число различимых элементов булеана B^V_{k+1} фиксированного уровня $k+1$ прямой процедуры топологизации множества-носителя[11] характеризуется следующим утверждением [2].

Утверждение 3. Для любого конечного уровня топологизации $k+1$ $(k \geq 0)$ совокупная мощность булеана B^V_{k+1} (с элементом $\varnothing$) есть величина $|\mathsf{B}^V_{k+1}| = 2^{2^{\cdot^{\cdot^{2^{|V|}-1}}}-1}\Big\}$ (k экземпляров 2 в показателе) $\triangleleft$

В рамках теоретико-множественной аксиоматики мощность булеана (дискретной топологии на V) B^V_1 (с $\varnothing \in \mathsf{B}^V_1$) есть $2^n = \Sigma^n_{k=0} C^k_n$. При задании линейного (строго) порядка[12] на V в случае некоммутативности синтезированных отношений (подмножеств – ориентированных гиперребер) их общее число для фиксированного $1 \leq n_j \leq n$ составит $C^{n_j}_n \cdot n_j!$ или $A^{n_j}_n$. В результате, мощность допустимого (потенциального) множества конструктивно синтезированных отношений на упорядоченном множестве-носителе составит $\Sigma^n_{k=0} A^k_n$. Воспользуемся рядом утверждений из [21].

Утверждение 4. Мощность потенциального множества отношений с некоммутативным множеством-носителем V («некоммутативный булеан» $\hat{\mathsf{B}}^V_1$), $|V| = n$, имеет порядок $\sim O(n!)$ [13] $\triangleleft$

Доказательство. $\Sigma^n_{k=0} A^k_n = \Sigma^n_{k=0} \frac{n!}{(n-k)!} = n! \cdot \Sigma^n_{l=0} \frac{1}{l!}$.

Воспользуемся известным выражением для суммы бесконечного ряда: $1 + \Sigma^\infty_{k=1} \frac{1}{k!} = \Sigma^\infty_{k=0} \frac{1}{k!} = e$ (с учетом формального равенства 0!=1). Соответственно, $\Sigma^n_{k=0} \frac{1}{k!} = e - \Sigma^\infty_{k=n+1} \frac{1}{k!}$. При $n \to \infty$ $\Sigma^n_{k=0} \frac{1}{k!} \to e$ (снизу)[14]. Отсюда, $\Sigma^n_{k=0} \frac{1}{k!} < e$ для любого конечного (сколь угодно большого) n.

---

[11] В прямой процедуре все объекты (элементы) булеана B^V_k *apriori* декларируются различными и B^V_{k+1} есть множество всех подмножеств B^V_k.

[12] Напомним, что в множестве не допустимо присутствие тождественных элементов.

[13] Существенно более быстро растущая функция, чем 2^n.

[14] При $n \geq 10$ $\Sigma^n_{k=0} 1/k! = e$ с точностью до 10^{-7}.

В свою очередь, $\Sigma_{k=0}^{n} A_n^k < n! \cdot e$. Из общей теории сложности и O -символики дискретных алгоритмов[15] [22] следует выполнение $|\hat{\mathsf{B}}_1^V| \sim O(n!) \lhd\lhd$

Использование универсальной процедуры последовательной топологизации множества-носителя V для «некоммутативного булеана» $\hat{\mathsf{B}}_k^V$ k-го порядка приводит нас к следующей оценке.

Следствие 1 *к утверждению* 4. Мощность потенциального множества отношений в k-гиперпространстве с некоммутативным (упорядоченным) множеством-носителем V («некоммутативный булеан» $\hat{\mathsf{B}}_k^V$) имеет порядок $\sim O(...(\underbrace{(n!)!)...)!}_{k \text{ экземпляров } !})$ («гиперфакториальная»[16] сложность) $\lhd$

Исходя из априорного условия конечности мощности основного множества V, $|V| = n \leq N < \infty$ в контексте O-символики теории сложности дискретных алгоритмов, положим для оценки числа элементов основного множества систем выражение $\sim O(n)$. Тогда оценки числа элементов потенциальных различных объектов структуры системы будет иметь вид:

- для графов $\sim O(2^{n^2})$;
- для гиперграфов $\sim O(2^{2^n})$;
- для топографов $\sim O(2^{2^{2n}})$;
- для гипертопографов $\sim O(2^{2^{2^n}})$;
- для гипертопографов *k*-ого уровня топологизации $\sim O(2^{2^{\cdot^{\cdot^{2^n}}}})$ (k экземпляров 2 в показателе);
- для многоосновных гипертопографов $\sim O(...(\underbrace{(n!)!)...)!}_{k \text{ экземпляров } !})$.

Очевидно, что уже для графов отношение $O(n) \Big/ O(2^{n^2}) \to 0$ при $n \to \infty$, причём, скорость асимптотического приближения к 0 стремительно (гиперэкспоненциально / гиперфакториально) возрастает для всех структур последующих типов.

Заключение

В работе проведен первичный этап анализа адекватности классической аксиоматики теории множеств базовым моделям сложных систем. В качестве дополнительного аксиоматического атрибута конечного множества предложено задействовать атрибут «целостности» системы. В рамках аналогии 13-ой проблеме Д.Гильберта рассмотрена принципиальная возможность сведения произвольного многоместного отношения к комбинации отношений меньшей «-местности». Данный вопрос освещен как в контексте классической аксиоматики теории множеств, так и в предлагаемом её развитии, при добавлении атрибута «целостности», до аксиоматики «системных множеств».

---

[15] $\grave{O}(n)$ имеет порядок $O(f(n))$, если существуют константы c и n_0 такие, что для всех $n \geq n_0$ выполняется неравенство $\grave{O}(n) \leq c \cdot f(n)$.

[16] *Hyperfactorial* (англ., авт.) - от гиперпространства (некоммутивного): суперпозиция (*k*-композиция) факториалов. В отличие от *Super-duper-factorial* (англ.) (*гиперфакториал* - ?) Г.Боттомли (2000).

Что касается общей теории многоместных отношений, то предлагаемый материал, в определенном контексте является постановочным в рассматриваемой предметной области. Развивающаяся теория многоместных отношений требует существенных усилий для формирования её устойчивого верифицированного ядра, актуально необходимого для её использования при решении задач анализа и синтеза моделей сложных систем.

Приведенные оценки сложности моделей систем подтверждают базовый тезис теории о «концентрации» сложности системы в её структуре. Проекция вышеприведенных теоретических моделей систем на практическую плоскость необходимым образом связана с поиском принципиально новых инженерных решений (возможно, на основе новых физических принципов) в области синтеза архитектур вычислительных моделирующих систем. Тем более, что активно исследуемые до настоящего времени архитектуры квантовых вычислителей в своей классической интерпретации обеспечивают решение за полиномиальное время задач класса не превышающих по сложности $\sim O(2^n)$.

Благодарности

Статья подготовлена в рамках реализации Программы стратегического развития РГГУ, проект 2.1.1 «Решение комплексных проблем в области общественных и информационных наук» в Центре системного анализа и моделирования мышления ИИНТБ.

Список литературы

[1] *Баранович А.Е., Ханковский Д.Б.* Моделирование мышления в интеллектуальных системах: информационно-эволюционный этап развития // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV международной конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2013. - С. 327-338.

[2] *Баранович А.Е.* Семиотико-хроматические гипертопографы. Введение в аксиоматическую теорию: информационный аспект [Электрон. ресурс] = Semiotic chromatic hypertopographs. Introduction into the axiomatic theory: an information aspect. - 2-е изд., испр. и доп. - 1-е изд., М., 2003. Электрон. дан. - [М., Центр САММ, РГГУ, 2012]. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). Гос. рег. № 0321300055 ФГУП НТЦ "Информрегистр".

[3] *Баранович А.Е. К*-гиперпространство семиотико-хроматических гипертопографов как универсальная модель представления фактографических знаний / Мат. IX Междунар. конф. «Интеллект. сист. и компьют. науки». Т. 1. Ч. 1. – М., МГУ, 2006. - С. 53-55.

[4] *Баранович А.Е.* Семиотико-хроматические гипертопосети: унифицированная модель представления знаний / Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2011): матер. Междунар. научн.-техн. конф. / редкол.: В.В. Голенков (отв. ред.) [и др.]. - Минск: БГУИР, 2011. - С. 71-86.

[5] *Баранович А.Е.* Введение в информациологию и ее специальные приложения: дидактические материалы к специальному курсу. – М., РГГУ, 2011.

[6] *Баранович А.Е.* О систематизации аксиоматического аппарата предметной области «Искусственный интеллект» / Интеллектуальные системы. Т. 14. Вып. 1-4. – М., 2010. - С. 5-34.

[7] *Баранович А.Е.* Информационно-эволюционный подход в теории интеллектуальных систем // Интеллектуальные системы. 2011. Т. 15, вып. 1-4. - С. 15-52.

[8] *Баранович А.Е.* «Три кита» постнеклассической парадигмы теории интеллектуальных систем // Тр. IV Междунар. конгресса по интеллект. системам и информ. технол. / XII Междунар. научн.-техн. конф. «Интеллектуальные системы» (AIS'12). Т. 1. – М., Физматлит, 2012. - С. 306-312.

[9] *Смирнов С.В.* О типизации отношений в бинарных моделях знаний // Знания – Онтологии – Теории: Материалы Всероссийской конф. с международным участием (20-22 октября 2009 г., Новосибирск, Россия). Т. 1.– Новосибирск: Институт математики СО РАН, 2009. - С. 118-126.

[10] *Смирнов С.В.* Классификация допустимых спецификаций свойств симметрии бинарных отношений в моделях знаний // Двенадцатая Национальная конф. по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2010 (20-24 сентября 2010 г., Тверь, Россия): Труды конф. Т. 2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. - С. 196-203.

[11] *Осипов Г.С.* Построение баз знаний на основе взаимодействия интерактивных методов приобретения знаний. I. Концептуальные элементы модели мира // Известия РАН. Теория и системы управления. 1995. №3. – С. 160-174.
[12] *Осипов Г.С.* Приобретение знаний интеллектуальными системами: Основы теории и технологии. – М.: Наука-Физматлит, 1997. – 112 с.
[13] *Кулик Б.А.* Обобщенный подход к моделированию и анализу интеллектуальных систем на основе алгебры кортежей . // Труды VI Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'07 (Москва, 29 января – 1 февраля 2007 г.). С. 679-715.
[14] *Баранович А.Е.* О новом феноменологическом словаре теории интеллектуальных систем // Интеллектуальные системы. 2014. Т. 18, вып. 1-4 (в печ.).
[15] *Georg Cantor.* Beiträge zur Begründung der transfiniten Mengenlehre (нем.) // Mathematische Annalen. — 1895. — Т. 46. — С. 481.
[16] *Вавилов Н.А.* Не совсем наивная теория множеств // – С-Пб., СПбГУ, 2008.
[17] *Мальцев А.И.* Алгебраические системы – М.: Наука, 1970.
[18] *Баранович А.Е.* К вопросу идентификации тождественных объектов в модели *k*-гиперпространства СХ-гипертопографов // Тр. I Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «AIS-IT'09». Т. 1. - М.: Физматлит, 2009. - С. 481-490.
[19] *Баранович А.Е.* Однообъектная парадигма в обобщениях графов // Труды XI международных Колмогоровских чтений: сборник статей. - Ярославль, Изд-во ЯГПУ, 2013. С. 57-62.
[20] *Долгоруков В.В.* Первичность, Вторичность, Третичность: прав ли Ч.С.Пирс? // Философия математики: актуальные проблемы: матер. II междунар. научн.-техн. конф. - М.: МГУ, 2009. - С. 173-174.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ МНОГОУРОВНЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В.И. Батищев, Н.Г. Губанов, А.В. Чуваков

Самарский государственный технический университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
vib@list.ru
тел: +7 (846) 337-13-71, факс: +7 (846) 337-12-74

Ключевые слова: *категорно-функторная концепция, непроизводный структурный элемент, онтологии, знания.*

Abstract

Questions of realization of the device of formalization of structural non-derivative level of representation of system model are considered. On the basis of topological and category-functor representation of a transport network the method of decomposition of system on non-derivative structural elements knowledge bases of an information-analytical complex of the analysis of a condition of a transport infrastructure making a basis is offered.

Введение

Транспортная система (ТС) является важной составляющей крупномасштабной инфраструктурной промышленной системой, которой присущи свойства сложных систем, среди которых следует выделить многоаспектность и неопределенность их поведения; иерархию, структурное подобие и избыточность основных элементов и подсистем ТС, связей между ними, многовариантность реализации функций управления на каждом из уровней сложной технической системы, территориальную распределенность компонент. Однако ТС, как составляющая крупномасштабной инфраструктурной промышленной системы, имеет ряд особенностей: комплексная, а не отраслевая поддержка промышленных объектов; инерционность, связанная с крайне высокими затратами на коренное изменение структуры и направленность на развитие, реконструкцию и модернизацию существующих схем. В данных условиях информационно-аналитические системы анализа состояния крупномасштабных инфраструктурных промышленных систем являются основным средством и инструментом системных исследований в данной области. Это обусловлено с одной стороны, усложнением технических систем, когда эффективное формирование и отбор технических и организационных решений требует анализа десятков тысяч параметров [1,2], кроме того зачастую необходима не просто оценка отдельных параметров, а некоторой топологической структуры, что накладывает дополнительные сложности.

Создание новых методов создания таких систем является важной научной проблемой в области системного анализа, управления и обработки информации в промышленности.

Создание комплексной методологии анализа и построения информационно-аналитических систем оценки состояния сложных технических объектов лежит в русле современных тенденций к интеграции информационно-измерительных систем, систем имитационного моделирования, систем интеллектуального анализа данных, а также подсистем управления базами данных и базами знаний

Анализ современных тенденций, связанных с автоматизацией оценки состояния сложных технических объектов показал, что существенное усложнение объекта анализа приводит к тому, что результаты, полученные с использованием отдельных, разрозненных, хотя и глубоко исследованных, методов системного анализа, управления, интеллектуальных технологий не

приносят вполне удовлетворительного результата. Это подтверждается активизацией, на настоящий момент, исследований, опирающихся на синтез различных методов, формирования некоторых надпредметных метасистем, формирующих семантические конструкции, обобщающие накопленный опыт, методологии и информационные технологии системных исследований.

Учитывая специфику формирования ТС, для разработки многоуровневого информационно-аналитического комплекса, используется формально-математический аппарат на основе категорного подхода [2], основанный на включении сформированной категории обобщённых вычислительных моделей в продукционные системы представления знаний.

2 Категорийно-функторная концепция моделирования непроизводного структурного уровня

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. Предложенный формально-математический аппарат, на основе категорного подхода, для представления данных, основанный на включении сформированной категории обобщённых вычислительных моделей в продукционные системы представления знаний, позволит с единых позиций подойти к формализации данных и процессов на различных этапах обработки информации.

При таком аппарате формализации специалисты выделяют следующие уровни [3,4] представления системной модели: параметрический уровень; структурный уровень, включающий в себя контурный уровень; структурный непроизводный уровень; структурный производный уровень; семантический уровень, включающий в себя функциональный уровень. Все перечисленные уровни представления описываются в форме системы преобразования обобщённых вычислительных моделей.

Категорийно-функторная концепция предполагает, что в категории объект принципиально целостен, так как не рассматривается его внутренняя структура, а сопоставление и установление взаимосвязей осуществляется посредством функторов. Использование основных видов функторов (пренебрегающие и конструктивные) позволяет при проведении системных исследований корректно выполнять такие операции со структурами данных объектов, как декомпозиция и агрегирование[5]. Из этого следует, что основной задачей структурного производного уровня является декомпозиция категорий на более «бедные» категории с определением конструктивного функтора для перехода к категориям содержащих более сложные объекты. Например, построить функторы из категории топологических пространств в категории логических описаний операций проективного пространства, что позволит решать топологические задачи с помощью методов булевой алгебры.

Рассмотрим структурный непроизводный уровень применительно к ТС как топологическое пространство, определяемое её структурой. Топология рассматривает не количественные характеристики границ, а сам факт наличия или отсутствия физической связи между элементами. Если точки пересечения взаимодействую друг с другом на прямую, то они считаются связанными, что отражается на проекции некоторой линией. Комплекс таких линий определяет схему разбиения полиэдра на симплексы [6]. Тогда транспортную сеть можно представить как конечную совокупность K двумерных симплексов (минимальных единичных составляющих) некоторого евклидова пространства R^2, двумерного комплекса (полиэдра) K. Идея разбиение полиэдра на симплексы прямо следует из определения компонента комплекса. Компонентой некоторого комплекса K называется такой связный его подкомплекс L, что K распадается в сумму непересекающихся подкомплексов L и M. Если $K_1, \ldots, K_p$ – совокупность всех

компонент комплекса *K*, то они попарно не пересекаются и в сумме составляют весь комплекс *K* [6]. С другой стороны, в геоинформационных системах (ГИС) применение термина «топологический» не такое строгое как в топологии. В ГИС топологическая модель определяется наличием и хранением совокупностей взаимосвязей, таких, как соединение дуг на пересечениях, упорядоченный набор звеньев, взаимосвязи смежности между ареалами и т.п. В ГИС термин топологический означает, что в модели объекта хранятся некоторые взаимосвязи, которые позволяют проведение дополнительного пространственного анализа [7]. Топологические модели позволяют представлять элементы моделей объектов в виде графов. Площади, линии и точки описываются границами и узлами (дуговая/узловая структура). Каждая граница идет от начального к конечному узлу, и известно, какие площади находятся слева и справа. Теоретической основой моделей служат алгебраическая топология и теория графов. В соответствии с алгебраической топологией координатные типы данных: площади, линии и точки называются 2-мерными ячейками, 1-мерными ячейками и н0-мерными-ячейками соответственно. Тогда, карта транспортной сети будет рассматривается как ориентированный двухмерный ячеечный комплекс или связанный граф $G=(U, X)$, где $U = \{ P_i, \ldots, P_m \}$ множество вершин (набор пересечений дуг), а $X = \{\{\{ P_i \},\{ P_к \}\}\}$ множество дуг графа. Процедура поиска всех симплексов данного комплекса, где каждый n – мерный симплекс разбиения имеет $n+1$ вершин, попарно соединяющихся ребрами, каждому из них соответствует $n+1$ максимальный полный подграф, сводится к поиску максимальных полных подграфов исходного графа [8].

3 Поиск и обмен знаний между базами знаний в СППР управления ТС

Использование категорно-функторного аппарата позволило сформировать базу знаний, включающую в себя несколько десятков НСЭ (непроизводный структурный элемент) [9] транспортной сети. Данная база знаний входит в состав информационно-аналитической системы анализа состояния и управления которая включает в себя систему поддержки принятия решения (СППР) оперативного реагирования. При комплексном моделировании сложных технических систем (СТС) требуется проводить разработку и реализацию в рамках каждой конкретной ИСППР своих принципов, методов, моделей и алгоритмов согласования разнородных моделей и критериальных функций, ориентированных на заданную предметную область. Тогда одной из основных задач комплексного моделирования СТС является синтез (поиск и обмен) знаний между разнородными базами знаний СППР управления ТС [5] (рисунок 1).

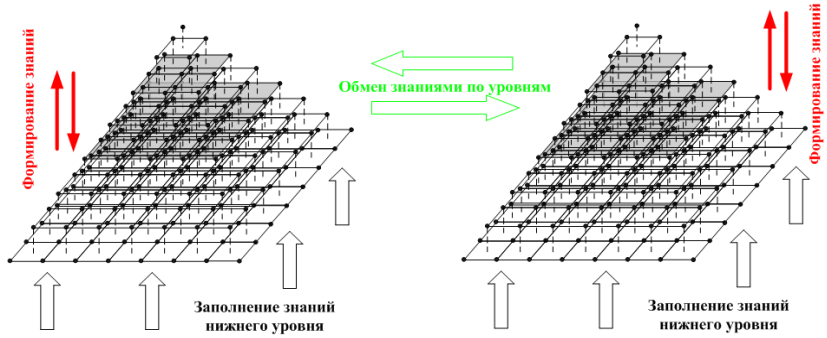


Рисунок 1 Обмен и формирование знаний в БЗ СППР

Множество исследований в области искусственного интеллекта были направлены на решение проблем представления знаний и выполнения логического вывода на знаниях, которые объединяли ранний опыт концептуального моделирования с использованием формальных логик. Центральным элементом этих исследований являлось понятие «онтология», которое

представляет собой совместно используемое, формальное описание некоторой предметной области. И хотя исследователи онтологий рассматривают управление знаниями как одну из наиболее важных областей их применения [10] онтологии все еще слабо используются в разработке разнородных СППР.

В последние годы начались активные исследования по использованию онтологий в СППР. В настоящее время публикуется огромное количество статей по использованию онтологии и семантических методов для создания различных программных систем в том числе при комплексном моделировании СТС. Однако проблема состоит в том, что отсутствует комплексный подход, который бы охватывал многочисленные исследования решения локальных задач но использованию онтологических моделей[11].

Исходя из тенденции использования синтеза баз знаний в СППР управления ТС и связей процессов управления знаниями и различных по природе процессов, предлагается проектировать комплексные интеллектуальные системы СППР ТС на основе методов построения единой онтологической модели и семантических методов описания объектов знаний [12].

Семантический вывод, представляющий в общем случае онтологию, организуется как волновой процесс, использующий свойства отношений, выходящих из узлов, задающих исходную ситуацию. Критерием останова процесса является либо достижение целевой ситуации, либо превышение длительности времени, отведенного для решения задачи [13].

Для поиска и обмена знаниями между БЗ в СППР использование онтологии позволяет точнее интерпретировать смысл терминов, фигурирующих в запросах, а также дополнять или расширять запрос понятиями, которые связаны с терминами запроса отношениями род—вид, часть- целое, ассоциация и др. (Рисунок 2). Подобное расширение запроса преследует цель уменьшения неполноты ответа на него.

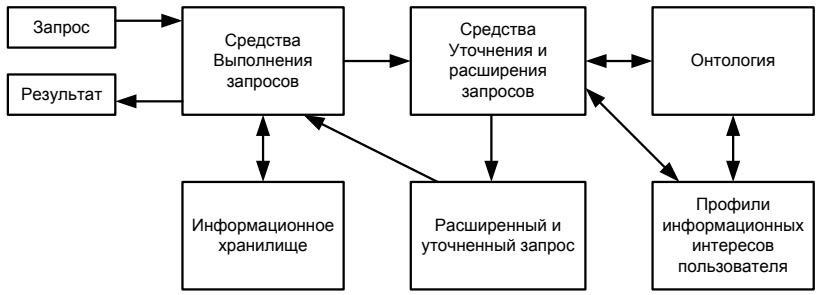


Рисунок 2 Схема запроса в БЗ на основе онтологического подхода

Еще одно направление развития технологии обмена знаний связано со структуризацией и унификацией сведений об объектах. Такие сведения по отношению к исходным данным играют роль метаданных.

Тогда некоторые элементы метаданных допускают четкое определение релевантности запроса и записи от одной БЗ к другой БЗ (Рисунок 3).

Введем следующие обозначения: G’ — множество объектов в информационном хранилище, $g'_i \in G$ - i-й объект. В данном контексте под объектом будем понимать как собственно характеристики квартала, так и отдельную запись в БЗ о квартале.

Зададим на G’ оценку смысловой близости пары объектов в базах знаниях $r(g_i; g_j) >= 0$. При $r = 0$ объекты g_i g_j релевантные.

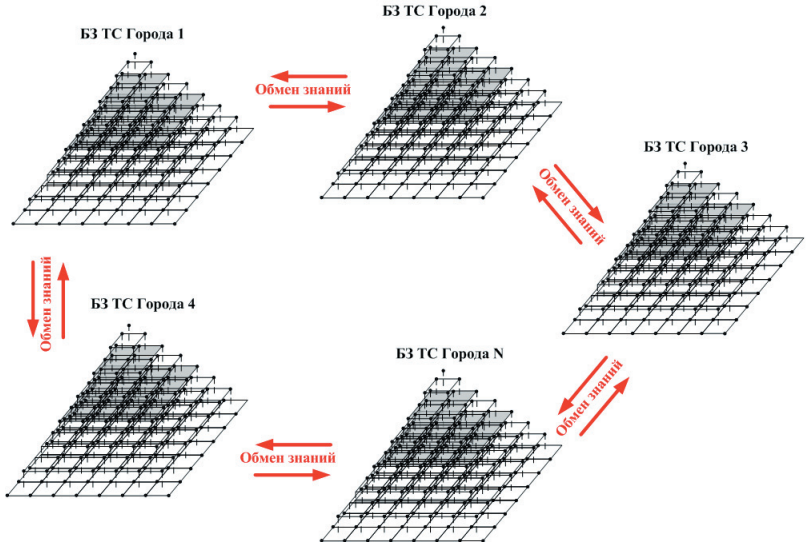


Рисунок 3 Схема обмена знаниями между БЗ

Также введем оценки ряда важных свойств документов:

$S=\{S_1,S_2,\ldots,S_k\}$, $K>0$ Пусть оценка каждого свойства S_k выражается действительным числом, принадлежащим некоторому интервалу. Для определенности примем, что чем больше значение $S_к$, тем ближе сравниваемый объект к оригиналу.

Поисковый запрос может рассматриваться как виртуальный объект Z. В идеальном случае - $r(z, g_j) =0$ ему точно соответствует объект g_j Используя введенные обозначения, определим следующие виды поиска [10].

1. Найти $\{G_j \subseteq G)\ r\ (z, g_i \in G_j) \rightarrow \min$. Если $G_j = 0$, то в G нет объектов, релевантных запросу. При $G_j =1$ есть единственный подходящий объект. Если же $G_j > 1$, то таких объектов несколько.

2. Найти $(G_j \subseteq G)\ r\ (z, g_i \in G_j) <= \Delta$, где → — оценка наибольшего допустимого расхождения запроса и искомых объектов.

3. Найти $(G_j \subseteq G)\ S_f\ (g_i \in G_j) \rightarrow \max$. Результатом поиска служит подмножество объектов, которым приписана наибольшая оценка близости f-го свойства. Обобщением этого варианта является векторный поиск, учитывающий оценки нескольких свойств.

4. Найти $(G_j \subseteq G)\ r\ (z, g_i \in G_j) <= \Delta\ \&\ Sf\ (g_i \in G_j) \rightarrow \max$.

Интеллектуальные возможности обмена знаниями в части функций информационного поиска и сопоставления обусловлены способами задания и вычисления r и S.

Эффективность информационного поиска объектов в БЗ оценивается по информационной полноте и информационному шуму. Названные показатели выражаются коэффициентами полноты $К_п$ и шума $К_ш$ соответственно. Коэффициенты $К_п$ и $К_ш$ принимают значения в интервале от 0 до 1. В некоторых источниках эти коэффициенты выражают в процентах.

Пусть БЗ предъявлен i-й запрос. БЗ содержит множество объектов G_t, релевантных этому запросу. В результате поиска получено множество $G°_i$. Возможны следующие варианты.

$G°_i = G_j$. Идеальный вариант: полнота максимальна ($К_п = 1$), а шум нулевой ($К_ш = 0$).

$G°_i \subset G_j$ Имеет место неполнота ($0 < К_п < 1$), а шум отсутствует ($К_ш = 0$).

$G°_i \supset G_j$ Неполнота исключается ($К_п = 1$), но есть шум ($0 < К_ш < 1$).

$G°_i \cap G_j = \varnothing\ \&\ G°_i \neq \varnothing\ \&\ G°_i \neq G_i$. Худший вариант: нулевая полнота (ни одни релевантный объект не найден; $К_п= 0$) и максимальный шум (все, что выделено, не соответствует запросу; $К_ш = 1$).

5. $G°_i \cap G_j \neq \varnothing$ & $G°_i \subseteq G_i$ & $G_i \subseteq G°_i$ & $G°_i \neq G_i$ Имеют место и неполнота ($0<К_п<1$) и шум ($0<К_ш<1$).

Анализируя, нетрудно заметить, что успешность поиска формально определяется степенью совпадения множеств $G°_i$, G_j (в идеале, при $G°_i = G_j$ выборка содержит все релевантные объекты и ни одного не релеватного). Это дает возможность ввести оценку эффективности информационного поиска O_I на основе мощностей множеств $G°_i$, G_j.

Заключение

Предложенные методы формального представления ТС на этапе структурного непроизводного уровня позволили сформировать базу знаний, включающую в себя несколько десятков НСЭ транспортной сети. Однако обеспечение высокой точности и полноты обменного процесса не являются единственным критерием эффективности синтеза баз знаний СППР. Не менее важным является и показатель быстродействия, то есть среднее время поиска одной структурной единицы. Эта проблема особенно актуальна для многомодульных баз знаний, содержащих значительное количество знаний об объектах.

Список литературы

[1] 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.

[2] 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.

[3] Батищев В.И.Категорное представление сложных технических объектов в индуктивных системах логического вывода / В.И. Батищев. Н.Г. Губанов. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. IX Международ. конф. – Самара: СНЦ РАН, 2008.-С.185-191.

[4] 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.

[5] 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. ISBN 5-02-033789-7

[6] Понтрягин Л.С. Основы комбинаторной топологии. 3-е изд. [Текст] / Л.С. Понтрягин -М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. -120 с.

[7] Журкин И. Г. Геоинформационные системы. [Текст] / И.Г. Журкин, С.В. Шайтура — М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2009. — 272 с. ISBN 978-5-91136-065-8

[8] Зыков А.А. Основы теории графов. [Текст] / А.А. Зыков – М.: Вузовская книга, 2004. – 664 с.

[9] Батищев В.И. Формализация и обобщение непроизводных структурных элементов в системе многоуровневого анализа транспортной инфраструктуры [Текст] / В.И. Батищев, Н.Г. Губанов, А.В. Чуваков – Тр. XIV Международной конференции / Под ред.: акад. Е.А. Федосова, акад. Н.А. Кузнецов, проф. Виттиха. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. - С.532-537 ISBN 978-5-93424-584-0

[10] Leger A. Successful Scenarios for Ontology-based Applications V1.0. Onto Web: Deliverable 2.2. - Paris, 2002. - 100 p. [Электронный ресурс]. - 2012. - Режим доступа: http://wvvw.aifb.uni-karlsruhc.deAVBS/ysu/ publications/Onto Web Del 2-1 .pdf.

[11] Berners-I.ee T., Hendler J., Lassila O. The Semantic Web // Scientific American. - 2011. - V. 284. - № 5. - P. 35-43.

[12] Гаврилова Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем [Текст] / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский.СПб.: Питер, 2010. — 384 с.

[13] Кандрашина Е.Ю. Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах [Текст] / Е.Ю. Кандрашина, Т.В. Литвинцева, Д.А. Поспелов — М.: Наука, 1989. — 328 с.

УПРАВЛЕНИЕ ЛОГИСТИКОЙ РЖД В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

А.А. Белоусов[1], П.О. Скобелев[2], В.Г. Матюхин[3], Н.А. Кузнецов[4]

[1]ООО «НПК «Мультиагентные технологии»
443013, Самара, Московское шоссе, 17, офис 1201, Россия
info@kg.ru

[2]Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия,
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70
petr.skobelev@gmail.com

[3]ОАО «НИИАС»
107996, Москва, Орликов переулок, д.5, стр.1, Россия
info@vniias.ru

[4]ИПУ РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, д.65, Россия
snv@ipu.ru

Ключевые слова: *логистика реального времени, интеллектуальные системы, управление железнодорожными ресурсами, мультиагентные системы, адаптивное планирование*

Abstract
The article discusses conceptual approaches to railways real-time logistics. Several problems formulations have been considered: the problem of adaptive railroad traffic control in real time, the problem of adaptive freight trains schedule master-plan production and the problem of passenger trains scheduling with given changes in traffic flow.

Введение

Современный рынок характеризуется двумя внешне противоречивыми тенденциями: высокой динамикой и непредсказуемостью спроса конечных потребителей с одной стороны и необходимостью повышать эффективность использования производственных ресурсов с другой.

В конкурентной борьбе выигрывает тот, кому удается более полно удовлетворить потребности конечных клиентов без нарушения технологических процессов в цепочке создания ценности.

При этом должна повышаться скорость принятия и реализации управленческих решений с учетом растущего числа взаимосвязанных и часто противоречивых факторов. Изменения запросов потребителей должны оцениваться на технологическую осуществимость и приниматься в темпе, соответствующем скорости протекания технологических процессов производства товаров или оказания услуг.

В последнее время за рубежом даже появился специальный новый термин «экономика реального времени», подчеркивающий важность оперативного принятия решений и взаимодействия потребителей и поставщиков продукции и услуг, необходимости принятия решения по каждой потребности потребителя именно в момент ее возникновения. Например, формирование сводного заказа может рассматриваться как большое благо при определенных условиях, но в другой ситуации, при других условиях, ведет к недопустимой задержке заказов, запоздалому и неэффективному планированию ресурсов для их выполнения. Это все равно, что по представленному в пятницу отчету принимать решения, которые нужно было принять еще во вторник, т.е. при необратимости реального принятия решения «поезд мог уже уйти».

1 Концепция логистики реального времени

Экономика реального времени уже доказывает свою эффективность по всему миру. Например, при сборке автомобилей без ущерба для технологии и стоимости производства некоторые корректировки спецификации удается принимать от заказчика даже, когда автомобиль уже находится на конвейере окончательной сборки, т.е. за несколько часов до отгрузки автомобиля. Естественно, это немыслимо без глубокой интеграции автоматизированных информационно-управляющих систем в технологические процессы.

Не меньший эффект от перехода к реальному времени достигается в транспортно-логистическом бизнесе. Например, при управлении распределением ресурсов таксопарка, когда случайный характер поступления заказов от клиентов приводит к необходимости регулярного оперативного перепланирования расписания перевозок. Аналогичные решения имеются и в междугородних автомобильных перевозках, когда в течение рейса имеется техническая возможность принятия новых и переназначения существующих заказов между грузовиками, часто даже с изменением маршрута следования. Важным положительным эффектом от перехода на логистику реального времени является оперативное решение проблем с распределением транспортных средств в ответ на задержки при выполнении операций погрузки-выгрузки, с отказом клиента от заказа и т.д.

Требование «реального времени» в логистике является принципиальным и напрямую связано с обеспечением эффективного использования ресурсов. В таких условиях применение классических методов оптимизации чаще всего оказывается неприемлемым на практике, так как пока каждый принятый индивидуальный запрос пройдет через все стадии переработки, минует различные информационные системы, и принятое решение дойдет до конкретного ресурса, он может безнадежно устареть или радикально изменится вся ситуации с ресурсами на предприятии. Изменение условий задачи может произойти до того, как сам оптимум будет найден (по причине сложности алгоритмов и трудоёмкости вычислений, особенно при распределении неоднородных ресурсов). Поэтому на передний план выдвигается проблема нахождения «рациональных методов», обеспечивающих допустимое (т.е. устраивающее всех) распределение ресурсов, когда фактор времени становится первостепенным.

Для достижения этой цели предлагается разработка интеллектуальной информационно-управляющей системы, реализующей концепцию «логистики реального времени», которая позволит обеспечить максимально эффективное использование всех транспортных ресурсов при оперативном реагировании на изменение потребностей конечных клиентов или возможностей ресурсов предприятий в реальном времени.

2 Логистика реального времени на железнодорожном транспорте

На железнодорожный транспорт оказывает сильнейшее давление конкуренция с другими видами перевозки. Сегодня грузовладелец ожидает более высокого уровня обслуживания, он более требователен, чем 5-10 лет назад. Он заинтересован в доступности и качестве услуги перевозки, в массе дополнительных опций к базовой услуге, например, в организации движения грузовых поездов по расписанию, обеспечивающей высокую скорость или точность доставки. Он с трудом понимает вопросы технологической возможности доставки, необходимость заблаговременной подачи заявки с указанием конкретных вагонов и станции назначения.

Однако необходимость заблаговременного планирования перемещения грузов и вагонопотоков является принципиальной особенностью технологии организации железнодорожных перевозок. Любое снижение предсказуемости перемещения грузов и порожних вагонов увеличивает и без того высокий уровень неравномерности перевозок, а это – прямой путь к снижению пропускной способности и эффективности использования инфраструктуры. Стихийность

несогласованных корректировок, связанных с грузом и вагоном, в условиях традиционных методов и средств видится совершенно недопустимой.

Но тогда как же в условиях заблаговременного планирования развить индивидуальный подход и добиться высокой удовлетворенности конечных потребителей услуги грузоперевозки? Важным элементом здесь может стать постепенная реализация принципа «логистика в реальном времени».

Суть принципа применительно к железнодорожному транспорту сводится к такой организации планирования всей эксплуатационной работы, что каждая потребность грузоотправителя в момент ее появления должна быть автоматически оценена на технологическую возможность и оптимальность доставки, с учетом пропускных возможностей инфраструктуры и общей эффективности перемещения вагонов на сети, причем с возможностью адаптивного (без полного останова и разрушения сложившегося расписания) включения заявки в план, возможно, с изменением планов ранее распределенных и запланированных заявок. Наличие таких средств адаптивного планирования может показать, что не всегда корректировки грузоотправителя затрудняют перевозку, часто они наоборот, гораздо лучше укладываются в уже запланированные вагонопотоки, чем первоначальная заявка, и могут быть приняты с улучшением общей эффективности. Однако, сказать, так ли это, можно будет только в случае, когда имеется пономерной (пообъектный) прогноз расписания перевозки по каждой поданной конкретной заявке, и все они вместе согласованы с планами оборота вагонов, роспуска и формирования поездов, обеспечения поездов тяговыми ресурсами, приема-передачи поездов по участкам, причем с требуемой глубиной прогнозирования.

То же самое в логистике реального времени относится и к изменению возможностей, например, связанных с вагонами или локомотивами. В настоящий момент основные ограничения в выборе и замене вагонов связаны во многом с отсутствием актуальной информации о доступных вагонах, их размещении и планируемом на момент отгрузки положении у грузоотправителей. В этом случае обмен в реальном времени данными о заявке и о расположении вагона позволит выбрать действительно подходящие вагоны.

Принцип логистики реального времени позволит, в частности, при формировании механизма биржевой торговли вагонами исключить отрыв коммерческой составляющей от технологической. Естественно, для этого темп и детальность принятия технологических решений должен быть ускорен до уровня проведения биржевых торгов, то есть до того самого реального времени.

3 Информационная поддержка логистики реального времени

Для внедрения такого рода новых подходов, позволяющих добиться более эффективного управления РЖД в целом, требуется создание интеллектуальных систем поддержки принятия решений в реальном времени, которые призваны «владеть» текущей ситуацией с заказами и ресурсами, оперативно реагировать на любые события, выявлять возможные варианты для принятия решений по ходу изменения ситуации, сопоставлять эти варианты, рекомендовать решения, строить планы по их исполнению, вести мониторинг исполнения и оценивать результаты, и даже оценивать ущерб от несвоевременного принятия решений, ведущих к простою, холостому ходу или дефициту ресурсов.

Примеры создания такого рода интеллектуальных систем для РЖД на основе мультиагентных технологий уже имеются, но требуется их дальнейшее функциональное и технологическое развитие в указанном направлении.

3.1 Адаптивное управление движением поездов в реальном времени

В состав интегрированной системы управления железнодорожным транспортом (ИСУЖТ [1]) ОАО «РЖД» входит модуль адаптивного управления движением поездов в реальном времени, опаздывающих под влиянием непредвиденных событий и нештатных ситуаций (разра-

ботка компаний «ПрограмПарк», «Разумные Решения» под руководством ОАО «НИИАС»). В настоящее время система внедрена на участке высокоскоростного движения Санкт-Петербург - Москва и на участке Санкт-Петербург – Бусловская[2].

Система сначала детализирует график движения поездов до необходимой для управления в реальном времени точности (то есть до станционного пути, блок-участка и до секунды), а далее выполняет его корректировку в реальном времени по поступающим событиям (заявки на ремонт участков пути, фактическое продвижение поездов, поломки поездов и блок-участков и т.д.). Реализуется как логика реакции на события, когда каждое событие запускает цепочку перепланирований ресурсов, так и проактивная оптимизация планов, позволяющая улучшать варианты, пока есть время для работы системы и принятия решений.

Динамическая перестройка плана по событиям и нештатным ситуациям происходит настолько локально, как только возможно, и так глобально, как только это требуется. Другими словами, перестраиваются расписания движения только тех поездов, которые были затронуты нештатной ситуацией, в каждый момент времени, стараясь погасить волну возмущений, требующих перестроений плана-графика.

Система базируется на методе сопряженных взаимодействий для управления распределения ресурсов в реальном времени [3], протоколе обмена задачами между «агентами ресурсов» [4,5], единой онтологии железнодорожных ресурсов, для описания сущностей системы и правил их взаимодействия между собой.

Интересно, что с помощью созданной системы было показано, что есть ситуации, в которых высокоскоростной поезд вынужден уступить дорогу низкоприоритетному грузовому поезду, т.к. иначе он перекроет дорогу и нарушит расписание другим высокоскоростным поездам и ущерб будет еще больше!

3.2 Мультиагентная система адаптивного построения сетевого графика движения поездов

Другим примером интеллектуальной системы более высокого уровня планирования является разрабатываемая в настоящий момент мультиагентная система построения сетевого графика движения поездов [7].

Как известно, график движения поездов обеспечивает ритмичную, согласованную работу всего организационно-технического комплекса предприятий железнодорожного транспорта при условии, что он соответствует реальным пассажиро- и грузопотокам, учитывает особенности технологии работы тягового подвижного состава и локомотивных бригад, а самое главное – соблюдается, т.к. наиболее эффективным способом производства является равномерная слаженная работа.

Однако, разработка оптимального графика движения является NP-полной зада-чей, т.е. алгоритмы, нацеленные на достижение глобального оптимума, не имеют практической ценности. Более того, эта задача является многокритериальной, причем состав критериев зависит от конкретного участка, размера движения и технологии вывоза поездов. В отличие от разработчика программы для ЭВМ, инженер-графист имеет возможность совершенствовать графики из года в год, последовательно сохраняя лучшие из ранее найденных схемы прокладки.

Задан некоторый участок инфраструктуры, состоящий из набора станций, станционных приемо-отправочных путей, путей между станциями. Необходимо максимально равномерно и с минимальным временем стоянок проложить по этому участку графики движения поездов (нити) исходя из требуемых объемов движения с учетом нормативных и инфраструктурных ограничений (требуемые времена хода, интервалы движения поездов, пути по станции, наклон рельефа и пр.). При прокладке нитей необходимо учитывать нити пассажирских поездов и окна ремонтных работ, адаптивно разрешая возникающие конфликты. В результате решения задачи должен быть получен планируемый график, обеспечивающий ритмичность, безопасность и эффективность движения поездов по участку.

Опыт применения классических алгоритмов оптимизации для выбранной задачи описан в работе [8]. Предложенные структуры данных и алгоритмы удачно дополняют развиваемый подход и могут быть использованы на базе созданной мультиагентной платформы, вследствие чего могут быть получены новые возможности системы и повышено качество решения многокритериальных задач.

В создаваемой мультиагентной системе предлагается заданный размер движения и данные о «ценности» конкретных поездов, всю совокупность инфраструктуры и тяговых ресурсов представлять ПВ-сетью, представляющей собой самоорганизующийся план распределения ресурсов по задачам [9]. Возникновение любого нового события может запускать адаптивную перестройку связей агентов потребностей и возможностей, которая заканчивается нахождением консенсуса агентов, в котором ни один агент не может более улучшить ситуацию.

Применение мультиагентных технологий в задачах построения и оптимизации нормативных, вариантных и актуализированных графиков движения поездов позволит:

- учесть при планировании гораздо больше особенностей построения графиков, практикуемых инженерами-графистами, чем это возможно при применении классических алгоритмов математического программирования. В частности, могут быть заданы практически произвольные функции расходов, связанных с движением поездов;
- снять необходимость полной перестройки графика при съеме одной из докладываемых «ниток»;
- обеспечить лучшую связь человек-машина, объяснить диспетчеру, почему машина выбрала тот или иной вариант решения, а также полностью учесть частичные решения, принятые человеком;
- учесть при разработке графика результаты работы других мультиагентных систем: системы подвязки тяговых ресурсов, системы оптимизации плана формирования, системы прогнозирования грузопотоков и др.

В целом, это приведет к более качественному построению графиков движения поездов при одновременном повышении уровня автоматизации и позволит существенно расширить возможности сетецентрической мультиагентной технологической платформы управления железнодорожным транспортом.

3.3 Адаптивное построение графиков движения пассажирских поездов в реальном времени с учетом изменений пассажиропотока

Наряду с управлением грузовым транспортом, в РЖД стоит задача осуществления пассажирских перевозок на основе характеристик пассажиропотока. Наиболее сложной при такой постановке является задача построения эффективного (по целому набору критериев) графика движения пригородных поездов, которая обладает следующими особенностями:

- большое количество пассажиров следует на короткие расстояния;
- неравномерность пассажиропотока по часам суток, дням и зонам;
- сокращение пассажиропотока по мере удаления от города;
- необходимость частых остановок для посадки и высадки пассажиров.

Как следует из указанных особенностей, график движения пригородных поездов сильно зависит от мощности пассажиропотока и станций назначения пассажиров. Заранее рассчитанный график движения может учитывать только среднестатистические данные о пассажиропотоке, который в реальности может отличаться как в большую, так и в меньшую сторону. Это делает такой график движения неэффективным: в случае сокращения пассажиропотока тратятся лишние энергоресурсы на движение полупустых поездов, в случае повышения – падает качество обслуживания пассажиров. При этом корректировка графика движения пригородных поездов происходит в условиях ограниченной пропускной способности линии запланированными грузовыми поездами и поездами дальнего следования, что существенно повышает сложность задачи.

Таким образом, адаптивная корректировка графика движения поездов в реальном времени по текущему пассажиропотоку позволит, с одной стороны, повысить эффективность использования ресурсов (включая составы, электроэнергию, работников), а с другой стороны – удовлетворенность пассажиров.

Похожая задача решается в рамках разрабатываемой мультиагентной системы управления движением поездов московского метрополитена, позволяющей на основании фактической загрузки перегонов корректировать количество составов на линии и планировать диспетчерские регулировки для их оптимального распределения по линии.

Пусть задан некоторый участок инфраструктуры, состоящий из головной и пригородных станций, путей между станциями. Необходимо скорректировать существующий график движения пригородных поездов, исходя из размеров и интервалов движения по характеристикам текущего пассажиропотока, с учетом нормативных и инфраструктурных ограничений.

Предлагается осуществлять поиск решения задачи в виде сбалансированной и согласованной ПВ-сети, в которой в качестве главной потребности выступает желание пассажиров проехать от станции отправления до станции назначения, а в качестве главной возможности – состав, который может довести пассажира. При этом в ПВ-сети должны присутствовать возможности и потребности других поездов (грузовых, пассажирских дальнего следования, высокоскоростных), грузов, инфраструктуры, работников, станций и т.д., т.к. только в этом случае, можно одновременно обеспечить удовлетворение общих и частных интересов участников движения.

При такой постановке задачи, увеличение пассажиропотока будет связано с увеличением потребности пассажиров в проезде по инфраструктуре. Это, в свою очередь, будет увеличивать запросы к составам на перевозку. Существующий баланс в ПВ-сети будет локально нарушен, что потребует от агентов потребностей и возможностей перестроиться с учетом изменения характеристик пассажиропотока, и может привести, например, к возникновению новых пригородных поездов. Учитывая ограниченность в пропускной способности, новые пригородные поезда могут следовать без посадок на отдельных станциях, двигаться до конкретной зонной станции или даже изменять расписание существующих пригородных поездов. В особом случае, когда для пригородных поездов не могут быть найдены необходимые нитки в графике движения, возможны корректировки (как траекторные, так и временные) грузовых поездов и даже поездов дальнего следования, с учетом их максимально возможной задержки.

Использование мультиагентных технологий для корректировки графика движения поездов в реальном времени с учетом пассажиропотока позволит существенно повысить эффективность и культуру пригородных пассажирских перевозок, особенно в условиях резкого изменения пассажиропотока или возникших ограничениях движения.

Заключение

Отличительной особенностью предложенного подхода является возможность принятия решений в реальном времени с применением мультиагентных технологий, что достигается за счет частичной замены перебора вариантов решений, требующего больших вычислительных затрат, переговорами сторон, направленными на выявление конфликтов и достижение компромиссов при построении сложных расписаний, причем двусторонним образом, как со стороны поступающих заказов, так и функционирующих ресурсов.

Эта особенность обеспечивает важные преимущества при решении сложных задач распределения ресурсов в реальном времени, что может быть особенно актуально для решения задач управления пассажиро- и грузоперевозками РЖД.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку в рамках грантов № 13-07-13167 офи_м_РЖД и 13-01-13105 офи_м_РЖД.

Список литературы

[1] Матюхин В.Г., Шабунин А.Б. ИСУЖТ. Концепция и реализация // Труды 1-ой научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте ИСУЖТ-2012», Москва, 15-16 ноября 2012 г. – С. 15-18.

[2] Белоусов А.А., Скобелев П.О., Степанов М.Е., Ефремов Г.А., Курбатов Е.В., Мультиагентная система для адаптивного управления движением поездов в реальном времени на направлении Санкт-Петербург–Москва // Труды второй научно-технической конференции Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте ИСУЖТ-2013, Москва, 21-21 октября 2013, С 52-57

[3] Виттих В.А., Скобелев П.О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном времени // Автометрия. –2009. – №2. – с. 78–87.

[4] Abbink, E.J.W., Mobach, D.G.A., Fioole, P.J., Kroon, L.G., van der Heijden, E.H.T., Wijngaards, N.J.E. (2009), Actor-Agent Application for Train Driver Rescheduling // In: Proceedings of AAMAS, Budapest, Hungary, 2009. – P 513-520.

[5] П.О. Скобелев, А.А. Белоусов, С.О. Лисицын, А.В. Царев. Разработка интеллектуальной системы управления грузовыми перевозками для полигона «Восточный» // Труды XV Международной конференции “Проблемы управления и моделирования в сложных системах”, Самара, 25-28 июня 2013г. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. – С. 391-396.

[6] А.Б. Шабунин, Н.А. Кузнецов, П.О. Скобелев, И.О. Бабанин, С.С. Кожевников, Е.В. Симонова, М.Е. Степанов, А.В. Царев. Разработка мультиагентной системы адаптивного управления ресурсами ОАО «РЖД» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. №1. – С. 23–29.

[7] Абрамов А. А., Скобелев П. О., Белоусов А.А., Еремин А. С., Белов М. В. Мультиагентные технологии адаптивного построения графика движения поездов // Труды второй научно-технической конференции Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте ИСУЖТ-2013, Москва, 21-21 октября 2013, С 27-29.

[8] A. Jamili et al. Solving a periodic single-track train timetabling problem by an efficient hybrid algorithm // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 25 (2012). – P. 793-800.

[9] Виттих В. А., Скобелев П. О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и Телемеханика. 2003. №1. – С. 162-169.

ИНФОРМАЦИОННОЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ОФИСА НАУЧНОГО ЖУРНАЛА НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЙ

Н.М. Боргест[1,2], Б.К. Келдибаев[2], С.В. Смирнов[1]

[1]Институт проблем управления сложными системами РАН,
443020, г. Самара, ул. Садовая, 61, Россия
borgest@yandex.ru, smirnov@iccs.ru
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

[2]Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)
443086, Самара, Московское ш. 34, корп. 10, Россия
bullzzz2689@gmail.com
тел: +7 (846) 267-46-47

Ключевые слова: *онтология, научный журнал, семантическая сеть, документооборот*

Abstract
The paper describes the magazine edition ontology, which examines the essences, their attributes and relationships inherent in the subject area. Ontological analysis conducted on the basis of IDEF5 technique. Functional model describing the connections, control mechanisms and processes which take place during the publication of the journal, are based on IDEF0 technique.

Введение

В статье рассматриваются перспективы автоматизации информационных потоков и документооборота в офисе редакции научного журнала «Онтология проектирования». Созданный в 2011 году этот научный журнал расширяет географию своего присутствия на информационном поле научных знаний, охватывая всё больший круг авторов и сотрудников редакционной коллегии. На рисунке 1 представлена «карта» участников выпущенных номеров журнала за 2011-2013 годы. В настоящее время в подготовке журнала участвуют представители России, Украины, Белоруссии, Казахстана и Великобритании из более чем 20 городов мира.

Рисунок 1 – География авторов и членов редакционной коллегии научного журнала «Онтология проектирования»

Издание журнала сопровождается потоками информации, формат и содержание которой находятся в постоянном изменении и сопровождаются многократными правками. Вследствие этого накапливается большое количество документов и вариантов статей, растет количество авторов, публикаций, что, очевидно, в будущем может крайне усложнить и сделать неудобным работу с неструктурированными информационными массивами, организованными лишь средствами ОС Windows (диспетчер файлов «проводник»).

В предлагаемой статье рассматриваются меры способные наладить эффективную работу редакции журнала и упростить её, сделав более комфортной за счет автоматизации. С этой целью первоначально необходимо систематизировать информацию и описать все редакционно-издательские процессы. Выпуск номеров журнала и существующий документооборот рассмотрены с позиции повышения эффективности издания журнала, редакционно-издательские процессы проанализированы на предмет максимальной их автоматизации.

1 Онтология издания журнала

Онтология издания журнала включает в себя описание предметной области работы редакции и описание задач, решаемых в данной предметной области. Для наглядного представления онтологий обычно используют семантические сети, которые удобно строить в редакторе Protege 4.3 [1].

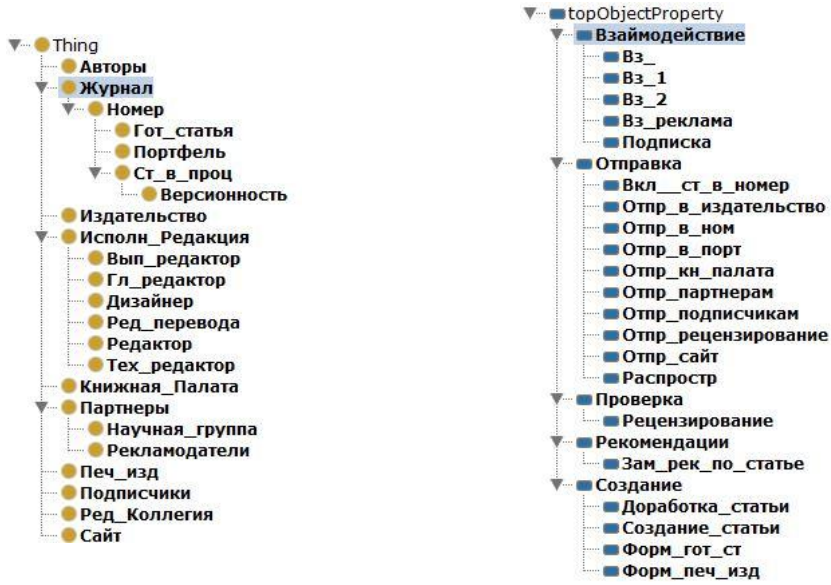
Онтология издания журнала формируется из таких сущностей как:

- *Автор(ы)* – лицо(а), чьим трудом создана статья;
- *Статья* – совместный продукт автора(ов) и редакции журнала, опубликованная в одном из номеров журнала. Статья в процессе подготовки к печати (выпуску) номера журнала видоизменяется и имеет различные хранимые в редакции версии;
- *Исполнительная редакция* – коллектив, включающий редакторов, редактора перевода, технического редактора, дизайнера, выпускающего редактора и главного редактора журнала;
- *Редакционная коллегия* – коллектив ученых, специализирующихся в научной сфере, соответствующей профилю научного журнала, и известных своими трудами в этой области;
- *Книжная палата* - национальное библиографирующее агентство, осуществлявшее библиографический и статистический учёт выпускаемых на территории Российской Федерации изданий, архивное хранение изданий, проведение международной стандартной нумерации произведений печати и научные исследования в области книжного дела;
- *Партнеры* - научные группы, коллективы или ученые-исследователи, работающие в различных академических и научно-исследовательских институтах, университетах, которым высылается в целях ознакомления бесплатные экземпляры. Сюда также относят рекламодателей и спонсоров, поддерживающих журнал финансово;
- *Подписчики* – лица, которые осуществили оплату за подписку номеров журнала и которым высылается печатное издание;
- *Издательство* – предприятие, которое занято подготовкой печатной и электронной версий номеров журнала и их реализацией заинтересованным лицам (авторам, партнерам, подписчикам, членам редакционной коллегии);
- *Сайт журнала* - совокупность электронных документов (файлов) редакции журнала в компьютерной сети, объединённых под одним адресом. На сайте размещаются номера журнала в сокращенном или полном виде, в зависимости от времени прошедшего с момента выпуска;
- *Печатное издание журнала* – представленное в материальном виде издание, размноженное при помощи средств печати;
- *Журнал* – периодическое рецензируемое издание, состоящее из номеров, которые в свою очередь сформированы из статей.

Сущности объединены различными связями в процессе издания журнала, например:

- *Создание* - процесс, в котором автор создает первоначальную версию статьи;
- *Отправка* – действие, необходимое для коммуникаций и передачи информаций;
- *Проверка* - оценка на предмет соответствия, выявления ошибок и замечаний;
- *Рекомендации* – замечания и пожелания, подготовленные редакторами;
- *Взаимодействие* - связь между различными сущностями (например, на предмет размещения рекламы или оформления подписки на журнал).

На рисунках 2 и 3 представлено описание сущностей, связей и семантической сети исследуемой предметной области в редакторе Protege 4.3.



(а) (б)

Рисунок 2 – Сущности (а) и атрибуты (б) научного журнала «Онтология проектирования»

2 Онтологический анализ предметной области согласно методике IDEF5

Анализ диаграммы состояния исследованных сущностей проводился согласно методике IDEF5. Как известно, целью IDEF5 является наглядное представление изменения состояния объекта [2]. В рассматриваемой задаче это готовящийся к выпуску номер журнала, состоящий из статей, которые рассматриваются как изменяющийся объект.

Накопление и обмен информацией являются неотъемлемыми процессами в эволюционном развитии системы [3] . От процесса написания и принятия статьи до готового печатного или электронного номера журнала, статья проходит многоэтапную эволюцию. Развиваясь словно живой организм, она проходит зарождение, становление, формирование и достигает конечный результат в форме готового продукта - журнала.

После написания автором статьи и её отправки в редакцию, она оценивается на предмет её соответствия тематике научного журнала. Затем статья отправляется рецензентам, выдающим свои замечания и мнения по изложенному автором материалу, рекомендации по доработке стаотьи. Замечания к статье оформляются по специально разработанному шаблону рецензента и высылаются авторам от исполнительной редакции анонимно. После исправлений

замечаний рецензентов и редакторов статью утверждает в печать главный редактор. Окончательную доработку в соответствии с принятыми нормами оформления осуществляет выпускающий редактор. При наличии достаточного количества статей для выпуска и подготовки тематических рубрик (от редакции, конференции и семинары, рекомендуемые издания и др.), журнал в электронной версии отправляется в издательство, где и преобразуется в печатный вид и отсылается подписчикам, партнерам, в библиотеки, книжную палату РИНУ и др. Электронная версия журнала в сокращенном виде размещается на сайте журнала, где по истечении года заменяется на полную версию.

На рисунке 4 представлены диаграммы согласно методологии IDEF5.

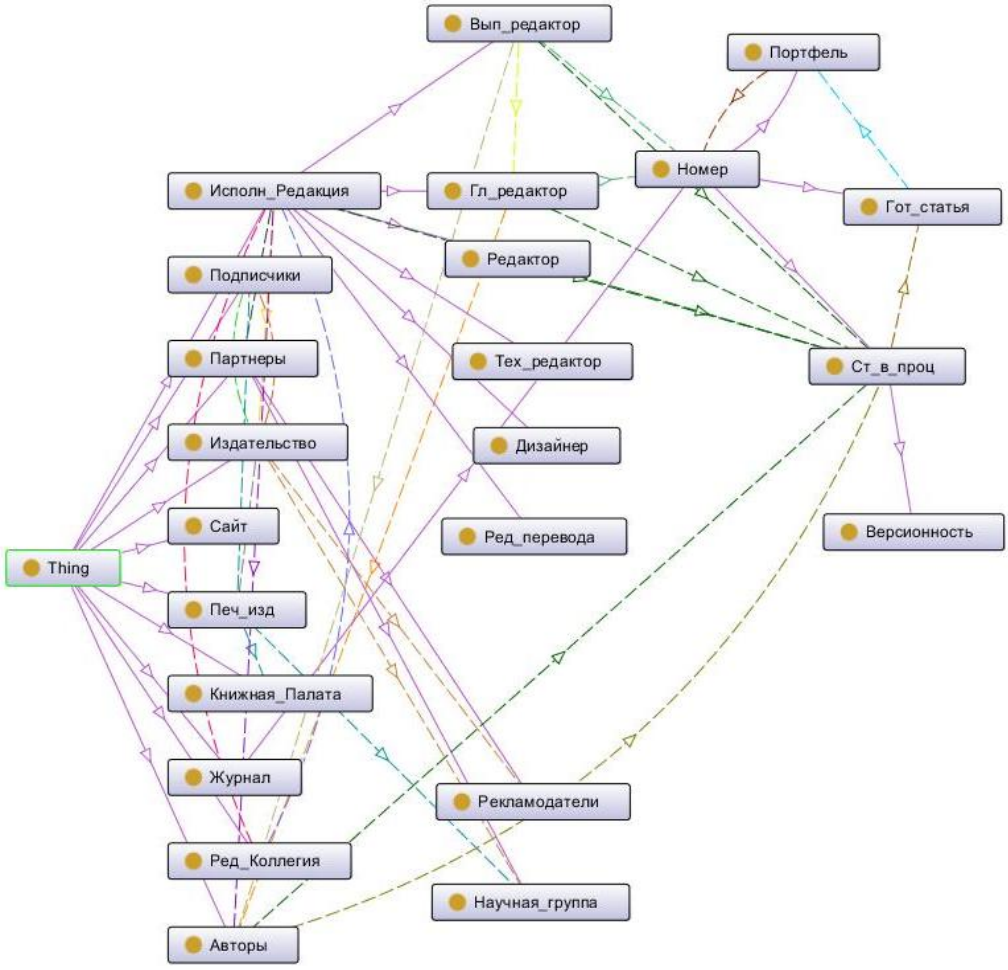


Рисунок 3 - Семантическая сеть предметной области деятельности создателей журнала «Онтология проектирования»

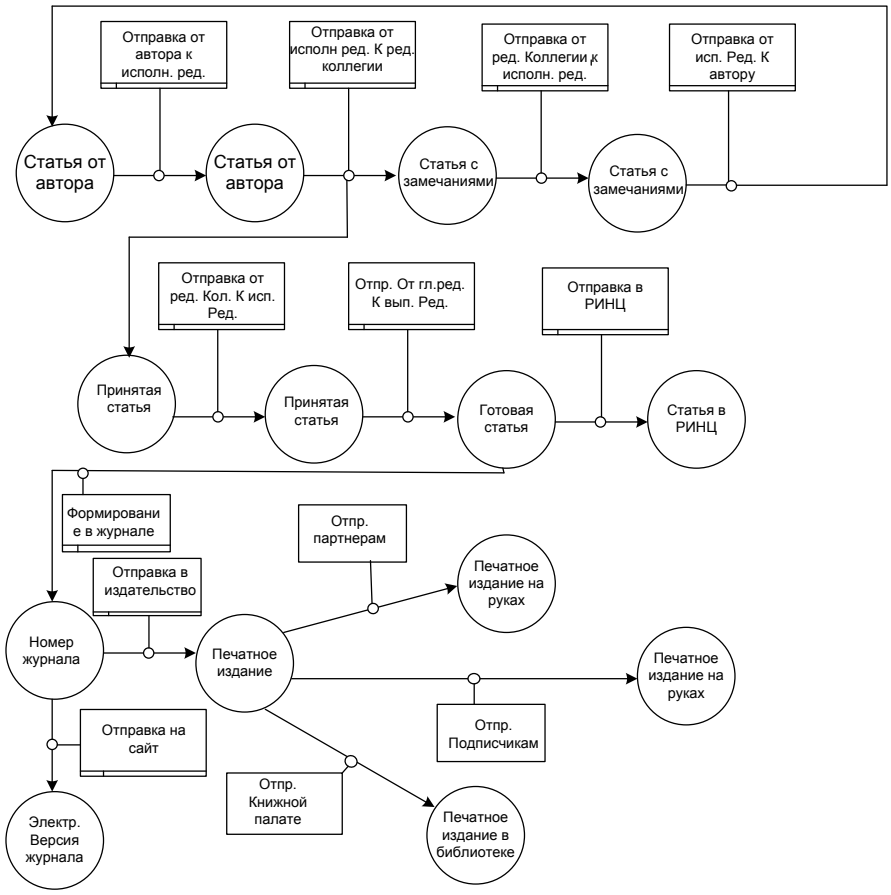


Рисунок 4 - Диаграмма состояния статей и журнала «Онтология проектирования» по методологии IDEF5

Анализируя «эволюцию» научной статьи можно заметить, что процесс включения статьи в номер характеризуется возможностью многократной модификации и изменения исходного материала. Изучая представленную онтологию предметной области, можно увидеть, что на каждом из этапов состояния объектов приходится часто сохранять новые варианты статьи и содержание номера журнала, т.е. эти объекты несколько раз архивируются. Все операции в настоящее время производятся вручную. Используемая каталогизация не удобна для поиска нужных файлов и, тем более, находящейся в ней информации. Количество файлов при этом постоянно возрастает. Указанные обстоятельства требуют не только много времени на поиск и каталогизацию, но и приводят к возникновению ошибок. Также стоит признать, что взаимодействие между участниками выпуска налажено, но требует улучшения: необходимо внедрить систему электронного документооборота.

3 Построение функциональной модели в IDEF0

Для наглядного представления структуры, функционала, а также информации, поступающей и преобразующейся в издательстве, построены функциональные модели издательских процедур, связанных с подготовкой и выпуском номера журнала [3]. Целью моделирования

являлось построение функциональной схемы исследуемой системы, описывающей все необходимые процессы с точностью, достаточной для однозначного моделирования деятельности системы [4].

Функциональные модели издательских процедур представлены На рисунках 5-8.

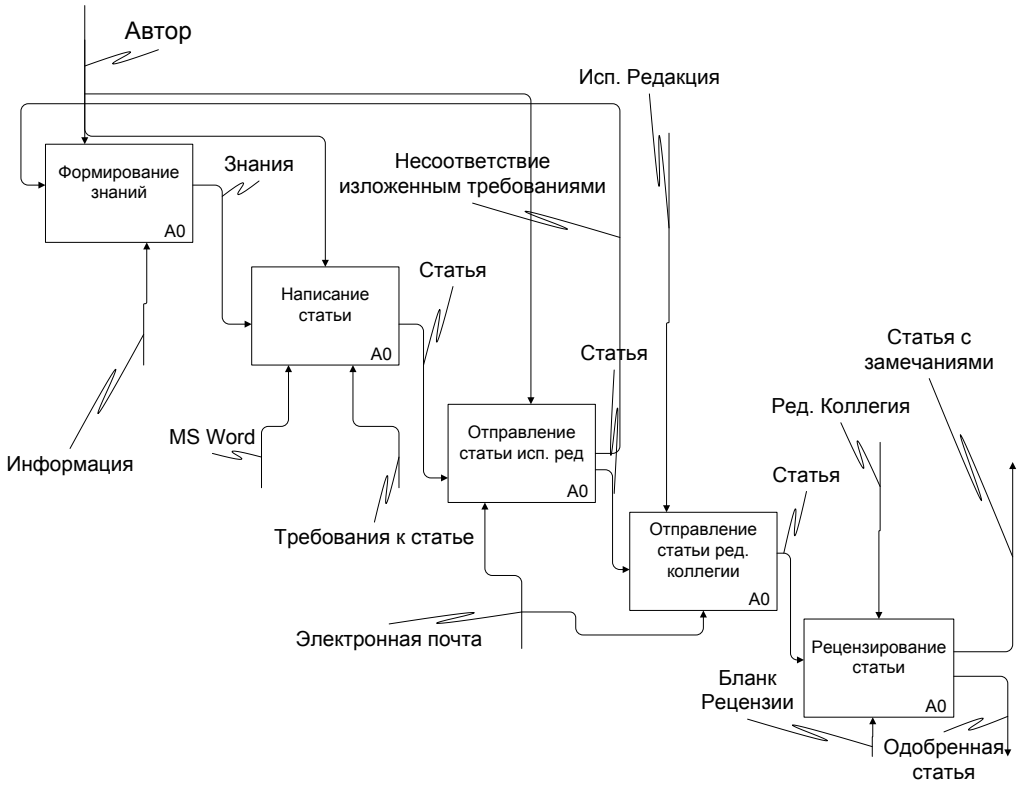


Рисунок 5 - Функциональная модель написания и рецензирования статьи в IDEF0

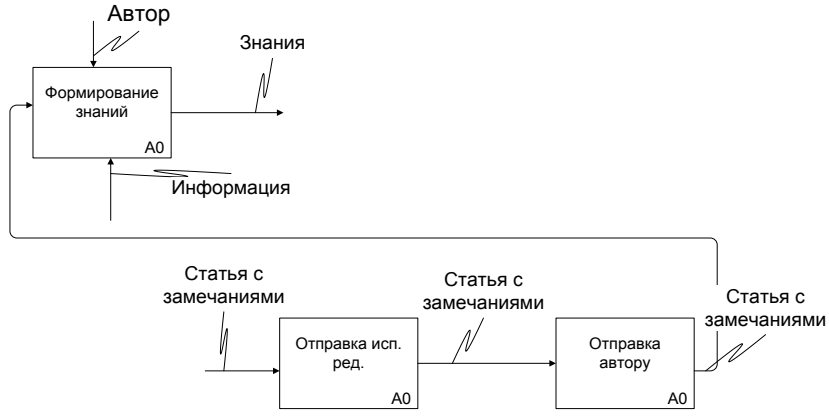


Рисунок 6 - Фрагмент функциональной модели исправления замечаний к статье в IDEF0

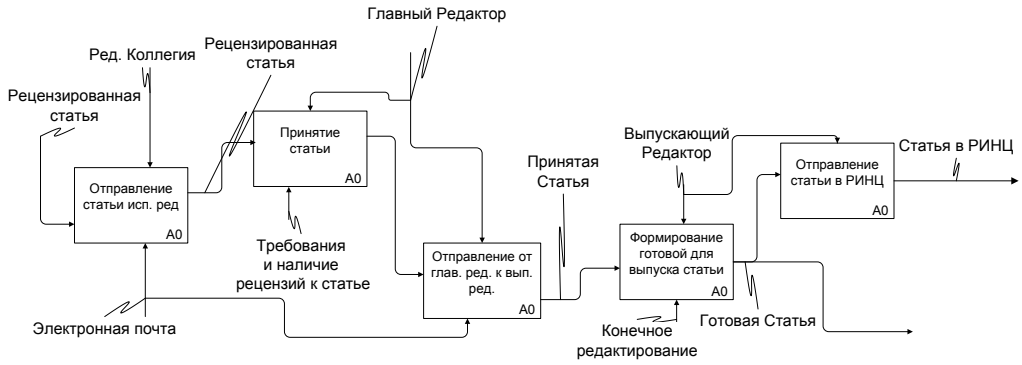


Рисунок 7 - Функциональная модель формирования готовой статьи в IDEF0

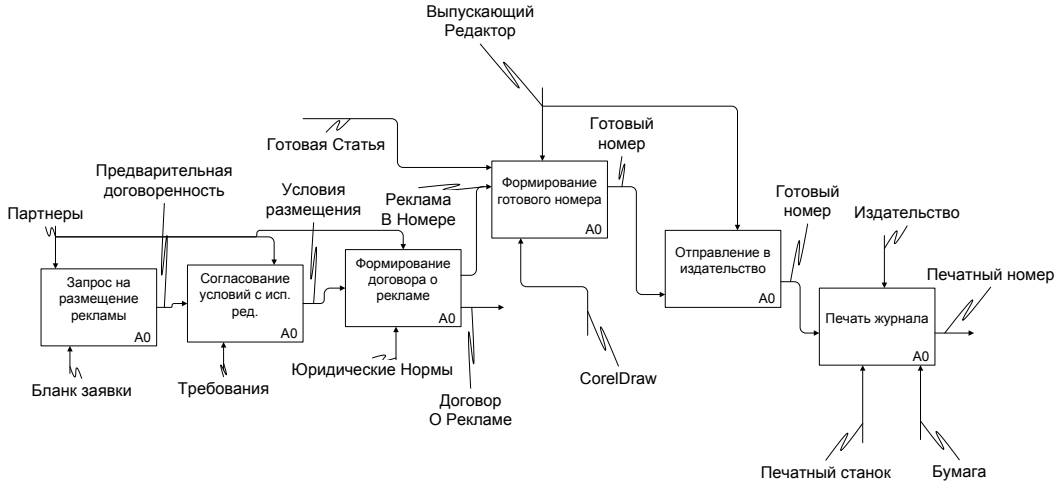


Рисунок 8 - Функциональная модель партнерского договора и печати журнала в IDEF0

4 Критерии и особенности деятельности, связанной с изданием научного журнала

В любой деятельности присутствует своя специфика, особенности, требования и критерии. К рассматриваемому процессу издания научного журнала можно выделить следующие требования:

- выход номера в срок (1 раз в квартал), минимум 4 номера в календарный год;
- количество статей в номере не менее 5-7, но не более 10;
- широкая география авторов статей в номере (разные страны, города, организации).

Особенностью является проектный подход к изданию номера, в центре которого находится изменение данных при издательстве журнала, их различной и отслеживаемой версионности. В связи с этим необходимо обсуждение путей автоматизации работы разных участников редакционно-издаиельского процесса. Следует произвести оценку вариантов хранения различной информации, систем информационного поиска единиц хранения по именам авторов, по номеру выпуска, по названию статьи, по ключевым словам и т.п.

Заключение

На основе онтологического анализа, разработки и исследования информационных и функциональных моделей выявлены основные связи между сущностями, вовлеченными в процесс выпуска номера журнала, и эволюционное развитие различных объектов этой предметной области. Построенные диаграммы и результаты их анализа ориентируют в решении задачи информатизации офиса научного журнала на основе внедрения системы документооборота, которая позволит поддержать эффективные накопление, управление и доступ к информации и знаниям, обеспечить оптимизацию бизнес-процессов и их автоматизацию с механизмами необходимого контроля [5]. Такой системой может стать как уже готовое решение, которое следует адаптировать в соответствии со спецификой работы журнала, так и реализация собственного решения под необходимые задачи, налаживание системы учета и обработки документооборота.

Список литературы

[1] Муромцев Д.И. Онтологический инжиниринг знаний в системе Protégé [Текст]. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2007. – 6-7 с.

[2] Верников Г. Описание стандарта IDEF5 [Электронный ресурс]. - http://vernikov.ru/krisis/item/31--idef5.html (актуально на 05.05.2014).

[3] Кадомцев Б.Б. "Динамика и информация" Успехи физических наук 164 (5) 449-529, 1994 [Текст].- http://ufn.ru/ru/articles/1994/5/a/ (актуально на 05.05.2014).

[4] Госстандарт России. Методология функционального моделирования IDEF0 [Текст]. - Москва: ИПК Издательство стандартов, 2000. - 5 с.

[5] Часовских Е.В., Доронина И.Н. Функциональное моделирование (нотация IDEF0) как метод исследования библиотечно-информационных систем // Успехи современного естествознания IDEF0 [Текст]. – Белгородский государственный институт искусств и культуры, 2013. – № 10 . – стр. 43-46

[6] Пахчанян А., Романов Д. Системы электронного документооборота [Электронный ресурс]. - http://www.dvfu.ru/meteo/intra/ElectronDocument.htm#8 (актуально на 05.05.2014).

МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ КРИТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ

А.С. Боровский

Оренбургский государственный аграрный университет
(Институт управления рисками и комплексной безопасности)
460014, Оренбург, ул. Челюскинцев, 18, Россия
тел: +7 (3532) 77-52-30

Ключевые слова *системы физической защиты, интеллектуальные системы поддержки принятия решения, нечеткая логика, теория графов*

Abstract
The article summarized the dissertation research which is based on a new theoretical approach to decision support in the design of physical protection systems of critical facilities based on the integration processes to support decision-making project, modeling reasoning designer and optimization under uncertainty.

Введение

В последнее десятилетие намечается интенсивное развитие систем физической защиты (СФЗ) (инженерно-технических средств охраны (ИТСО)) потенциально-опасных объектов (ПОО) или критически важных объектов (КВО), что особенно актуально в связи с нарастающими угрозами международного терроризма. Важность и актуальность данной проблемы подтверждается пристальным вниманием к ней со стороны Российского правительства, что отражено в Указе Президента Российской Федерации от 07.07.2011 № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации», в котором обозначено одно из приоритетных направлений развития науки, это – безопасность и противодействие терроризму, а технология обеспечения защиты и жизнедеятельности населения и опасных объектов при угрозах террористических проявлений, включена в перечень критических технологий.

Проблема исследования вопросов обеспечения безопасности объектов усложняется неопределенностью функционирования СФЗ. При проектировании с «нуля» (СФЗ на объекте отсутствует) проектировщик в основном оперирует экспертными знаниями. Очевидно, в этом случае эксперт может лишь предвидеть, прогнозировать те или иные показатели. Подобные прогнозы представляют собой некоторые лингвистические формы, которыми можно оперировать, используя аппарат нечетких величин. Следовательно, в системы поддержки проектирования необходимо вводить интеллектуальные составляющие, позволяющие моделировать рассуждения экспертов.

Результатом этих исследований должны быть методы, алгоритмы, модели описания задач экспертной поддержки проектирования СФЗ в целом и отдельно составляющих ее элементов. Основное назначение, которых состоит в создании предпосылок для объективной аналитической оценки уровня защищенности объекта. Необходимость в таких оценках возникает при анализе защищенности объекта от угроз с целью выработки стратегических решений при организации его защиты.

Поэтому была выдвинута рабочая гипотеза: в виду того, что процессы принятия решений при управлении процессом проектирования и оценки СФЗ в большинстве своем основаны на нечетких экспертных оценках, выявление экспертных знаний предметной области, их струк-

туризация и формализация позволят создать интеллектуальную информационную систему поддержки принятия решений (ИИСППР) с применением инженерии знаний, использование которой позволит повысить эффективность поддержки проектирования и оценки СФЗ.

Целью исследований является разработка методологии поддержки принятия решений при проектировании СФЗ объектов на основе интеграции процессов поддержки принятия проектных решений, моделирования рассуждений проектировщика и оптимизации в условиях неопределенности, разработка моделей и методов оценки уровня защищенности объектов, разработка методических рекомендаций при поддержки принятия решений на основе системного анализа и экспертных знаний о процессах проектирования и анализа СФЗ.

Для достижения данной цели необходимо решить ряд следующих *задач*:

1) Выполнить системный анализ процесса проектирования СФЗ, выделить круг функциональных задач, решаемых проектировщиками, разработка методов, алгоритмов и моделей которых составит основу методологии поддержки принятия решения управлении проектированием СФЗ и позволит разработать ИИСППР СФЗ.
2) Предложить перечень общих математических моделей СФЗ, и выбрать наиболее существенные из них.
3) Разработать методику обоснования требований (показателя качества) к СФЗ с использованием метода нечеткого многокритериального анализа вариантов.
4) Выбрать и обосновать параметры структурной защищенности объекта, в качестве представления которых используется нечеткая величина.
5) Предложить средства представления структуры объекта, позволяющие описывать структуру объекта с разной степенью требуемой точности (например, на основе теории графов), на производственно-технологическом и структурно-логическом уровнях, с использованием модифицированных DFD - диаграмм.
6) 6.Разработать средства представления модели функционирования СФЗ как процесс взаимодействия дестабилизирующих факторов (множество источников угроз), воздействующих на объект (множество зон объекта защиты) и средств защиты объекта (множество ИТСО), препятствующих действию этих факторов с разной степенью требуемой точности, например, на основе теории нечетких множеств, нечетких гиперграфов.
7) Разработать систему методик поддержки принятия решений при проектировании СФЗ в условиях неопределенности: метод оценки степени оснащенности объекта ИТСО; метод определения требуемого уровня защищенности; метод определения требуемого уровня возможностей для средств защиты объекта; метод оценки степени структурной защищенности (уязвимости) объекта; метод оценки защищенности объекта с использованием нечеткого логического вывода.
8) Предложить средства представления структуры СФЗ в виде структурно-логической модели для абстрагирования от физической природы источника событий. Ввести определение точки контроля (ТК) как части структурно-логической модели СФЗ объекта, влияющая на защищенность одного критического элемента (КЭ). Определить минимально необходимый набор ТК для защиты объекта: точка обнаружения (ТО); точка доступа (ТД); точка видеонаблюдения (ТВ); точка задержки (ТЗ).
9) 9. Разработать и реализовать средства оптимизации СФЗ (как совокупность двух задач: оптимального размещения ТК на структурно – логической модели объекта и определения оптимального уровня защищенности всех ТК) на основе генетических алгоритмов (ГА), их адаптации к данной проблемной области и предложить средства дальнейшей модернизации СФЗ (например, на основе нечетких ситуационных сетей (НСС)) в случае структурных изменениях объекта, или ухудшении обстановки в регионе, т.е. смене модели нарушителя, или при изменении критерия, определяющего необходимый уровень защищенности объектов данной категории.

10) Разработать и реализовать средства определения инженерно – технической защищенности (ИТЗ) объекта как программную систему интеллектуальной поддержки принятия решений при проектировании СФЗ объекта и исследовать их результативность на примере СФЗ конкретного объекта.

Основная часть

В результате системного анализа предметной области исследования выявлено, что в технологической цепи управления наиболее весомым звеном становится технология принятия решений, включающая в себя мониторинг объекта, с целью уточнения задач СФЗ; проектирование СФЗ; оценка СФЗ и выработку решений о достаточности мер по защите объекта [1].

Выявлено, что сложность управления проектированием СФЗ для ПОО (или КВО) обусловливается их характерными, особенными чертами [1].

Сформулированы и описаны виды неопределенностей, присущих процессу управления проектированием и оценкой СФЗ [1].

Определен тип проблемной среды управления проектированием СФЗ как проблемной среды экспертной системы, которая характеризуется: проблемной средой третьего типа (статическая предметная область).

Представлено формализованное описание процессов поддержки проектирования СФЗ, а также учитываемые при этом факторы и ограничения. Предложен перечень общих математических моделей СФЗ, сделан вывод, о необходимости математического моделирования СФЗ, которая обусловлена важностью оценки уязвимости и защищенности объекта, с целью выработки наилучшей по заданным критериям стратегии его защиты и оценки эффективности выбранной стратегии. Показано, что в настоящее время не существует какой-либо единой системной классификации математических моделей СФЗ, поэтому предложен их перечень, краткая характеристика и выбраны наиболее существенные из них**.**

Представлена методика обоснования требований (показателя качества) к СФЗ КВО**.** Задача синтеза СФЗ была сформулирована следующим образом: необходимо выбрать такой вариант реализации СФЗ, который соответствовал бы значимости объекта, выраженной через его категорию и обеспечивал бы для данного объекта соответствующий (максимальный) уровень защищенности, выраженной через вероятность его защиты, при допустимых затратах на СФЗ [2]. При этом СФЗ включает в себя, как правило, несколько подсистем: подсистему обнаружения, подсистему задержки и подсистему нейтрализации [3].

Формальная постановка задачи имеет вид:

$A^0=\arg\max P_з(A)$

найти $A^0 \in A^+$

при ограничениях $C_с(A^0) \le C_{доп}$.

Здесь A – некоторый вектор, который характеризует вариант реализации СФЗ, причем под реализацией понимается техническое оснащение и комплекс организационных мероприятий по охране объекта; A^+, A^0 – допустимое и оптимальное значение вектора A; $C_{доп}$ – допустимые материальные затраты на СФЗ.

Из вектора A был выделен наиболее значимый фактор – инженерно-техническая защищенность (ИТЗ) объекта (обеспеченность объекта техническими средствами охраны и инженерными средствами задержки продвижения нарушителей) $P_{итз}=P_{обн} \cdot P_{зад}$, именно он определяет качество выполнение следующей составляющей – вероятности нейтрализации нарушителей – которая есть не что иное как защищенность объекта подразделениями охраны. Где, $P_{обн}$ – вероятность своевременного обнаружения нарушителей; $P_{зад}$ – вероятность задержки нарушителей. Для оценки показателей входящих в определение ИТЗ было принято решение использование экспертных методов в сочетании с нетрадиционными методами (например, методами искусственного интеллекта) [4,5,6].

Для концептуального проектирования была предложена математическая модель объекта, которая описывает его структуру. Для абстрагирования от физической природы источников событий было предложено модель объекта разделить на две части: функциональная модель производственно - технологического процесса объекта, позволяющая учитывать взаимное влияние отдельных зон объекта друг на друга и структурно-логическая модель объекта, описывающая пространственное расположение зон объекта и их связи между собой.

Для формального представления структуры объекта была выбрана математическая теория графов, что позволит учесть топологию объекта.

Для определение степени привлекательности или непривлекательности КЭ (зон объекта) были определены следующие критерии, например: доступность зоны для совершения по отношению к нему ТА, определяется условиями функционирования объекта, управлением доступа персонала и других лиц, месторасположением и другими особенностями объекта, и т.д.

Все используемые критерии имеют нечеткую природу [7]. Для построения функциональной модели производственно-технологического процесса и структурно-логической модели объекта был выбран стандарт *DFD*, модифицированный под выбранную предметную область.

Представлены математические модели СФЗ на основе нескольких теорий: теории множеств; теории нечетких множеств; теории нечетких гиперграфов [8]**.** Модель на основе данных теорий включает семь конкретных множеств.

Решающее правило представляет собой композицию соответствий с тремя множествами: соответствие множества ИТСО Z множеству угроз X; соответствие множества угроз X множеству защищаемых зон объекта Y; композиция данных соответствий и есть распределение элементов множества Z на элементы множества Y, т.е. какое инженерно-техническое средство необходимо установить в конкретную защищаемую зону объекта.

В работе представлен разработанный способ описания модели процесса функционирования СФЗ в виде гиперграфов и их композиции позволяет автоматизировать большую часть процесса принятия решения.

Таким образом, комплекс разработанных моделей составил теоретическую основу разрабатываемой системы информационной поддержки принятия решения при проектировании СФЗ.

Разработана система методик поддержки принятия решений при проектировании СФЗ в условиях неопределенности. В общем случае поддержка принятия решений основывается на разработанных методах: метод оценки степени оснащенности объекта ИТСО; метод определения требуемого уровня защищенности; метод определения требуемого уровня возможностей для средств защиты объекта; метод оценки степени структурной защищенности (уязвимости) объекта; метод оценки защищенности объекта с использованием нечеткого логического вывода**.**

В главе была разработана методика оценки степени оснащенности объекта, средствами ИТСО, основу которого составляет метод нечеткого многокритериального анализа. Для абстрагирования от физической природы источника событий было предложено ИТСО заменить логическими понятиями – точками контроля (ТК).

В соответствии с выполняемыми функциями был определен минимально необходимый набор ТК для защиты объекта: точка обнаружения (ТО); точка доступа (ТД); точка видеонаблюдения (ТВ); точка задержки (ТЗ).

Так как каждое из установленных средств защиты вносит различный вклад в ИТЗ объекта $P_{\text{итз,}}$ которая в свою очередь и определяет своевременность прибытия сил охраны к КЭ объекта, были определены соответственно критерии значимости для разных типов ТК.

Для определения значимости использовался метод нечеткого многокритериального анализа вариантов, в котором сами критерии рассматриваются как нечеткие множества, заданные на универсальном множестве альтернатив с помощью функций принадлежности. Функции

принадлежности нечетких множеств определяются методом Саати по экспертным парным сравнениям альтернатив.

Из полученных значений критериев каждого типа ТК определялась значимость. Опираясь на принцип Беллмана-Заде нечеткое решение будет представлять собой пересечение частных критериев.

Разработанный метод определения требуемого уровня защищенности объекта, основывается на критериальном определении привлекательности КЭ и выбранной модели нарушителя. Влияние зон производственно-технологического процесса друг на друга оценивалось по функциональной модели объекта, построенной с помощью стандарта DFD, модифицированного под данную предметную область.

Требуемый уровень возможностей для средств защиты определяется с помощью общей математической модели «угроза – объект – СФЗ» на основе теории нечетких гиперграфов.

Для оценки структурной защищенности объекта была разработана математическая модель на основе модифицированного алгоритм Дейкстры, с использованием нечетких чисел.

В алгоритме Дейкстры было заменено понятие «длина *i*-го ребра» на «вероятность $P_{\text{обн } i}$», а процедуру определения «длины пути» с помощью суммы длин ребер заменено на процедуру поиска «вероятности $P_{\text{обн}}$ пути».

Представлена математическая модель оценки защищенности объекта с использованием нечеткого логического вывода.

Было предложено использовать дедуктивную схему вывода, основанную на нечетком правиле *modus ponens*.

Таким образом, разработанная система методик поддержки принятия решений при проектировании СФЗ объектов, составляют структуру интеллектуальной СППР.

Изложено обобщение нового комплексного теоретического подхода к поддержки принятия решений в задачах управления проектированием СФЗ объектов на основе интеграции методик поддержки принятия проектных решений, оптимизации и модернизации СФЗ на основе нечеткой ситуационной сети**.**

Важнейшим проектным решением при проектировании СФЗ является задача оптимального размещения ТК на структурно-логической модели объекта защиты.

Сформулируем задачу размещения ТК на математической модели объекта следующим образом: необходимо выбрать такой вариант размещения ТК на структурно – логической модели объекта (граф объекта), который обеспечивал бы для данного объекта соответствующий (максимальный) уровень защищенности, выраженной через вероятность его защиты, при допустимых затратах на СФЗ.

Решить задачу эффективного размещения ТК на структурно – логической модели объекта возможно с помощью адаптированного стандартного ГА, причем данная задача может быть разбита на две подзадачи:

- задача оптимального расположения ТК на структурно-логической модели объекта;

- задача определения оптимального уровня защищенности всех ТК через анализ структурной защищенности объекта.

В данной задаче проверяем две целевые функции.

Первая функция - F_1 использует следующий критерий: набор ТК на каждом из всех возможных путей к КЭ должен соответствовать требуемому набору ТК для данного КЭ или превышать его. Если ТК меньше чем требуется, то значение функции будет равно суммарной нехватке ТК на всех путях. Если точек достаточно, значение функции равно нулю.

Вторая целевая функция - F_2 использует критерий: общее количество ТК на объекте стремится к минимуму.

Для определения необходимых действий, которые могут потребоваться при структурных изменениях объекта, или ухудшении обстановки в регионе, т.е. смене модели нарушителя, или при изменении критерия, определяющего необходимый уровень защищенности объектов дан-

ной категории, была разработана модель модернизации СФЗ на основе «ситуация – стратегия управления – действие» (С-СУ-Д), осуществляющую поиск стратегии управления по нечетким ситуационным сетям (НСС).

В модели С-СУ-Д для поиска стратегии управления требуется готовая НСС.

Таким образом, рассмотрена методология, метод и алгоритмы формирования обобщенной модели СФЗ на основе генетической оптимизации размещения ТК по структурной модели объекта и методика модернизации структуры СФЗ на основе НСС.

Для практической реализации алгоритма поддержки принятия решений создан программный комплекс, являющийся прототипом системы анализа ИТЗ КВО. Комплекс состоит из пяти программ (программных модулей), выполняющих шаги алгоритма.

Программный модуль «DefencePath» предназначен для определения меры структурной защищенности объекта.

Программный модуль «SFZproject» предназначен для расчета требуемого уровня защищенности ПОУ объекта при проектировании СФЗ.

Программный модуль «ITDefence» предназначен для определения показателя качества защищенности объекта – инженерно-технической составляющей.

Программный модуль «Hypergraphmodel» предназначен для определения требуемого уровня возможностей инженерно-технических средств защиты объекта.

Программный модуль «ItsoEquip» предназначен для расчета степени оснащенности объекта ИТСО. Представлены результаты вычислительных экспериментов в разработанной программной среде автоматизированного проектирования и результаты эксплуатации СФЗ, разработанных в САПР СФЗ, построенной на основе предполагаемого теоретического подхода, а именно: анализ результатов оценки адекватности моделей ИТЗ объекта; анализ результатов размещения ТК по графовой структуре объекта; эффективность применения разработанной САПР для объектов нефте – газовой промышленности.

Заключение

В ходе исследования получены следующие основные результаты:

- Главным итогом диссертационной работы является создание нового теоретического подхода к поддержки принятия решений при проектировании СФЗ КВО на основе научного направления мягких вычислений; разработка комплекса моделей и алгоритмов для элементов СФЗ, позволяющих построить структурную модель СФЗ и оптимально разместить ТК на структурно – логической модели объекта.
- Выполнен научный анализ современных работ по проектированию и оценке СФЗ КВО, обоснована целесообразность нового теоретического подхода к поддержки проектирования СФЗ на основе мягких вычислений в связи с неопределенностью данной предметной области. Обоснована необходимость использования нечетких данных на этапе концептуального проектирования СФЗ.
- Разработана методология поддержки принятия решений при проектировании СФЗ объектов, сочетающая в себе проектные процедуры с моделированием рассуждений проектировщика.
- Разработана методика обоснования требований (показателя качества) к СФЗ с использованием метода нечеткого многокритериального анализа вариантов.
- Разработана модель структуры объекта на производственно - технологическом и структурно – логическом уровнях с использованием модифицированных DFD – диаграмм.
- Разработана модель структуры СФЗ в виде совокупности минимально необходимого набора ТК.
- Разработаны модели функционирования СФЗ как процесс взаимодействия дестабилизирующих факторов (множество источников угроз), воздействующих на объект (множество

зон объекта защиты) и средств защиты объекта (множество ИТСО), препятствующих действию этих факторов с разной степенью требуемой точности на основе теории нечетких множеств, нечетких гиперграфов, которые составили теоретическую основу разрабатываемой системы информационной поддержки принятия решения при проектировании СФЗ.

- Разработана система методик поддержки принятия решений при проектировании СФЗ в условиях неопределенности: метод оценки степени оснащенности объекта ИТСО; метод определения требуемого уровня защищенности; метод определения требуемого уровня возможностей для средств защиты объекта; метод оценки степени структурной защищенности (уязвимости) объекта; метод оценки защищенности объекта с использованием нечеткого логического вывода, которая стана основой структуры интеллектуальной СППР.
- Разработана ИИСППР для оценки ИТЗ объекта.
- Проведены вычислительные эксперименты по исследованию эффективности разработанной ИИСППР.

Список литературы

[1] Боровский А.С. Автоматизированное проектирование и оценка систем физической защиты потенциально-опасных (структурно-сложных) объектов. Часть 1-Системный анализ проблемы проектирования и оценки систем физической защиты: монография / А.С. Боровский, А.Д. Тарасов. – Самара; Оренбург: СамГУПС, 2012. – 155 с.

[2] Боровский А.С. Автоматизированное проектирование и оценка систем физической защиты потенциально-опасных (структурно-сложных) объектов. В 3-х ч. Ч.2. Модели нечетких систем принятия решений в задачах проектирования систем физической защиты: монография / А.С. Боровский, А.Д. Тарасов. – М.: Издательство «Омега-Л»; Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2013. – 248 с.

[3] Бояринцев А.В., Бражник А.Н., Зуев А.Г. Проблемы антитерроризма: Категорирование и анализ уязвимости объектов. – СПб.: ЗАО «ИСТА – Системс», 2006. – 252 с.

[4] Поспелов Г.С., Поспелов Д.А. Искусственный интеллект и прикладные системы. М.: Знание, 1985. – 43.

[5] Захаров В.Н. Интеллектуальные системы управления: основные понятия и определения. // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1997. № 3. С. 138…145.

[6] Мелихов В.В.. Ситуационные советующие системы с нечетной логикой. – М: Наука, 1988. 245 с.

[7] Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети – Винница: УНИВЕРСУМ – Винница, 1999 – 320 с.

[8] Боровский А.С., Тарасов А.Д. Общая математическая модель системы физической защиты объектов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2011. №10(88). С. 21-29.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ОНТОЛОГИЙ ИЗ РЕЛЯЦИОННЫХ БАЗ ДАННЫХ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НЕЧЕТКИХ ЗАПРОСОВ

И.Д. Виноградов

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
vid@svptus.ru
тел: +7 (8462) 332-39-27, факс: +7 (8462) 333-27-70

Ключевые слова: *базы данных, формальные онтологии, анализ формальных понятий, нечеткое концептуальное шкалирование, нечеткий формальный контекст*

Abstract
The article deals with extraction ontology from relational databases to represent fuzzy queries. For this purpose using formal concept analysis (FCA) and the theory of fuzzy sets.

Введение

Реляционные базы данных (РБД), как правило, рассматриваются как системы обработки и хранения четко заданной фактической информации. Однако на практике существует потребность в формировании нечетких запросов к хранимым данным. Это происходит в процессе задания пользователем качественных субъективных критериев отбора данных, заданных выражениями вида «Удовлетворительно», «Хорошо», «Плохо» и т.д. Примером нечеткого запроса является отбор в экологической базе данных загрязняющих веществ имеющих низкий, средний или высокий уровень значимости их воздействия на окружающую среду.

Для возможности построения нечетких запросов применяются различные технологии. Одним из направлений их развития стало появление нечетких баз данных, использующих язык запросов SQLf [1]. Они строятся на модели данных, фундаментальной основой которой служит теория нечетких множеств Заде [2, 3]. Модель данных позволяет описывать атрибуты реляционных таблиц в форме лингвистических переменных, семантика которых моделируется нечеткими множествами.

Однако большинство современных промышленных баз данных функционируют по четкой реляционной модели данных, поэтому другим направлением развития технологий нечетких запросов является поддержка их конструирования в традиционных базах данных. Здесь наиболее популярной технологией признано одно из направлений интеллектуальной технологии обработки данных – анализ формальных понятий (АФП) [4]. АФП используется как метод извлечения знаний из табличных данных. Такие знания представляются концептуальными решетками, называемыми онтологиями [5]. Онтологии сосуществуют вместе с данными и обеспечивают навигацию по ним, инкапсулируя формирование запросов для пользователя.

Для извлечения онтологий из нечетких данных применяется концептуальное шкалирование [6, 7]. Применение бинарного шкалирования, включающего два возможных значения 0 и 1, выражающих отсутствие или наличие у объекта свойства, не всегда оправдано, поскольку вследствие высокого уровня абстрагирования вносится искажение в объем выборки данных. Поэтому предпочтительнее использование *нечеткого концептуального шкалирования*, моделируемое нескачкообразными функциями принадлежности. В данной статье на простом примере детально рассматривается извлечение онтологий для представления нечетких запросов на основе АФП.

1 Понятие нечеткого концептуального шкалирования

Таблицы РБД в теории анализа формальных понятий рассматриваются в форме многозначных формальных контекстов (many-valued context) [6]. В терминах теории баз данных многозначный контекст является отношением. Многозначный контекст есть кортеж вида:

$K = (G, M, V, I)$,

где G – множество объектов (кортежей), M - множество атрибутов (полей таблиц), V – множество значений атрибутов; $I \subseteq (G \times M \times V)$ - тернарное отношение, задающее значение v признака m.

Многозначные признаки могут рассматриваться как отображения $G \to V$, таким образом, можно обозначать $m(g) = v$ вместо $(g, m, v) \in I$. Процедура сведения многозначных контекстов к однозначным называется *концептуальным шкалированием* (*conceptual scaling*). Для шкалирования каждый признак многозначного контекста представляется формальным контекстом, называемым *шкалой (scale context*). Шкала $S_m = (G_m, M_m, I_m)$ для признака m многозначного контекста K есть однозначный контекст такой, что $m(G) \subseteq G_m$. Объекты в шкале называются значениями шкалы, а признаки — признаками шкалы. Применение шкалы S_m к многозначному контексту преобразует его к виду однозначного производного контекста (*derived context*): $K_j = (G_j, M_j, I_j)$, где $G_j = G, M_j = M_m, I_j = G_j \times M_j$.

Как правило, при построении онтологий использовалось два варианта шкалирования — порядковое и номинальное. Порядковая шкала используется для признаков, значения которых упорядочены относительно некоторого порядка, а обладание объектом некоторым значением признака влечёт обладание всеми меньшими значениями признака. С помощью номинальной шкалы представляют несравнимые между собой значения признаков, например, цвет.

Описанный выше подход концептуального шкалирования имеет ограниченное применение, поскольку требует точного представления данных. Во многих прикладных задачах представить данные в «черно-белом цвете» не всегда удается. Прежде всего, это относится к качественным лингвистическим оценкам данных вида «Удовлетворительно», «Хорошо», «Плохо» и т.д. Применение четкого шкалирования для приведения многозначного контекста к однозначному виду ведет к искажению интересующей пользователя информации вследствие высокого уровня абстракции используемой булевской функции принадлежности:

$$\mu(g, m) = \begin{cases} 0, g \notin G; \\ 1, g \in G. \end{cases}$$

В действительности значения качественной оценки носят размытый (неоднозначный) характер с той или иной степенью достоверности. Например, если для качественной оценки «Молодой» для сотрудников предприятия задать возрастной интервал от 18 до 30 лет, то получается, что сотрудник, отметивший свою 31 годовщину, уже перестает быть молодым специалистом, что собственно говоря, не совсем так. Для более точного измерения качественных характеристик объектов при построении онтологий рекомендуется использовать механизм нечеткого концептуального шкалирования (fuzzy scaling). Он построен на базе расширения методологии анализа формальных понятий, аппаратом теории нечетких множеств и нечеткой логики [3]. Такое расширение принято называть анализом нечетких формальных понятий. В его основе лежит понятие нечеткого формального контекста (НФК). Это контекст вида: $K_f = (G, M, I)$, где G –конечное множество объектов, M – конечное множество атрибутов, $I \subseteq (G \times M)$ - нечеткое отношение, $(g, m) \in I : \mu(g, m) \to [0, 1]$. Таким образом, функция принадлежности наличия атрибута у объекта принимает значения в интервале от 0 до 1.

Для получения нечеткого формального контекста из таблицы РБД применяется процедура фазификации концептуальной шкалы. Для каждого признака концептуальной шкалы S_m задается функция принадлежности вида $m(g) \in G_m : \mu(m) \to [0,1]$. Такие функции принято еще называть лингвистическими переменными. Выбор функции принадлежности зависит от выбранного метода. Как правило, производится экспертным путем или на основе априорной информации о предпочтениях, содержащейся в базе данных. Применяя нечеткое шкалирование к многозначному контексту РБД извлекается производный НФК.

2 Построение онтологии из нечеткого формального контекста

При построении онтологии из НФК выделяются два основных подхода:

1) построение нечетких онтологий [8];
2) построение четких онтологий [9].

В первом случае НФК предварительно «сжимается» по выбранному интервалу функции принадлежности - интервального порога (*threshold*) $T = [t_1, t_2], 0 \le t_1 < t_2 \le 1$ и далее с помощью традиционных алгоритмов «замыкай по одному» строится концептуальная решетка, состоящая из нечетких понятий. Нечеткое понятие включает объем объектов в форме нечеткого множества, принадлежность к которому определяется значением функции принадлежности. Данный подход имеет существенный недостаток, связанный с невозможностью отделения извлеченных знаний от объектов базы данных, поскольку нечеткая онтология содержит информацию о степени принадлежности объекта тому или иному кластеру (понятию). Для практического использования нечетких онтологий знания должны быть отделены от данных, а это требует приведения нечетких онтологий к четкому виду каким-либо из известных способов [9, 10].

Второй подход является более конструктивным, поскольку уже на начальной стадии построения системы понятий нечеткость устраняется. Онтология становится независимой от данных и может быть использована для их отбора. Данный подход имеет недостаток, связанный с частичной потерей информации при задании порога (граничной точки). До значения порога считается, что объект не обладает свойством, а свыше или равно этого значения обладает этим свойством. Другими словами НФП преобразуется в традиционный четкий контекст. Для устранения частичной потери информации при построении онтологии предлагается применить *шкалирование самого НФК как многозначного контекста*, как альтернативный способу заданию порога способ разрешения его нечеткости. Дополнительные шкалы НФК можно задать путем введения *модификаторов* к базовым терминам лингвистических переменных [3]. Лингвистические модификаторы детализируют определение базовых терминов. Например, пусть имеем базовый термин «низкая значимость» лингвистической переменной «уровень значимости», тогда модификаторами могут выступать следующие выражения: «очень низкая значимость», «слегка низкая значимость», «чуть низкая значимость» и т.д.

3 Пример извлечения онтологии

Разберем пример извлечения онтологии из множества нечетких запросов для отбора загрязнений с высокой, средней или низкой значимостью их воздействия на окружающую среду. Для построения онтологий используем программный продукт *Concept Explorer* [11].

Пусть имеем РБД, представленную многозначным контекстом с рассчитанными значениями уровня значимости того или иного вида загрязнения (таблица 1).

Таблица 1 - Рассчитанные значения уровня значимости некоторых видов загрязнений

Вид загрязнения	Сероводород	Аэрозоли	Пыль древесная	Бензин	Формальдегиды
Уровень значимости, %	31	24	17	19	45

В соответствии с методикой АПФ введем концептуальную шкалу для данного многозначного контекста. Для атрибута «уровень значимости» введем лингвистическую переменную с аналогичным названием. Зададим множество базовых терминов шкалы: малая значимость», «средняя значимость» и «высокая значимость». С позиции классического АФП функции принадлежности для описания термов это скачкообразные функции, как это показано на рисунке 1.

Рисунок 1 – Функции принадлежности для построения классической бинарной шкалы качественной оценки уровня значимости

Скачкообразные функции описывают четкие бинарные концептуальные шкалы (таблица 2), применение которых к многозначным контекстам дает производные четкие формальные контексты.

Таблица 2 - Бинарная шкала для качественной оценки значений уровня значимости

Интервал уровня значимости / Оценка значимости, %	Низкая значимость	Средняя значимость	Высокая значимость
0..20	X		
21..30		X	
От 31 и выше			X

В таблице 3 представлен производный четкий формальный контекст, описывающий принадлежность свойства значимости к объектам – видам загрязнений. Соответствующая этому онтология показана на рисунке 2. Как видно из этой онтологии, запрос по видам загрязнений со средней значимостью получит выборку, состоящую только из одного элемента – аэрозоли. Бензин и сероводород, имеющие близкие значения к средней значимости в выборку не попадают, что не совсем корректно. Причина этому высокая степень абстракции бинарной шкалы.

Таблица 3 - Производный четкий формальный контекст

Вид загрязнения / Оценка значимости	Низкая значимость	Средняя значимость	Высокая значимость
Сероводород			X
Аэрозоли		X	
Пыль древесная	X		
Бензин	X		
Формальдегиды			X

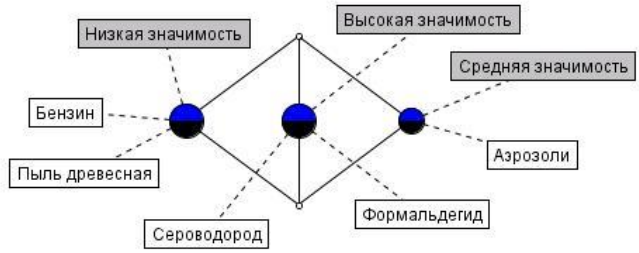


Рисунок 2 – Онтология, полученная в результате бинарного шкалирования

Для более точной обработки нечетких запросов применим нечеткую концептуальную шкалу. В качестве функций принадлежности выберем трапецеидальные функции, представленные на рисунке 3.

Рисунок 3 – Функции принадлежности для нечеткой концептуальной шкалы

Применяя данную нечеткую шкалу к многозначному контексту, получаем НФК, представленный таблицей 4.

Таблица 4 - Нечеткий формальный контекст

Вид загрязнения / Оценка значимости	Низкая значимость	Средняя значимость	Высокая значимость
Сероводород	0	0,85	0,32
Аэрозоли	0	1	0
Пыль древесная	0,50	0,50	0
Бензин	0,21	0,88	0
Формальдегиды	0	0	1

Далее покажем, как будет выглядеть НФК при его приведении к четкому виду путем задания граничной точки. В качестве граничной точки возьмем значение функции принадлежности равное 0,5. Вид такого контекста показан в таблице 5.

Таблица 5 - Преобразование НФК к четкому виду путем задания граничной точки со значением 0,5

Вид загрязнения / Оценка значимости	Низкая значимость	Средняя значимость	Высокая значимость
Сероводород		X	
Аэрозоли		X	
Пыль древесная	X	X	
Бензин		X	
Формальдегиды			X

Онтология, построенная из приведенного к четкому виду контекста, более точно по сравнению с бинарной шкалой отражает семантику фактических данных (рисунок 4).

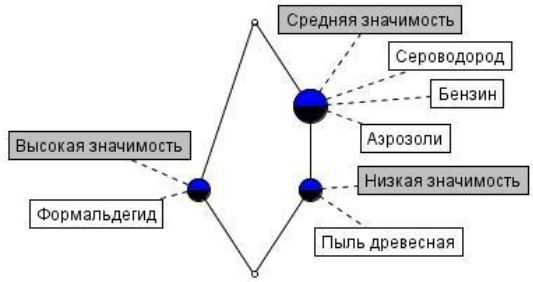


Рисунок 4 – Решетка понятий, полученная в результате нечеткого шкалирования с граничной точкой 0,5

Из рисунка 4 видно, что сероводород и бензин попадают в выборку по средней значимости. Однако данные объекты не попадут в выборки по низкой и высокой значимости вследствие частичной потери информации из-за ввода граничной точки. Чтобы избежать этого введем модификаторы для базовых терминов лингвистической переменной терминам «Low», «Medium» и «High». Модификатор «Low» определяет множество минимальных значений базового термина. «Medium» - область средних значений и «High» область наибольших значений соответственно. Для задания модификаторов используем четкую интервальную шкалу, представленную в таблице 6.

Таблица 6 - Интервальная шкала для модификаторов базовых терминов

Имя модификатора / Значение модификатора	Low	Medium	High
0,01..0,010	X		
0,011..0,050		X	
0,051..1,000			X

Применим шкалу для модификаторов к НФК таблицы 4. В результате получим «расширенный» четкий формальный контекст, описывающий «силу» значимости базовых терминов (см. таблицу 7) для объектов. Из него получаем онтологию для представления нечетких запросов, которая по своим характеристикам семантически богаче и точнее, чем предыдущие полученные в примере онтологии (см. выше). Данная онтология показана на рисунке 5.

Таблица 7 - Формальный контекст после шкалирования НФК как многозначного контекста

Вид загрязнения / Оценка значимости	Низкая значимость			Средняя значимость			Высокая значимость		
	Low	Medium	High	Low	Medium	High	Low	Medium	High
Сероводород						X		X	
Аэрозоли						X			
Пыль древесная		X			X				
Бензин		X				X			
Формальдегиды									X

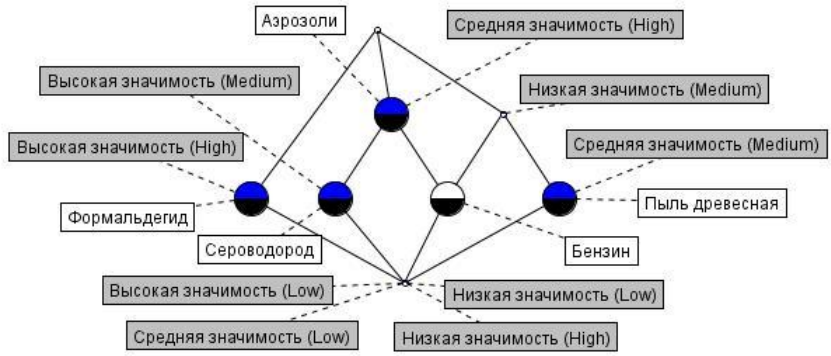


Рисунок 5 – Онтология, полученная в результате задания модификаторов базовых терминов

Заключение

Извлечение онтологий из реляционных баз данных для формального представления нечетких запросов является актуальной задачей. Онтологии, выступают в роли формальных спецификаций для интерактивного поиска нужной пользователю информации, обеспечивая ему удобную графическую навигацию по РБД. Формальные понятия в онтологии описывают и инкапсулируют запросы на языке SQL, что не требует от пользователя знания этого языка. Поскольку пользователь оперирует как четкими, так и нечеткими запросами приходится создавать средства их спецификации в рамках единой информационной системы. Лучше всего для этой цели подходят средства извлечения онтологий на базе АФП, как наиболее популярного направления в интеллектуальном анализе данных.

Инструментальные программные средства извлечения онтологий из РБД, такие как ToskanaJ, Anakonda и др. ограничены созданием концептуальных шкал на основе классической бинарной логики [12]. Это существенно искажает с их помощью представление нечетких запросов. В связи с этим предлагается наделить подобные средства возможностью задания нечетких шкал, позволяющих создавать НФК. Также для частичного устранения потери информации при приведении НФК к четкому виду необходимо предусмотреть описание модификаторов базовых терминов лингвистических переменных, за счет которых онтологии, формализующие нечеткие запросы, становятся семантически богатыми и более точными.

Список литературы

[1] Benali-Sougui, I. Flexible SQLf query based on fuzzy linguistic summaries / I. Benali-Sougui, M. Sassi-Hidri, A. Grissa-Touzi. - http://arxiv.org/abs/1401.0494

[2] Ma, Z.M. A literature overview of fuzzy database models / Z.M. Ma, Ya. Li // Journal of information science and engineering. – 2008. - 24. – P. 189-202.

[3] Заде, Л.А. Размытые множества и их применение в распознавании образов и кластер-анализе / Л.А. Заде // Классификация и кластер. Под ред. Дж.Вэн Райзина. - М., 1980. - С. 208-247.

[4] Stumme, G. Conceptual knowledge discovery in databases using formal concept analysis methods / G. Stumme, R. Wille, U. Wille // LNCS 1510. - Berlin-Heidelberg: Springer, 1998. - P. 450-458.

[5] Виноградов, И.Д. Методика построения онтологий предметных областей в универсуме, представленном реляционной базой данных / И.Д. Виноградов, С.В. Смирнов // Знания – Онтологии – Теории: Материалы Всероссийской конф. с международным участием (8-10 октября 2013 г., Новосибирск, Россия). Т. 1.– Новосибирск: Институт математики СО РАН, 2013. - С. 77-84..

[6] Ganter, B. Formal Concept Analysis. Mathematical foundations / B. Ganter, R. Wille. - Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1999.- 290 p.

[7] *Кузнецов, С.О.* Решетки формальных понятий в современных методах анализа и разработки данных. Поспеловские чтения 29 ноября 2011 г. / С.О. Кузнецов М.: 2011. - http://posp.raai.org/data/posp2011/kuznetsov.pdf
[8] *Yang, K. M.* Fuzzy Concept Mining based on Formal Concept Analysis / K.M. Yang, E.H. Kim, S.H. Hwang, S.H. Choi // Int. J. of Computers. – 2008. - Issue 3., V.2. – P. 279-290.
[9] *Смирнов, С.В.* Нечеткие формальные контексты при построении онтологий на основе анализа формальных понятий: происхождение и использование / С.В. Смирнов // Знания – Онтологии – Теории: Труды Всероссийской конф. с международным участием (14-16 сентября 2007 г., Новосибирск, Россия). Т. 2. – Новосибирск: Институт математики СО РАН, 2007. - С. 17-25.
[10] *Quan, T.T.* FOGA: a fuzzy ontology generation framework for scholarly semantic web / T.T. Quan, S.Ch. Hui, T.H. Cao. - http://olp.dfki.de/pkdd04/quan-final.pdf.
[11] Concept Explorer - http://conexp.sourceforge.net
[12] *Vogt, F.* TOSCANA – A graphical tool for analyzing and exploring data / F. Vogt, R. Wille // Graph Drawing'94. - LNCS 894. - Springer Berlin-Heidelberg: Springer, 1995. - P. 226-233.

СЕМАНТИЧЕСКИЙ ПОИСК В АННОТИРОВАННЫХ БАЗАХ ДАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФАКТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

А.В. Вохминцев, А.В. Мельников,

Челябинский государственный университет
454001, Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129, Россия
vav@csu.ru, mav@csu.ru
тел: +7 (351) 799-72-88, факс: +7 (351) 799-71-04

Ключевые слова: *аннотированные базы данных изображений, фактографический анализ, Image Net, Word Net, методу WARP-потери, онтология, text mining, прикладная лингвистика, извлечение фактов,*

Abstract

Nowadays the numerous datasets annotated images were collected. These data stores contain millions of images and thousands of possible annotations to them, so it becomes urgent task of searching images, objects and parts in the image. This paper presents a new method for automatically annotating images by using the objects and their parts.

Введение

На сегодняшний день были собраны многочисленные массивы данных аннотированных изображений. В этих хранилищах данных содержатся миллионы изображений и тысячи возможных аннотаций к ним, поэтому становится актуальной задача поиска изображений, объектов и частей в изображении.

В данной работе мы предлагаем метод, который позволит маркировать объекты и их части без необходимости использования полностью маркированных данных. Метод основан на комбинировании подходов, основанных на стандартном аннотировании изображений ImageNet и аннотировании семантических отношений объект-часть WordNet.

Изображения и данные на естественном языке – два типа представления информации, которые дополняют друг друга, и понимание того, как преобразовывать информацию из одного типа в другой, представляет значительный интерес для многих ученых. В одном направлении, аннотирование изображений переводит изображения в слова, а в обратном направлении поиск изображений переводит слова в изображения. Семантика и слов, и изображений играет ключевую роль в этих двух процессах, поскольку для поиска семантически связанных слов и изображений необходимо довольно точное преобразование. Между объектами существуют сложные семантические отношения, например, отношения между объектами включают в себя отношения X - часть Y и X - экземпляр\образец Y. Похожие отношения существуют и в семантике текстовых терминов.

В данной работе нами будет предложен метод машинного обучения для изучения семантики слов, объектов и частей объектов, который заключается в изучении латентных семантических представлений для каждого из возможных слов, словосочетаний, объектов или их частей. Каждый семантический концепт имеет векторное представление в низкоразмерном пространстве вложения, размеры которого определены в массиве информации. В низкоразмерном семантическом пространстве вложения нас интересуют схожесть между словами, объектами и частями объектов, например, таким образом, чтобы объекты были связаны с определенными названиями или частями внутри пространства. Чтобы достичь этого, мы используем функцию потерь, которая оптимизирует ранжирование названий, присвоенных объекту. Иными слова-

ми, функция потерь обеспечивает правильное распределение слов в верхней части ранжированного списка. Таким образом, разработанный метод должен позволять осуществлять автоматическую привязку изображений к объектам и их частям внутри пространства.

В данной статье будут рассмотрены следующие вопросы:

- описание онтологической модели знаний;
- семантические модели свойств и объектов;
- метод машинного обучения для изучения семантики слов, объектов и частей объектов;
- метод Text Mining формирования аннотированных баз данных.

1 Онтологическая модель базы знаний

Полнотекстовая база данных – это множество документов, которые связаны друг с другом перекрестными ссылками, поэтому наиболее адекватно она представляется в форме семантической сети. Однако для хранения детализированной информации о предметной области ее необходимо дополнить множеством онтологий и метаописаний знаний, содержащихся в текстовых документах (Berners-Lee T., Hendler J., Lassila O.). Следовательно, мы можем ввести определение онтологии:

$$O = \{O_i, A, O_{links}, O_{properties}, A_a, A_p\}$$

где O_i – идентификатор объекта;

- A – атрибуты объекта;
- O_{links} – связи семантической сети, приписываемые объекту, с другими объектами;
- $O_{properties}$ – признаки объекта;
- A_p –действия над объектом;
- A_a – действия объекта;
- C – контексты объекта;
- T – хронология объекта (изменение атрибутов объектов во времени).

Предлагаемая модель знаний имеет преимущества как перед традиционными онтологиями, так и перед семантическими сетями, т.к. объекты в ней рассматриваются с учетом контекста текстового документа (абзаца, предложения, и.т.п.) и с учетом хронологической шкалы времени. Такой подход позволяет разделить морфологически одинаковые лексемы друга от друга на основе семантической информации об атрибутах, контекстах и хронологии объекта [1].

2 Семантические модели для слов и объектов

Введем описание модели представления только слов и объектов, которая изучает одиночное латентное представление семантической особенности, где оба объекта представлены в изображениях и аннотациях. Функции отображения в данном случае одинаковы, но изучаются вместе для оптимизации контролируемой потери интереса для нашей финальной задачи (в данном случае это аннотирование изображений).

Условные обозначения:

L - определенное количество изображений, выраженных определенным количеством словарных слов K, соотносящихся с аннотациями к изображениям.

I - примерное пиксельное пространство изображений (без ограничений к его размеру).

ΦI :I→ R - соединяет изображение с его разреженным представлением.

ΦL:L→N - связывает аннотацию с индексом в словаре.

EI :I→RD - вкладывает изображение в семантическое пространство.

EL:L→RD - вкладывает аннотацию в то же самое семантическое пространство. В некоторых случаях семантические пространства для изображений и аннотаций различаются (см. раздел 6.2 "Неразделяемые модели").

fI :I×L→R - определяет степень схожести между аннотацией и изображением.

Допустим, изображение Io содержит какой-либо объект. Мы хотим изучить функцию EI :I→RD, которая вкладывает данный объект в низкоразмерное семантическое пространство (D здесь обычно составляет 50-100 размеров, EI или Io - представление объекта Io в семантическом пространстве). В то же время, учитывая аннотацию Lo объекта, мы также стремимся изучить функцию EL:L→RD, которая представляет аннотацию, находящуюся в том же самом семантическом пространстве. Таким образом, модель принимает вид:

(1) $f_I (I_o, L_o) = S (Ei(I_o), E_l(L_o))$,

где $S:R^D \times R^D \rightarrow R$ - степень схожести в семантическом пространстве, например, скалярное произведение $S(x,y)= x \cdot y$.

Для представления свойств изображений, мы сначала должны использовать фиксированное преобразование Φ_I, которое преобразует пиксельное представление в N-размерный вектор, который в этой работе (как и во многих других) является высокоразмерным и разреженным представлением свойств. Затем мы преобразовываем это промежуточное представление в D-размерное семантическое пространство через линейную карту, используя матрицу параметров $V = D \times N$:

(2) $E_I(I_o) = V \Phi_I(I_o)$,

В нашей модели также имеется словарь с определенным количеством обозначений (K), которые могут быть вложены с помощью EL. Вслед за другими работами, посвященными вложениям представлений для текста для каждого обозначения, мы изучим D-размерный вектор, представляющий обозначение, что приведет к появлению DxK-размерной матрицы параметров W:

(3) El (Lo) = WΦL(Lo),

где ΦL связывает определенное обозначение с его словарным индексом и находит нужную колонку в матрице $DxK=W$ (заметьте, что стандартное матричное произведение с одноточечным вектором потребовало бы тех же самых операций).

Наконец, для S мы выбираем схожесть скалярного произведения в семантическом пространстве, что дает нам финальную формулу:

(4) $f_I (I_o, L_o) =(V \Phi_I(I_o)) W_{\Phi L(Lo)}$,

Наша цель - ранжировать возможные аннотации для конкретного изображения таким образом, чтобы наиболее высоко ранжированные аннотации как можно лучше описывали бы семантическое содержание изображения.

3 Метод машинного обучения для изучения семантики слов, объектов и частей объектов

Решение задачи аннотирования изображений с помощью модели семантического вложения состоит в использовании совместной модели вложения слов и изображений из раздела 2, обученной методу WARP-потери. Матрицы V и W инициализируются случайным образом (средний 0, стандартное отклонение $1/\sqrt{d}$). Затем мы регуляризируем вес наших моделей, давая им ограниченную норму. Процесс изучения обозначения объектов и их частей в изображениях требует наличия значительного количества точно обозначенной информации, а также больших финансовых вложений. Эта проблема представляет особую сложность, поскольку она заклю-

чается не только в сборе информации, но и в обучении нетривиальной модели. Мы предложим метод, который облегчит первый аспект [2].

Наш метод обучения базируется на двух принципах. Во-первых, в настоящий момент существуют большие массивы данных, содержащие изображения, обозначенные названиями объектов, которые на них изображены. Эти массивы данных содержат миллионы изображений и тысячи аннотаций. Во-вторых, многие банки знаний предоставляют описание различных семантических отношений между словами (например, отношения "объект-часть объекта"). Мы предлагаем объединить эти два источника информации для подбора материала для обучения.

Если быть точными, мы используем ImageNet (Денг и др., 2009a) и WordNet (Миллер, 1995) — две базы данных, основывающиеся на общем наборе семантических категорий. WordNet — это обширная база данных, включающая в себя множество лексических единиц. Узлы базы (или *синсеты*) соответствуют значениям слов, а грани определяют различные типы отношений, включения отношения ISA и объект-часть. ImageNet — это база данных изображений, организованная по принципу WordNet, где набор изображений ассоциируется с определенным синсетом. Поскольку найти большое количество изображений с уже обозначенными объектами и их частями — сложная задача, взамен мы предлагаем использовать пары изображений, обозначения которых семантически связаны с использованием отношения объект-часть в WordNet. В этом и заключается ключевая идея нашего метода обучения. Например, если мы хотим обучиться тому, как назвать автомобиль и его части, WordNet предоставляет несколько "кандидатов", таких, как колесо, лобовое стекло или люк в крыше. После этого, используя ImageNet, мы можем получить доступ к большому количеству изображений автомобилей, колес, лобовых стекол или люков. Таким образом, мы можем создать многочисленные примеры для обучения, комбинируя изображения автомобилей и изображения его частей. Сложность же заключается в том, что изображения частей не происходят из тех же изображений, что и объект. Они могут различаться в масштабе, текстуре и освещении. Алгоритм обучения должен в достаточной степени абстрактно представлять объекты, чтобы обучение успешно проходили под подобным непрямым контролем[3].

Семантическая модель слов и объектов обучались с помощью квадруплетов (I_o, L_o, I_p, L_p), где I_o - изображение объекта, L_o - обозначение объекта, I_p - изображение части объекта, L_p - обозначение части объекта. Оригинальность нашего подхода, как было сказано выше, что I_p не берется из I_o. Изображение может обозначаться несколькими синсетами, поскольку на одном и том же изображении могут присутствовать разные объекты. Используя более 400 тысяч изображений и 771 отношение объект-часть, мы можем составить порядка 10 млн. подобных квадруплетов. Такого количества примеров невозможно было бы достичь, если бы мы использовали исчерпывающее обозначение изображений. Для оценки мы создали 50 тысяч контрольных квадруплетов из 37 920 пар изображений, а также 100 тысяч тестовых квадруплетов из 38 412 пар изображений.

Пусть $x = (I_o , L_o , I_p , L_p)$ положительный квадрадуплет, тогда алгоритм обучения можно представить в следующем виде:

1) Выбрать случайный положительный тренировочный квадруплет x.
2) Выбрать либо ограничение (5) , либо ограничение (6).

(5) а) $f_q (I_o , L_o , I_p , L_p) > f_q\ I_o , L^- , I_p , L_p\ \forall L^- _ = L_o$,

(6) б) $f_q (I_o , L_o , I_p , L_p) > f_q\ I_o , L_o , I_p , L^-\ , \forall L^- =_ L_p$,

3) Задать N, равное нулю.
4) Повторить:

- создать отрицательный триплет $x\tilde{}$ путем случайной выборки обозначения L^- и вывести $x\tilde{} = (I_o , L^- , I_p , L_p)$ для ограничения (5) и $x\tilde{} = (I_o , L_o , I_p , L^-)$ для ограничения (6)
- N = N+1 пока не $f_q (x) > f_q (x)\tilde{} + 1$ или $N \geq \gamma$.

Сделать шаг стохастического градиента для минимизации $E([y/n])|1 - f_q (x) + f_q (x)\tilde{}|_+$.

5) Усилить ограничения каждой колонки $W_i _ \leq 1$, $_V_i _ \leq 1$, $\forall i$ (касается только обновления параметров, изменившихся после шага 5).

4 Метод Text Mining формирования аннотированных баз данных

Базы знаний могут формироваться как экспертами в предметной области в автоматизированном режиме, так и при помощи алгоритмов класса Text Mining в автоматическом режиме, которые позволяют извлекать информацию об объектах, их атрибутах и связях друг с другом на основе формальных правил [4]. На сегодняшний день среди всех систем, реализующих концепцию семантического анализа, можно отметить Convera RetrievalWare и Russian Context Optimizer (для русскоязычных документов). В данной работе будет рассмотрен методов фактографического анализа текста на естественном языке, который позволяет на основе заранее определенных семантических правил вывода извлекать информацию об объектах мониторинга. Введем основные определения.

Метод фактографического анализа состоит из следующих основных этапов:

1) Предсинтаксический анализ:
- морфологический анализ текста;
- обработка словоформ, которых нет в морфологическом словаре;
- идентификация стоп-слов;
- предварительный анализ типовых конструкций текстового документа.

В результате 1 этапа формируется множество предложений, каждое из которых содержит упорядоченный список слов с вариантами омонимичных лексем.

2) Синтаксический анализ:
- извлечение типовых конструкций предложения на основе информации об морфологии, сборка словосочетаний;
- идентификация синтаксическо-семантических конструкций в тексте;
- построение дерева синтакико-семантических зависимостей.

В результате 2 этапа формируется множество деревьев синтактико-семантических зависимостей, из которых на основе эвристических алгоритмов выбирается наиболее вероятный вариант разбора.

3) Постсинтаксический анализ:
- Анализ словоформ, не вошедших в дерево синтакико-семантических зависимостей.

4) Семантический анализ:
- выделение целевых объектов в тексте;
- построение логической схемы ситуации;
- классификация семантических сетей;
- контекстный анализ;
- хронологический анализ, устранение коллизий.

В результате 4 этапа формируется множество целевых объектов с семантическими связями. Для извлеченных целевых объектов строится логическая схема ситуации. Поученное множество логических схем классифицируется. Метод фактографического анализа позволяют найти в тексте описания ситуаций в соответствии с определенными шаблонами, например, изобретение адресной шины или покупка акций. Поиск фактов производится по семантической сети текстового документа. Логическая схема ситуации идентифицирует класс описываемых ситуаций и содержит множество слотов, которые однозначно отделяют ее от других ситуаций. Модуль семантического анализа заполняет слоты их значением, при этом часть слотов может остаться не заполненной. Далее семантический модуль относит множество семантических сетей предложений текстового документа к соответствующему шаблону, задающему факт на основе модифицированного алгоритма деревьев решений C4.5. в соответствии шаблонами ситуаций в базе знаний. В методе фактографического анализ также используются стати-

стические методы, которые позволяют определить частоту/вес целевого объекта или связи между ними в документе [5]. Статистические методы основаны на исчислении показателей TF*IDF.

Заключение

В настоящей работе представлен новый метод автоматического аннотирования изображений с помощью объектов и их частей. Также мы описали модель базы знаний, созданную на основе ImageNet и WordNet и онтологий путем внедрения отношений в пределах маркировок, основанных на частях.

Список литературы

[1] Vokhmintsev A.V., Melnikov A.V. Methods of extracting associative patterns from full-text databases // Proc. of the 15 th International Workshop on Computer science and information technologies (CSIT'20113). – Vol. 1. – Ufa , 2013. – P. 59-65.

[2] A. Vokhmintsev, A. Melnikov The Knowledge on the Basis of Fact Analysis in Business Intelligence / Digital Product- and Process Development Systems. Spinger Book: London, Dresdsen- 2013.- P.134-141.

[3] Voxmintsev A. V. Integration of proffessional knowledge bases with the help of factual analysis and ontological models // Proc. of the 13th International Workshop on Computer science and information technologies (CSIT'2011). – Vol. 1. – Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2011. – P. 61-66

[4] Осипов Г.С., Тихомиров И.А., Смирнов И.В. Exactus –система интеллектуального метапоиска в сети Интернет. // Труды десятой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2006. М: Физматлит, 2006. т. 3. – С. 859-866.

[5] Вохминцев А. В., Мельников А.В. Применение онтологических моделей и фактографического анализа естественного текста в задачах конкурентной разведки // Системный анализ и информационные технологии: труды четвертой международной. конференции – Челябинск: Изд-во ЧелГУ, 2011. – Т. 1. – С. 81-88.

ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОГРАММНЫМ ПРОДУКТАМ И ПРОГРАММНЫМ ПРОЕКТАМ

В.Е. Гвоздев, О.Я. Бежаева

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К.Маркса, 12, Россия
wega55@mail.ru, obezhaeva@gmail.com
тел: +7 (347) 272-74-65

Ключевые слова: *программная система, программный проект, спецификации требований пользователей, архитектура программной системы, характеристики эффективности*

Abstract

In this paper is considered the questions of user's requirement construction to the software and software projects position of complex system control. The principles of the requirement formation are discussed. Authors of paper offered the software system architecture, which allows analyzing it from clashing classes optimization of efficiency characteristics point of view.

Введение

В настоящее время реализация программных проектов является обязательной составляющей создания сложных аппаратно-программных комплексов. Реализация проектов этого класса требует особого подхода. Это обусловлено тем, что для этих проектов критическим фактором успеха являются нематериальные активы. Эта группа принципов определяет основные требования к организации программного проекта. Они носят общесистемный характер, поэтому при реализации конкретного программного проекта каждый из этих принципов наполняется конкретным уникальным содержанием.

В литературе, посвященной вопросам управления качеством продуктов и проектов, подчеркивается важность построения эффективной системы управления требованиями к продукту. Анализ литературных источников [5, 16] позволяет утверждать, что ошибки, допущенные при формировании требований, влекут за собою тяжелые последствия, вплоть до провала проекта. В [6] подчеркивается, что слабая подготовленность специалистов в вопросах выявления проблем и требований заказчиков, недостаточная инструментальная поддержка этого вида деятельности является одной из основных причин выпуска продуктов, свойства которых в недостаточной степени удовлетворяют ожиданиям заказчиков и пользователей.

Управление формированием требований необходимо рассматривать с позиций управления сложными системами. Этот вывод обусловлен тем, что управление созданием аппаратно-программных комплексов, по сути, является управлением организационно-технической системой, то есть учет человеческого фактора имеет принципиальное значение.

Рост сложности и масштабов программных проектов, тяжелые последствия стратегических ошибок, допускаемых на ранних стадиях проекта и обусловленных низким качеством требований, необходимость учета противоречивых интересов разных групп правообладателей, вовлеченных в проект; ограниченные материальные и нематериальные ресурсы проектов, вынуждают разрабатывать эффективные системы управления программными проектами. Это, в том числе, требует разработки методологических, методических, модельных, инструментальных, информационных основ управления формированием качественных требований, как к создаваемому программному продукту, так и к реализующему его проекту.

1 Принципы формирования требований

Рассматривая требования как одну из форм представления сложных систем, можно заключить, что принципы формирования требований можно разделить на два класса: общесистемные и принципы формирования требований к программным проектам.

К общесистемным принципам следует отнести следующие:

1) Принцип системности – определяет сущность системного подхода к исследованию и проектированию систем любой природы. Согласно этому принципу любая сложная система, с одной стороны, является системой среди подобных. С другой – является подсистемой более сложной системы. Применительно к формированию требований это означает, то, что с одной стороны, присутствие подобных систем, с которыми предполагается взаимодействие проектируемой системы, накладывает ограничения на выбор решения задач организационного, информационных и технологического характера. С другой стороны, содержание функциональных требований определяется особенностями бизнес-процессов, протекающих в объекте. Системные принципы отражают те закономерности, которые присущи всем стадиям реализации сложной системы. Реализация общесистемных принципов обеспечивает возможность последовательного итерационного совершенствования структуры и содержания требований.
2) Принцип полиморфизма/изоморфизма. Согласно данному принципу, при разноаспектном рассмотрении системы требований ей может быть поставлено в соответствие множество моделей (например, система требований рассматривается с позиций организационно-технической системы, как открытая система; как экономический объект). Принцип изоморфизма является обратным по отношению к принципу полиморфизма и означает, что системы разной природы могут исследоваться с помощью одного и того же формального аппарата.
3) Принцип многообразия (комплексности оценивания состояния). Согласно этому принципу система требований должна рассматриваться как сложный объект, содержащий в себе достаточное количество разноаспектной информации, необходимой для построения за заданное время в рамках определенного бюджета системы, способной поддерживать решение выделенного множества бизнес-задач с необходимым качеством.
4) Принцип декомпозиции означает возможность поэтапного преобразования требований высокого уровня к ожидаемому продукту в совокупность требований, связанных по вертикали и по горизонтали, и позволяющих реализовать с необходимым качеством все процессы в составе проекта.
5) Принцип иерархичности тесно связан с принципом декомпозиции и означает возможность поставить в соответствие каждой стадии реализации проекта множество требований, причем требования, соответствующие более поздней стадии, являются детализацией требований более ранней стадии. Иерархическая организация требований является предпосылкой обеспечения их трассируемости. Реализация принципа иерархичности является предпосылкой обеспечения непротиворечивости требований.
6) Принцип интеграции (композиции) означает, что качество отдельных требований, а также свойства системы требований $k+1$ уровня иерархии определяется качеством реализации требований k-го уровня иерархии. Принцип интеграции является основой реализации восходящего подхода к созданию сложных систем.
7) Принцип эквивалентных путей достижения цели заключается в том, что существуют несколько возможных путей построения системы: реализация объекта на новых принципах; построение объекта с использованием готовых компонент; различным распределением функций между компонентами системы.
8) Принцип системной готовности заключается в том, что система требований должна обеспечивать возможность планомерной и скоординированной реализации проекта. Реализация этого принципа предполагает, во-первых, параллельный и согласованный подход к

реализации всех видов деятельности, связанных с созданием объекта. Во-вторых, возможность встраивания требований к объекту в проект (например, посредством QFD).

9) К принципам формирования требований к программным проектам относятся следующие:
10) Принцип согласованности выражается, во-первых, в согласованности требований, соответствующих разным стадиям программного проекта. Практически это реализуется за счет вертикальных связей между разными иерархическими уровнями проекта. Во-вторых, в обеспечении согласованности между разными действиями, принадлежащими к основным, вспомогательным и обеспечивающим процессам в рамках некоторой стадии программного проекта. Практически это реализуется за счет горизонтальных (координирующих) связей между разными видами работ. В-третьих, в обеспечении согласованности между требованиями к качеству программного продукта и требованиями к качеству результатов, получаемых при реализации разных стадий программного проекта.
11) Принцип пропорциональности и планомерности. Реализация этого принципа предполагает планомерный, скоординированный, контролируемый характер процессов формирования требований на каждой стадии реализации проекта. Это означает наличие опорного плана процесса формирования требований; наличие действующей системы мониторинга за реализацией плана; наличие правил, методик, процедур управления требованиями; наличие плана реагирования на риски, связанные с формированием требований.
12) Принцип преемственности заключается в том, что при формировании требований к новому программному продукту в максимально возможной степени использовался опыт и наработки, накопленные при реализации предыдущих проектов. Реализация этого принципа способствует повышению уровня зрелости разработки программной системы и, как следствие, оптимизации расходования ресурсов на формирование требований на различных стадиях программного проекта.
13) Принцип инвариантности предполагает такую организацию (формулировку) требований и организации таких вертикальных и горизонтальных связей между ними, чтобы внесение изменений в некоторые требования в минимальной степени требовало внесения в другие требования. Другими словами, «внутренняя прочность» требований должна быть сильнее, чем связи между ними. Реализация этого принципа является предпосылкой обеспечения возможности сборочного конструирования программных систем.
14) Принцип экспертизы предполагает привлечения разнопрофильных специалистов для формирования системы требований. Реализация этого принципа является одним из необходимых условий реализации главного принципа управления сложными системами – принципа комплексности.
15) Принцип наблюдаемости предполагает наличие на каждой стадии реализации программного проекта таких наборов ключевых показателей эффективности, анализ значений которых позволяет вынести однозначное решение, во-первых, о результативности выполнения опорного плана проекта. Во-вторых, о эффективности использования ресурсов проекта.
16) Принцип персональной ответственности предполагает создание такой организационной системы, при которой как каждая задача и процесс в составе проекта, так и проект в целом, имеют своего «владельца», который несет персональную ответственность за получаемые результаты.
17) Принцип разумной достаточности означает обеспечение выполнения всех задач и процессов в составе проекта ресурсами, состав и объемы которых соответствуют реальным потребностям проекта. Реализация этого принципа обеспечивает разумное сокращение себестоимости программного продукта.
18) Принцип постепенной детализации. Рассмотрение проекта следует начинать с большой высоты (с перспективы «хозяин» в модели Захмана или архитектуры бизнеса в модели TOGAF и др.), а не с подробного описания одного или нескольких нижележащих элемен-

тов. Это обусловлено тем, что начиная описание информационного проекта с какого-либо нижележащего элемента, мы не получим целостного видения программного проекта.

2 Роль спецификаций требований пользователей как критического фактора управления качеством программного продукта и проекта

Определим причины, делающие спецификации требований пользователей критическим фактором успеха создания и использования программных систем.

Эталон потребительских свойств программной системы. Спецификация требований пользователей представляет собою систему функциональных и нефункциональных требований к программной системе в терминах конечных пользователей. Система функциональных и нефункциональных требований является эталоном с которым будут сравнивать результаты функционирования объекта [3], а также основой разработки сценариев валидации программной системы [11, 12]. Спецификация требований пользователей как эталон потребительских свойств программного должна обладать следующими базовыми свойствами [14]: корректность; определенность; полнота; согласованность; ранжированность по важности/устойчивости; верифицируемость; модифициуемость; трассируемость.

Способ представления голоса ключевых правообладателей. Программные продукты только тогда имеют практическую ценность, когда способствуют повышению эффективности и результативности функционирования объект, информационную поддержку управления которым они обеспечивают [7]. В этом же источнике обращается внимание на то, что разные правообладатели имеют разное видение предприятия и, следовательно, выдвигают разные требования к системе информационной поддержки управления. Спецификация требований пользователей является тем компромиссным решением, в котором, в приемлемом для ключевых правообладателей объеме, представлены их интересы.

Основа для определения бюджета и сроков проекта. Объем и содержание функциональных требований, а также ограничения на возможные решения в виде нефункциональных требований являются основой для оценивания масштаба и сложности проекта. Это, а также учет доступных ресурсов, служит основой оценивания бюджета и сроков проекта (под ресурсами согласно COBIT понимаются кадры, инфраструктуры, инструментальные средства, доступные работникам истории ранее реализованных проектов(Project History Document)) [11].

Прогнозируемое состояние внешней, по отношению к программному проекту, среды. Внешней средой для создаваемого программного продукта являются, во-первых бизнес-процессы, для которых система должна обеспечивать информационную поддержку, во-вторых информационные системы, с которыми взаимодействует программный продукт. Как внешние бизнес-процессы, так и информационные системы являются динамическими объектами. Иными словами с момента, с момента завершения проектирования спецификаций требований пользователей, до момента появления программного продукта может произойти изменение состояния, как бизнес-процессов, так и информационных систем. В силу этого, содержание спецификаций требований пользователей должно соответствовать тому состоянию внешней среды, которое будет на момент появления программного продукта.

Компромиссное решение, поддерживаемое правообладателями. Для нормального хода программного проекта необходимо обеспечить его поддержку (либо хотя бы нейтральное отношение) со стороны правообладателей, способными по разному влиять на ход проекта (вопросы управления отношением правообладателей к проекту рассматриваются, например, [15]). В силу того, что разные правообладатели по-разному оценивают программный продукт [7], поддержка программного проекта с их стороны возможна лишь в случае, если его реализация не представляет угрозы их жизненным интересам. Таким образом, содержание спецификаций требований пользователей не должно противоречить интересам разных правообладателей.

Иными словами, спецификация требований пользователей представляет собой решение, учитывающее интересы правообладателей и поддерживаемое ими.

Профили, характеризующие разные способы взаимодействия правообладателей с программной системой. В основе известной концепции профилей лежит стремление максимального учета при разработке программной системы возможных способов взаимодействия с ней разных правообладателей. Принципиальное отличие данной концепции от других концепций повышения качества программных продуктов состоит в том, что основное внимание уделяется рассмотрению программной системы глазами правообладателя. Другие же концепции концентрируют внимание преимущественно на свойствах программных продуктов и характеристиках разработки.

Под профилем понимается полное множество альтернатив, для каждой из которых существует определенная вероятность появления. Понятие «профиль» применимо ко всем стадиям ЖЦ программной системы, в том числе на стадии специфицирования требований пользователей. При этом подчеркивается, что множество профилей не является фиксированным, и зависит от особенностей проекта.

Учет интересов разных правообладателей в рамках концепции профилей достигается за счет различных режимов функционирования программной системы, причем каждый режим ассоциируется с определенным правообладателем (группой правообладателей) и, соответственно, разным требованиями пользователей. Ограничением концепции является необходимость задания вероятностей реализации независимых альтернатив (на каждом из уровней рассмотрения системы и при каждом из выделенных режимов), причем альтернативы должны представлять собою полную группу событий.

Основа формирования требований к процессам производства ПС. Требования пользователей к потребительским характеристикам конечного продукта определяют требования к характеристикам процессов производства программной системы (основного и вспомогательного) [13]. Примером реализации этого положения является QFD методология. Ограничением данной методологии является то, что не учитывается неопределенность, свойственная требованиям пользователей.

Основа проектирования спецификаций использования программной системы разными правообладателями. Спецификации использования ПС определяют структуру использования продукта и определяются в терминах внешне наблюдаемых состояний системы или инициируемых правообладателями событий (операций), с которыми связаны переходы между состояниями. Спецификации использования, во-первых, дают исчерпывающее описание способов использования ПС, во-вторых, оценки того, насколько часто будут реализовываться те или иные варианты использования системы.

Спецификации требований пользователей – объединение правообладателей для достижения целей программного проекта, действующих на основе определенных принципов и правил.

Спецификации требований пользователей как основа реализации программного проекта, т.е. совокупность действий, ведущих к образованию, совершенствованию взаимосвязей между ресурсами программного проекта на разных стадиях ЖЦ программного продукта.

Спецификации требований пользователей как совокупность характеристик внешних бизнес-процессов и явлений. В силу общественного разделения труда каждый из правообладателей имеет свою зону ответственности в комплексе задач, связанных со стратегическим, тактическим и операционным управлением надсистемой, по отношению к которой программная система выступает в качестве подсистемы. Реализация возложенных на правообладателей задач требует соответствующей информационной поддержки. В силу этого можно утверждать, что спецификация требований пользователей является характеристикой внешних по отношению к программной системе бизнес-процессов и явлений.

Основа анализа уязвимостей ПС на начальной стадии программного проекта. Выявление факторов, способных снизить качество требований пользователей, оценка возможных послед-

ствий, как от отдельных дефектов в требованиях, так и от совокупности дефектов, для качества результатов, получаемых на последующих стадиях программного проекта при выбранной модели жизненного цикла программной системы. Это создает основу для выявления слабых мест в организационной, технологической и кадровой составляющей программного проекта.

2 Архитектура программной системы, позволяющая анализировать ее с позиций оптимизации конфликтующих классов

В основу предлагаемого подхода к выделению архитектуры положено следующее:

- Разное видение программной системы и реализующего ее программного проекта разными правообладателями (группами правообладателей), пользователями и разработчиками. Следствием этого являются разные подходы к оцениванию эффективности программной системы.
- Учет того, что подходы к оцениванию эффективности программной системы зависят от режима ее использования.

На рис.1 представлена иерархия компонентов программной системы, а также окружающая среда, вне которой невозможно проводить исследования программной системы.

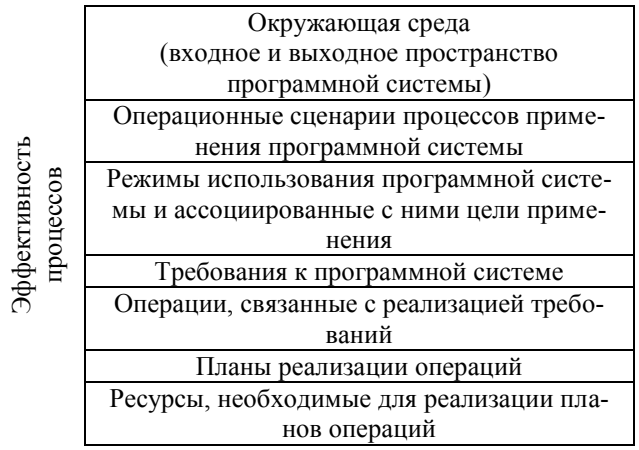


Рисунок 1 - Иерархия компонентов программной системы

Точка зрения заказчика основана на том, насколько появление программной системы будет способствовать повышению эффективности бизнес-процессов [7]. Точка зрения разработчика основана на анализе эффективности использования ресурсов проекта [6]. Полагается, что ресурсы имеют следующие составляющие: организационную, технологическую, инфраструктуру проекта, инвестиции, вспомогательный и обеспечивающие процессы проекта [13].

На рис.2 представлена архитектура программного проекта, ориентированная на обеспечение высокой эффективности внутренних бизнес-процессов. В ее основе лежит архитектура проекта с перекрывающимися фазами [17]. При этом отдельные исполнители специализируются на решении определенных классов задач.

В рамках данной архитектуры сокращается дублирование однотипных разработок во внутренних бизнес-процессах, возрастает эффективность использования внутренних ресурсов. Особенностью этой архитектуры является необходимость координации использования критических ресурсов в нескольких, параллельно выполняемых фазах проекта. Кроме того, одним и тем же исполнителям приходится работать с разными представителями заказчика (отсутствует специализация исполнителей на определенные операционные сценарии процессов применения программной системы). Следствием этого является увеличение затрат, связанных с формиро-

ванием качественных требований к программной системе. В итоге, внешняя эффективность программного проекта снижается.

В рамках этой архитектуры сложно выделить однородные компоненты (цели, требования, операции, планы, ресурсы), ассоциированные с определенными режимами использования программной системы.

На рисунке 3 представлена архитектура, обеспечивающая высокую внешнюю эффективность программного проекта. Высокая внешняя эффективность обеспечивается за счет того, что ресурсы разработчиков, в первую очередь кадровые, ориентированы на различные режимы использования программной системы. При таком подходе разработчики достаточно глубоко вникают в особенности применения системы в разных режимах. Ограничением такой архитектуры является вынужденное дублирование однотипных разработок во внутренних бизнес-процессах.

Вместе с тем, в рамках такого подхода выделяются однородные компоненты (цели, требования, операции, планы, ресурсы), ассоциированные с определенными режимами использования программной системы.

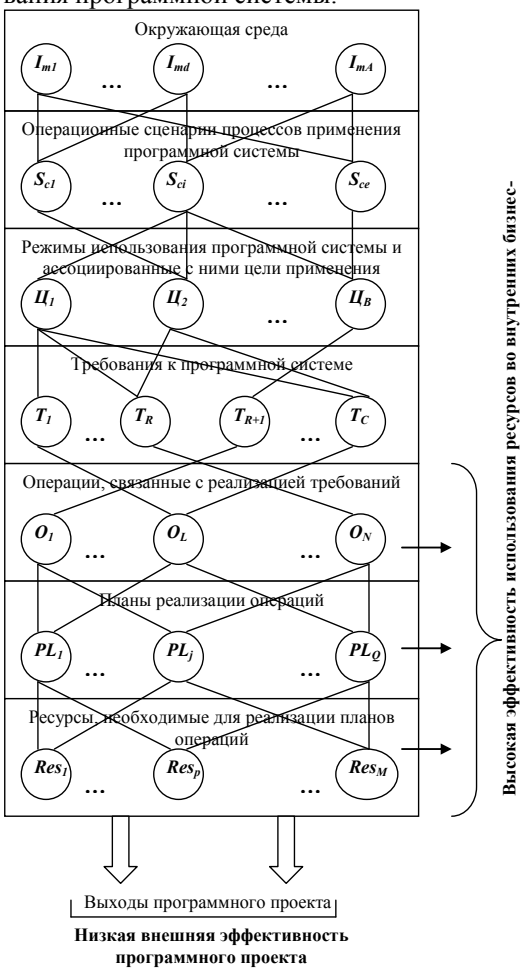


Рисунок 2 – Архитектура, обеспечивающая высокую эффективность внутренних бизнес-процессов проекта

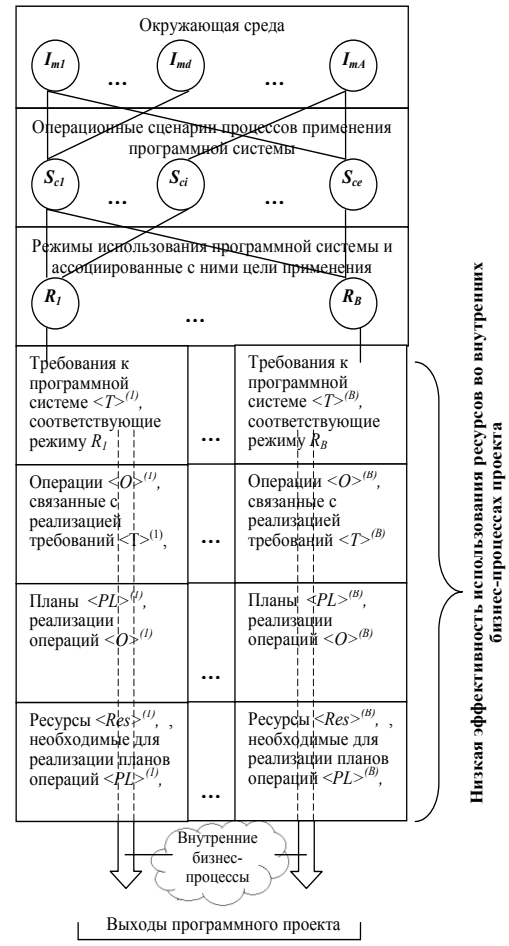


Рисунок 3 – Архитектура, обеспечивающая высокую внешнюю эффективность программного проекта

Следует подчеркнуть, что внешние (с точки зрения заказчика) и внутренние (с точки зрения разработчика) критерии эффективности являются конфликтующими. Выбор подхода к оцениванию эффективности программной системы зависит от того, в каком режиме (штатном, экстремальной загрузки, отказа аппаратных, либо программных компонентов) оказывается система.

Выбор подхода к оцениванию эффективности программной системы зависит от того, в каком режиме (штатном, экстремальной загрузки, отказа аппаратных, либо программных компонентов) оказывается система.

Таким образом, в рамках функционального подхода в статье предлагается архитектура программной системы, позволяющая анализировать ее с позиций оптимизации конфликтующих классов характеристик эффективности: эффективность внутренних бизнес-процессов проекта и внешняя эффективность программной системы.

Заключение

К проектированию спецификаций требований пользователей следует подходить с позиций проектирования сложной системы. Важной составляющей проектирования спецификаций требований пользователей является снижение неопределенности относительно предполагаемых режимов использования программной системы, ее функциональности в разных режимах и т.д. Инструментальной основой снижения неопределенности является построение широкого спектра моделей. Полученные результаты создают основу для построения взаимосвязанной системы структурных, математических и системных моделей средствами когнитивного моделирования, обеспечивающих информационную поддержку управления основным, вспомогательным и обеспечивающим процессами создания программных продуктов с заданными потребительскими свойствами.

Работа над статьей поддержана грантом РФФИ 13-08-00968, РФФИ 14-08-97036.

Список литературы

[1] Виттих В.А. Организация сложных систем //Самара: Самарский научный центр РАН, 2010. – 66с.
[2] Гвоздев В.Е., Ильясов Б.Г. Пирамида программного проекта. Программная инженерия №1, 2011, с.16-24.
[3] ГОСТ Р 51901-2002 Управление надежностью. Анализ риска технологических систем
[4] Гузаиров М.Б., Гвоздев В.Е., Ильясов Б.Г., Бежаева О.Я. Элементы системной инженерии: методологические основы разработки программных систем на основе V-жизненного цикла. М: Машиностроение, 2013, 180с.
[5] Липаев В. В. Анализ и сокращение рисков проектов сложных программных средств. – М.: СИНТЕГ, 2005. – 224с.
[6] Милошевич Д. Набор инструментов для управления проектами – М.: Компания АйТи: ДМК Пресс, 2008.– 729с.
[7] Учебник 4CIO. Версия 1.0. Москва, 4CIO, 2011. – 383с.
[8] Халл Э., Джексон К., Дик Д. Разработка и управление требованиями / пер. с англ. И. Корнипаева Telelogic, 2005.
[9] CobiT 4.1. Российское издание – М.: Аудит и контроль информационных систем, 2008г – 234с.
[10] ESA PSS-05-02 Guide to the user requirements definition phase, March 1995
[11] ESA PSS-05-10 Guide to software verification and validation, March 1995
[12] IEEE Standart for Software Verification and Validation, IEEE STD 1012-2004, June 2005.
[13] IEEE Guide to the Software Engineering Body of Knowledge - SWEBOK, 2004.
[14] IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications IEEE STD 830-1998, June 1998.
[15] Linda Bourne. Project Relationships and Stakeholder Circle TM, PMI Research Conference, 2006
[16] Michael G. Christel. Kyo C. Kang. Issues in Requirements Elicitation. Technical Report CMU/SEI – 92-TR-012 ESC-TR-92-012, September 1992.
[17] PMBOK /Confidence in IBM Risk Management

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ КОЛЛЕКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПРОГРАММНЫМИ ПРОЕКТАМИ

В.Е. Гвоздев, Л.Р. Черняховская, А.И. Малахова, Н.И. Ровнейко
Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия
wega55@mail.ru, lrchern@yandex.ru, nikolaos@mail.ru, aimalakhova@gmail.com
тел.: +7 (347) 2737835

Ключевые слова: *управление программными проектами, онтология, коллективное принятие решений, поддержка принятия решений*

Abstract
The paper considers the question of intelligent and analytical decision making support in software project management. Special attention is paid to the cooperative forming of software project requirements. The approach based on ontological analysis of subject domain is offered. Simulation modeling for dynamic characters estimating to the requirement forming is carried out.

Введение

Управление программными проектами является сложной, многокритериальной задачей, в рамках которой зачастую возникают ситуации, требующие коллективного принятия решений. Управление проектами – это приложение знаний, навыков, инструментов и методов к работам проекта для удовлетворения требований, предъявляемых к проекту [1]. Требования к программному продукту представляют собой динамический объект. Это обусловлено тем, что требования, соотнесенные с разными стадиями реализации программного проекта, являются отражением проблемных ситуаций, соответствующих этим стадиям.

Разные правообладатели имеют различное видение одной и той же проблемной ситуации, что обусловлено различием их персональных аксиологических знаний. Обеспечение эффективных коммуникаций и информационного обмена между правообладателями программного проекта является необходимым условием управления формированием требований к программной системе. Назначение коммуникации состоит в формировании компромиссного решения, приемлемого для всех правообладателей, на основе обмена мнениями и обсуждения разных точек зрения на программный продукт. Принятие коллективных решений должно быть направлено на оптимизацию критериев эффективности управления программным проектом (повышение экономической эффективности и качества, снижение рисков проектирования).

1 Анализ проблемы поддержки принятия коллективных решений при управлении требованиями к программному продукту

Под коллективным, или групповым, выбором понимается процедура принятия решения, основанная на совместном учете и/или согласовании индивидуальных предпочтений коллектива лиц, принимающих решения (КПР) [2].

Коллективный выбор включает две категории проблем: как агрегировать индивидуальные предпочтения в интегральные оценки качества решения, на основе которых ищется наиболее предпочтительное решение, и как организовать саму процедуру выработки коллективного решения, т.е. технологию работы КПР.

Обе категории проблем коллективного принятия решений в большинстве своем присутствуют в процессе управления проектами. В литературе, посвященной вопросам управления качеством программных продуктов и программных проектов, подчеркивается важность построения эффективной системы формирования требований к программному продукту. Формирование требований необходимо рассматривать с позиций управления сложными системами. Этот вывод обусловлен тем, что управление созданием программного продукта, по сути, является управлением организационно-технической системой, то есть учет человеческого фактора имеет принципиальное значение. Из анализа литературных источников можно сделать заключение, что функциональная архитектура системы управления требованиями имеет три составляющие: управление правообладателями; управление извлечением требований; управление представлением требований к программному продукту.

В [3] отмечается важность организации эффективной системы коммуникаций между заинтересованными сторонами как основы формирования рационального подхода к управлению сложными системами. Пользуясь терминологией программной инженерии, можно изложить этот тезис в следующем виде: обеспечение эффективных коммуникаций и информационного обмена между правообладателями программного продукта является необходимым условием управления формированием требований к программной системе. При этом, следуя [3], коммуникация не отождествляется с более узким понятием связи или передачи сообщений. Назначение коммуникации состоит в формировании компромиссного коллективного решения, приемлемого для всех правообладателей, на основе обмена мнениями и обсуждения разных точек зрения на программный продукт.

Эффективным способом интеллектуальной поддержки принятия коллективных решений в процессе формирования требований к программному продукту является привлечение экспертов. При вынесении заключений каждый из экспертов опирается на свои персональные знания. Их оценки относительно объемов ресурсов, необходимых для реализации проекта, обеспечивающего получение программного продукта, обладающего заданными характеристиками, являются различными. При использовании экспертно-статистического подхода, позволяющего совместить в себе статистические оценки и мнения экспертов при анализе требований, становится возможным в дальнейшем провести оценку динамических характеристик процесса формирования требований к программной системе.

2 Оценка динамических характеристик процесса формирования требований к программному продукту

Различие в источниках неопределенности на разных стадиях проекта делает необходимым использовать разные подходы к управлению формированием требований на разных этапах жизненного цикла программной системы.

В силу различия источников неопределенности на разных стадиях создания программной системы изменяется содержание понятия «ключевой правообладатель». К ключевым правообладателям относятся, во-первых, те, которые оказывают большое влияние на ход проекта (в том числе, могут «заблокировать», «убить» проект). Во-вторых, те, на которых результаты проекта оказывают большое влияние [4].

В силу изменения состава и численности правообладателей на разных стадиях проекта, а также то, что в ходе реализации проекта разные правообладатели интегрируются и дезинтегрируются, можно заключить, что требования представляют собою открытую систему.

Разные правообладатели имеют различное видение одной и той же проблемной ситуации, что обусловлено различием их персональных аксиологических знаний [3]. Кроме того, даже один и тот же правообладатель меняет свои представления о ценностях в ходе реализации проекта. Причиной этого является коммуникативные процессы между разными правообладателями [3]. Другими словами, система требований $< T >_i$ i-го правообладателя является его

персональной моделью проблемной ситуации $< T >_i = M_i^{(tj)}(O^{(tj)})$, где $M_i^{(tj)}$ – отображение проблемной ситуации $O^{(tj)}$ в требования *i*-го правообладателя, отнесенное к t_j-му моменту времени. В общем случае процедура формирования требований может быть описана моделью вида $A^{(tj)} : \{< T >_i^{(tj)}\} \rightarrow < R >_i^{(tj)}$, где $< R >_i^{(tj)}$ – система требований.

Стремление найти консолидированное решение проблемной ситуации, в результате коммуникативного процесса $A^{(tj)}$ на базе множества систем требований разных правообладателей $\{< T >_i^{(tj)}\}$ проектируется некоторая система требований $< R >_i^{(tj)}$, с которой соглашаются все правообладатели («никто не против», но не «все за» [3]). При этом в $< R >_i^{(tj)}$ интересы различных правообладателей учтены в разном объеме, с учетом возможности правообладателя влиять на ход проекта и его приближенности к проекту. Верхний индекс подчеркивает то, что как система требований, так и процедура (коммуникативный процесс) формирования требований меняются во времени.

Исходя из вышеизложенного можно утверждать, что система требований является незавершенной системой. Этим объясняется обсуждаемая во многих литературных источниках (например, [5, 6]) изменчивость требований во времени. Следуя известному принципу эквивалентных путей достижения цели, можно заключить, что должны существовать различные процедуры формирования требований. Ниже приведены структурные схемы, соответствующие некоторым из возможных процедур формирования требований. Различие этих моделей заключается в том, как появляется первая версия системы требований:

(а) ключевые правообладатели вначале договариваются о подходах к решению проблемной ситуации, а затем итерационно ищут приемлемый состав и содержание требований;

(б) кто-то из ключевых правообладателей (либо инициативная группа правообладателей) формирует начальную версию системы требований, которая затем итерационно корректируется с учетом интересов всех ключевых правообладателей.

Для упрощения изложения последующего материала будем полагать, что в процесс формирования требований вовлечены три ключевых правообладателя (например: пользователь, разработчик, тестировщик).

В приведенных ниже моделях вершины графа определяют работы (задачи), связанные с формированием требований, которые характеризуются определенной длительностью выполнения, а дуги определяют последовательность их выполнения и взаимоотношения задач друг к другу. Предполагается, что в любой момент времени система (процедура спецификации требований) может находиться лишь в одном из выделенных состояний, причем эти состояния образуют полную группу событий.

*Вариант 1***.** Приводимая ниже вербальная модель и соответствующий ей граф, представленный на рисунке 1, основаны на тексте, приведенном в [7], в разделе «Анализ системных требований».

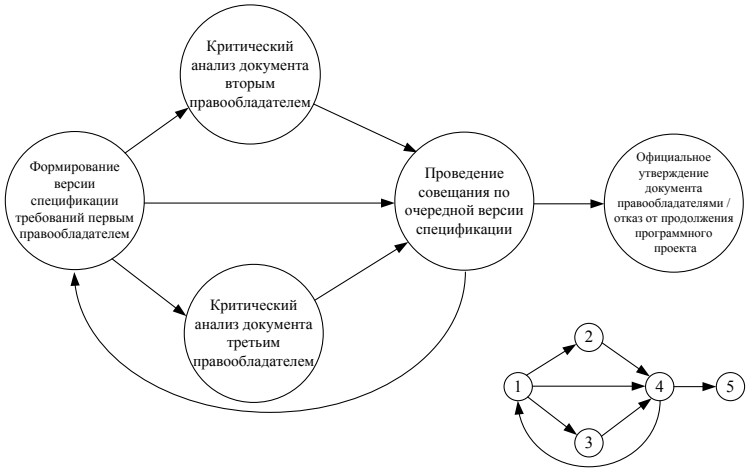


Рисунок 1 – Граф состояний для процедуры проектирования спецификации требований «Вариант 1»

«… Суть процедуры состоит в следующем. Лицо, официально уполномоченное на разработку исходной версии спецификации требований, официально направляет документ для критического анализа правообладателям, вовлеченным в проект. Выявленные любым правообладателем проблемы, фиксируются в протоколе разногласий (англ. – *Review Item Discrepancy* (*RID*)). Содержание *RID* проходит официальное обсуждение на специально организованном совещании. Высказанные замечания должны либо приниматься, либо отклоняться. В ходе обсуждений также могут предлагаться возможные подходы к решению выявленных проблем.

После этого проект документа вместе с принятыми замечаниями возвращается на доработку уполномоченному лицу. Результатами совещания является последовательность протоколов. Каждое совещание завершается дискуссией о необходимости проведения дополнительного совещания…».

Вариант 2. Вербальная модель приведена в [8]. Согласно этой модели, формирование «Концепции использования программной системы» (иными словами – спецификации требований пользователей) включает в себя решение трех задач. Графическая модель, соответствующая упоминаемой вербальной модели, представлена на рисунке 2.

1.Выявление правообладателей системы. Решение этой задачи предполагает широкое привлечение к обсуждению всех лиц, интересы которых затрагивают появление системы. Эффективным приемом выявления правообладателей и вовлечения их в процесс обсуждения требований является формирование сборной команды по формированию продукта (англ. – *Integral Product Team*). В состав команды должны войти опытные специалисты, связанные с разработкой и использованием программной системы. Основная задача команды – выявление правообладателей и создание условий для свободной дискуссии.

Замечание. Свободная дискуссия есть основной инструмент поиска решений в проблемной ситуации, затрагивающей интересы многих заинтересованных сторон. Более подробно этот вопрос обсуждается в [3].

2. Формирование группы, отвечающей за подготовку документа «Концепция использования программной системы». Основная задача группы – сбор и систематизация предложений и мнений правообладателей и итерационное формирование документа.

3. Разработка базового варианта документа «Концепция использования программной системы», пригодного для доработки с участием правообладателей. Основным содержанием до-

кумента является компромиссные решения по разным вопросам создания программной системы, против которых не возражают разные правообладатели.

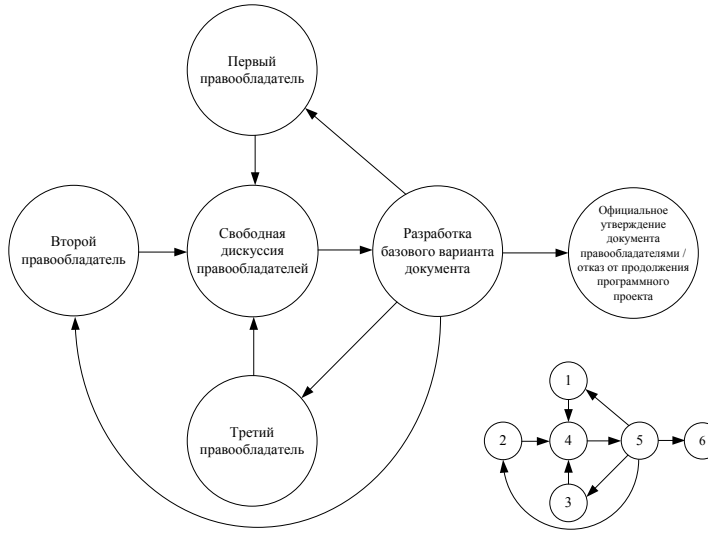


Рисунок 2 – Граф состояний для процедуры проектирования спецификаций требований «Вариант 2»

Вариант 3. Один из правообладателей выступает инициатором разработки спецификации требований, после чего он обсуждает проект документа по отдельности с другими правообладателями. По результатам обсуждений в текст документа вносятся изменения. Обсуждение введется до тех пор, пока не будет сформирован признаваемый разными правообладателями проект до документа, либо не будет принято решение о прекращении переговоров из-за невозможности выработать приемлемую для всех версию документа. Описанной процедуре ставится в соответствие граф состояний, представленный на рисунке 3.

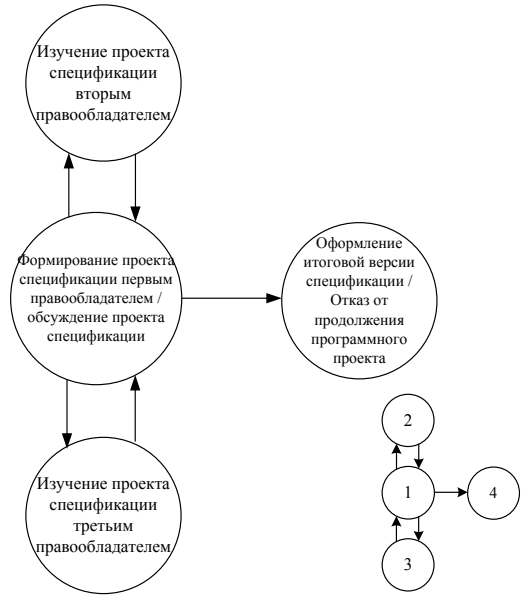


Рисунок 3 – Граф состояний для процедуры проектирования спецификаций требований. «Вариант 3»

*Вариант 4***.** Один из правообладателей готовит проект спецификации требований, который последовательно поступает к другим правообладателям. Предложения по внесению изменений в спецификацию требований правообладатели отражают в листе согласований, прилагаемом к проекту спецификации. После изучения спецификации всеми правообладателями, она возвращается к разработчику. После изучения предложений, автор проекта спецификации вносит в нее изменения и вновь направляет его на изучение другим правообладателям и т. д. Описанной процедуре соответствует граф состояний, представленный на рисунке 4.

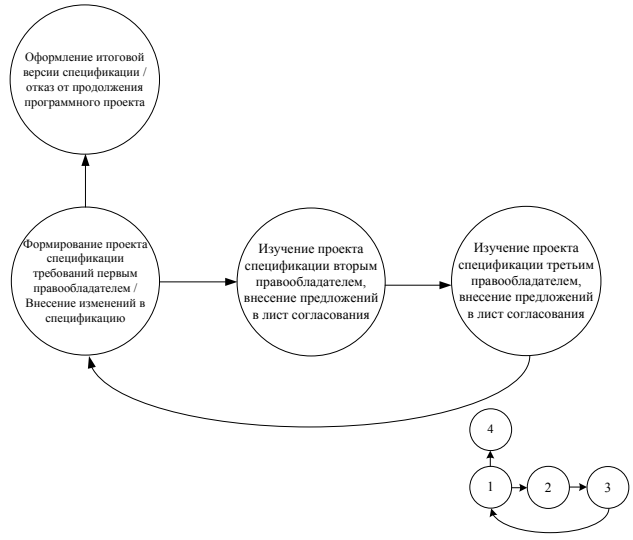


Рисунок 4 – Граф состояний для процедуры проектирования спецификаций требований «Вариант 4»

Целью анализа сложности является получение ответов на следующие вопросы:

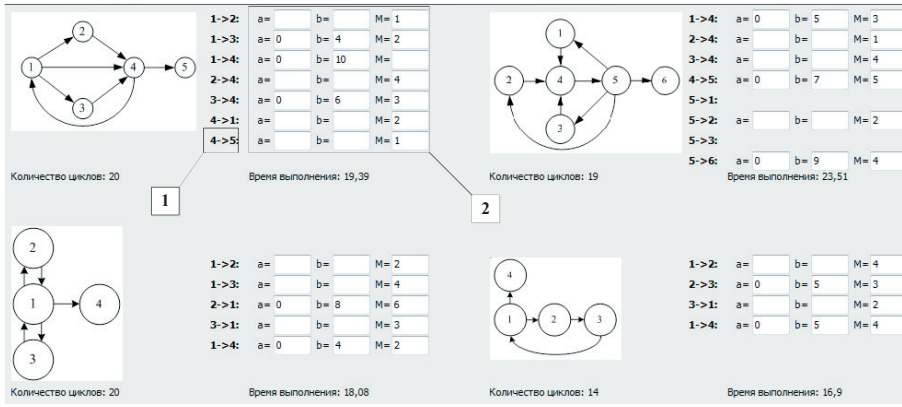
как соотносятся характеристики сложности различных процедур при одинаковом числе правообладателей;

как влияет вовлечение в проект дополнительных правообладателей на характеристику сложности процедур (устойчивость структурной схемы).

В качестве подхода к решению задачи оценивания динамических характеристик к формированию требований предлагается использовать имитационное моделирование. В основе этого подхода лежат типовые формы оценок законов распределения случайных величин, описанные в [9, 10]. При этом полагается, что границы диапазонов времени перехода в разные состояния $[a_i, b_i]$, а также ожидаемое время перехода $M_i[t]$ меняются в зависимости от номера итерации прохождения согласования. Результат моделирования представлен на рисунке 5.

При использовании имитационного моделирования можно получить следующие характеристики:

- количество циклов;
- время выполнения;
- вероятность завершения формирования требований в заданный момент времени.



1 – $i \rightarrow j$, переход из i-ой вершины в j-ую;

2 – область для ввода оценок времени для перехода из i-ой вершины в j-ую, где a – оптимистическая оценка, b – пессимистическая оценка, M – вероятная оценка времени

Рисунок 5 – Имитационное моделирование для рассматриваемых 4-х схем формирования требований

Представленные модели временного оценивания процедуры формирования требований к программному продукту позволяют построить динамические модели процедур формирования требований. Это дает возможность перейти к управлению программными проектами на основе прогнозных данных.

3 Разработка онтологии поддержки принятия решений

Одним из проявлений сложности организационно-технических систем является наличие разных групп правообладателей. Разные правообладатели обеспечивают решение различных задач, связанных с управлением сложными организационно-техническими системами, и выдвигают различные пожелания к характеристикам программной системы. Следует подчеркнуть, что часто эти пожелания по своему смыслу являются противоречивыми.

У каждого из правообладателей программного продукта и привлеченных экспертов имеется свой специфический научный словарь. Некоторые термины используются в нескольких дисциплинах со сходными, но не идентичными значениями, существуют синонимы, антони-

мы, омонимы. Поэтому крайне актуальным является решение проблемы представления естественно-языковой информации в машинно-интерпретируемом виде.

В рамках оказания интеллектуальной поддержки принятия коллективных решений существует необходимость в разработке унифицированной, детальной и непротиворечивой терминологии, которую можно использовать в различных формальных контекстах и приложениях. Онтология является удобным способом создания такой терминологии с учетом контекста предметной области. Онтология учитывает парадигматические отношения понятий, независимые от контекста решения задачи, и правила формирования переменных синтагматических отношений понятий, возникающих в некотором контексте решения задачи [11]. Онтология позволяет систематизировать знания на основе многоаспектной таксономии. Она позволяет реализовать метамодельную функциональность для конструирования: снабжает необходимыми понятиями, отношениями и ограничениями, которые используются как строительные блоки для построения конкретной модели решения задачи.

На рисунке 6 представлен фрагмент онтологии поддержки принятия решений при управлении программными проектами. Разработанная онтология содержит понятия, характерные для рассматриваемой предметной области управления программными проектами, структурированные в соответствии с иерархией, установленной для конкретного объекта. Она включает в себя такие понятия как «программный проект», «требование», «участник команды проекта» и т.п.

Кроме того в онтологии отражены описанные выше процедуры коллективного принятия решений в процессе формирования требований к программному продукту. Задача управления требованиями включена в онтологию как одна из задач организационного управления программными проектами. Для каждой из задач формирования требований в соответствии с описанными выше вариантами приведена модель формирования требований.

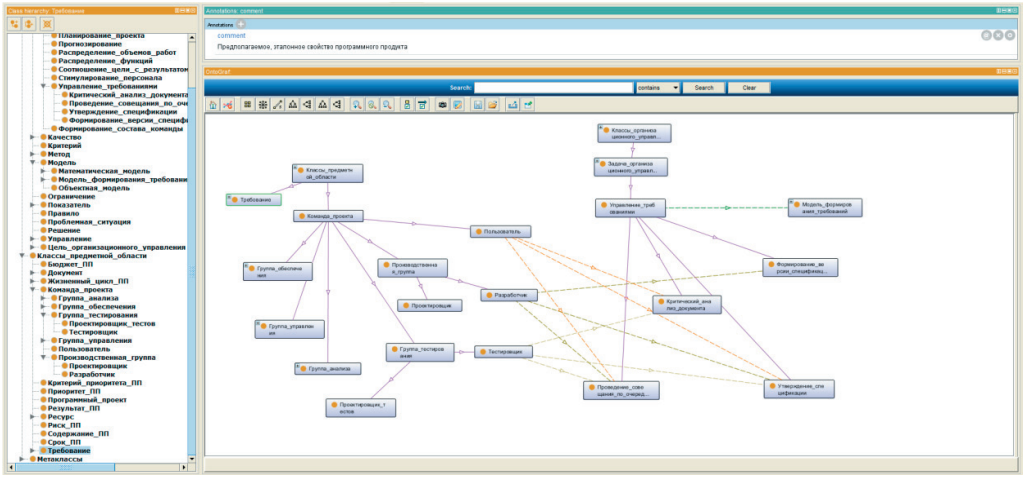


Рисунок 6 – Фрагмент онтологии поддержки принятия решений

Описание онтологии произведено на языке *OWL DL* (*Ontology Web Language based on Description Logic*). Язык *OWL DL* в соответствии с возможностями дескриптивной логики, позволяет задавать ограничения на использование классов и их свойств, а также позволяет описывать различные характеристики классов и их свойств, которые обычно задаются как разного рода ограничения на структуру связей между своими экземплярами. Эти ограничения выражаются в виде предопределенных соотношений, называемых *аксиомами* [12]. Аксиомы концептуальной схемы (*T-Box*) представляют описания таксономии классов, отношения обобщения, репрезентативные примеры классов. Между классами сущностей, принадлежащих к раз-

личным подсетям онтологии, устанавливаются отношения, принадлежащие к нескольким типам ассоциативных отношений: отношения агрегации, причинно-следственные отношения, отношения сходства, отношения семантического подобия. Такие отношения устанавливаются в форме аксиом, образующих ассоциативную сеть (*A-Box*). Наполненная предметная онтология может использоваться для разработки и рассматриваться как компонент базы знаний при работе с конкретной предметной областью. Кроме этого, онтология способствует повышению интеллектуальности систем управления знаниями на основе представления того, что часто остается неявным или неопределенным.

Заключение

Проводимые исследования направлены на решение актуальной задачи поддержки принятия коллективных решений при формировании требований к программному продукту. Проведенный анализ предметной области показал, что построение эффективной системы требований во многом влияет на качество получаемого программного продукта.

Подробно рассмотрены некоторые из возможных процедур формирования требований к программному продукту и проекту. Ввиду того, что у каждого из правообладателей программного продукта и привлеченных экспертов имеется свой специфический научный словарь, существует необходимость в разработке унифицированной, детальной и непротиворечивой терминологии. В рамках оказания интеллектуальной поддержки принятия коллективных решений разработана онтология поддержки принятия решений, которая является удобным способом создания такой терминологии с учетом контекста предметной области.

Благодарности

Работа выполнена в соответствии с грантом РФФИ 14-08-97023: «Интеллектуальная поддержка принятия решений при управлении инновационными проектами на основе обработки знаний и математического моделирования».

Список литературы

[1] Люгер Дж. Искусственный интеллект: стратегии методы решения сложных проблем: Пер. с англ. / Люгер Дж. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 864 с.
[2] Петровский А. Б. Теория принятия решений: учебник для студ. высш. учеб. заведени / А.Б. Петровский. – ИМ.: Издательский центр «Академия», 2009. – 400 с.
[3] Виттих, В. А. Организация сложных систем / В. А. Виттих. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2010. – 66 с.
[4] Bourne, L. Project Relationships and Stakeholder CircleTM / L. Bourne // PMI Research Conference, 2006.
[5] Беркун, С. Искусство управления IT-проектами / С. Беркун. – СПб.: Питер, 2007. – 400 с.
[6] Йордан, Э. Путь камикадзе. Как разработчику программного обеспечения выжить в безнадежном проекте / Э. Йордан. – М.: ЛОРИ, 2000. – 255 с.
[7] ESA software engineering standards, 1991.
[8] System Engineering for Intelligent Transportation Systems // An introduction for Transportation Professionals. January 2007. – 109 p.
[9] Гвоздев, В. Е. Вероятностное оценивание реализуемости требований к программной системе / В. Е. Гвоздев, В. Н. Мукасеева, Н. И. Ровнейко // Вестник УГАТУ, 2012. №3. С. 153-158.
[10] Гвоздев, В. Е. Информационная поддержка анализа требований к программным проектам и продуктам на основе мер неопределенности / В. Е. Гвоздев, Н. И. Ровнейко // Управление проектами и программами, 2013. №3. С.198-217.
[11] Смирнов С. В. Онтологический анализ предметных областей моделирования / Смирнов С.В. // Известия Самарского научного центра РАН. 2001. – Т.3. – № 1. – С. 62 – 70.
[12] Spinning the Semantic Web. Bringing the World Wide Web to Its Full Potential. Edited by Dieter Fensel, James A. Hendler, Henry Lieberman and Wolfgang Wahlster. Foreword by Tim Berners-Lee. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2003, 503 pp.

О КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЕ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ

Н.В. Коплярова, Н.А. Сергеева, В.И. Орлов, В.В. Федосов

Сибирский Федеральный университет
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79
тел: +7 (913) 170-56-62
Сибирский государственный аэрокосмический университет
660037, Красноярск, пр.Красноярский Рабочий 31, Россия

Ключевые слова: *диагоностика, группировка данных, кластер, электорадиоизделие*

Abstract
The task of modeling and diagnostics (estimation of quality) of various electronic, electromechanical and electromagnetic components (EEE components) is considered. In this case, the main purpose is to except of penetration of defective and potentially unreliable EEE components to board equipment that can lead to the failure of a communication satellite trunk. It explains the relevance of researches the question of improving the quality of their diagnostics.

Введение

Исследуется задача автоматической классификации электрорадиоизделий по данным измерения их качества и анализа полученных результатов. Группировка реальных данных представляет собой непростую задачу, так как неизвестно истинное разделение объектов. Во многих случаях требуется знание о том, насколько обоснованно разделение имеющегося набора данных на классы, а также состав и численность каждого из них. В этой связи представляется актуальной разработка алгоритмов группировки, когда число классов априори неизвестно.

Основными проблемами при решении задачи классификации является собственно сама классификация, а также оценка результатов группировки данных. Итог разделения на классы представляется в виде набора элементов выборки (изделий) с указанием того, к какому классу принадлежит каждый элемент и центры классов. При этом результат считается хорошим, когда для полученных классов выполняется гипотеза компактности. То есть расстояние между классами должно быть достаточно большое и центры классов выделяются явно. Однако в данном случае все зависит от качества выборки и природы данных. Часто значения переменных в выборке не могут быть явно разделены на группы по некоторым параметрам. Известные алгоритмы классификации дают разные результаты[1].

1 Задача классификации

Пусть имеется совокупность некоторых объектов O1, O2,..,Os, свойства которых определены в пространстве признаков. Требуется разбить их на группы объектов, в некотором смысле близких между собой. Информация об объектах задана в виде матрицы m×n (m – количество входных параметров (признаков), s – объем выборки изделий). Таким образом, задача классификации заключается в разбиении пространства признаков на непересекающиеся области.

Каждый элемент выборки (объект) характеризуется определенными значениями вектора параметров $v = (v_1,...,v_m)$, на основании которых осуществляется диагностика (объект может быть отнесен к одному из классов V_1 или V_2). Типичным для задач диагностики является наличие «облачной структуры» в пространстве признаков, определяющих тот или иной класс (например, удовлетворительный, среднего качества и высокого качества). Задача диагностики

рассматривается как задача распознавания образов и сводится к построению решающего правила на основе имеющейся обучающей выборки $\left\{\overset{\rho}{v}_S=(v_1,...,v_S),\overset{\nu}{U}_S\right\}$, где $\overset{\nu}{U}_S$ указания учителя о принадлежности к классам V_1 или V_2, s – объем выборки.

При этом, количество классов качества может быть различным, но независимо от их числа обязательно присутствуют области перемешивания представителей соседних классов (V_3), что приводит к необходимости решения задачи распознавания образов в вероятностной постановке[2]. Это порождает трехальтернативную задачу диагностики изделий [2]. Третий класс определяет некоторую пограничную область между классами, то есть подобласть, в которой имеет место перемешивание изделий различных классов.

Распознавание образов без учителя (самообучение) – это обучение без каких-либо указаний учителя о правильности или неправильности реакции системы в различных условиях[3]. Предположим, что множество объектов X состоит из нескольких непересекающихся подмножеств X_k, ($k=\overline{1,l}$), соответствующих различным классам объектов, характеризуемых векторами $\bar{x}\in X$. Поскольку объект $\bar{x}\in X$ появляется в том или ином множестве X_k ($k=\overline{1,l}$) случайно, то естественно рассматривать вероятность появления объекта $\bar{x}$ в классе X_k,(обозначим ее P_k) и условную плотность вероятности вектора $\bar{x}$ внутри соответствующего класса X_k , $p_k(x)=P(x/k), k=\overline{1,l}$.

В этом случае максимумы плотностей вероятностей $P_k(x)$, находятся над «центрами» классов, соответствующих подмножествам X_k. Задача самообучения часто сводится к восстановлению совместной плотности вероятности $P(x)$ и определению по ней «центров», а затем и границ классов [3]. Так для случая $\bar{x}=(x_1,x_2)$ на рисунке 1 представлен, возможный вид плотности вероятности $P(x)$.

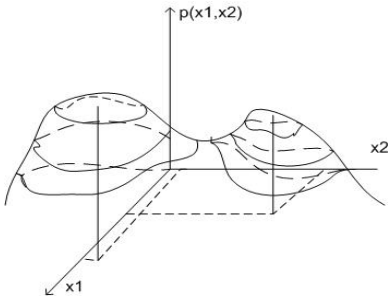


Рисунок 1 - Плотность распределения вероятности

На Рисунке 1 показана плотность вероятности $P(x)$, имеющая два максимума, а следовательно, и два класса. Центрами классов естественно считать координаты максимумов (моды) распределения $(x_1(k),x_2(k)),k=1,2$.

Далее рассматривается алгоритм, предлагаемый для группировки данных в случае, когда исходное число классов неизвестно.

2 Алгоритм группировки данных

Пусть дана выборка наблюдений $\left\{x_i,i=\overline{1,s}\right\}$ многомерной переменной $\bar{x}\in R^m$, (m – размерность *x),* соответствующая характеристикам некоторых реальных объектов. Необходимо разделить имеющуюся выборку наблюдений на группы изделий (классы), в некотором смысле близких между собой по характеристикам. Количество таких классов неизвестно. Далее описывается предлагаемый алгоритм классификации, включающий следующие основные шаги:

- Находятся расстояния между всеми точками выборки наблюдений. Расстояние $r(x_i,x_j)$ между двумя многомерными точками $\bar{x}_i$ и $\bar{x}_j$ вычисляется следующим образом:

(1) $r(\bar{x}_i, \bar{x}_j) = \sum_{q=1}^{m} \left| x_i^q - x_j^q \right|$.

- Находятся точки, находящиеся на относительно большом расстоянии друг от друга. Здесь в качестве радиуса, определяющего «дальность» принимается среднее значение расстояния между всеми точками.

(2) $r_{mean} = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=i}^{m} r(\bar{x}_i, \bar{x}_j)$.

- Из имеющейся таблицы расстояний выбирается массив, состоящий из n элементов: $g = \{r[i] / r_{i,j} > r_{mean}\}, i = 1, n$ таким образом, чтобы этот массив содержал пары точек, расстояние между которыми наибольшее. Далее предполагается, что выбранные элементы принадлежат различным классам.
- На основании анализа массива g определяется число классов и центры масс (x^j) выделенных классов. Массив разделяется на группы в соответствии с анализом значений расстояний между его элементами.
- Находятся все точки, удовлетворяющие условию $r(x^*, x) < \delta_1$, где δ_1 – задаваемый параметр. Предполагается, что такие точки лежат в одном классе с начальной точкой x^*.
- Выделенные точки объявляются классом и исключаются из выборки наблюдений.
- Ниже будут рассмотрены результаты группировки модельных и реальных данных, которая была проведена с применением вышеописанного алгоритма.

3 Обработка модельных данных

На первом этапе анализа результатов работы алгоритма рассмотрим данные, полученные методом генерации при заданных параметрах выборки (исследователь задает количество классов, объем классов, центры масс и дисперсии переменных). Особенностью такой выборки является то, что истинное разделение ее на группы известно, таким образом, можно легко оценить качество классификации. Для наглядности рассмотрим случай, когда каждый элемент выборки представляет собой двумерную величину. Рассмотрим случай близкого расположения классов. Статистические характеристики модельных классов приведены в таблице.

Таблица 1 – Статистические характеристики выборки

Значения центров классов	Класс 1	Класс 2	Класс 3
x1	2	1	2
x2	2.5	3.2	3.5
Дисперсия	0.35	0.23	0.34

Результаты генерации выборки представлены на рисунке 2.

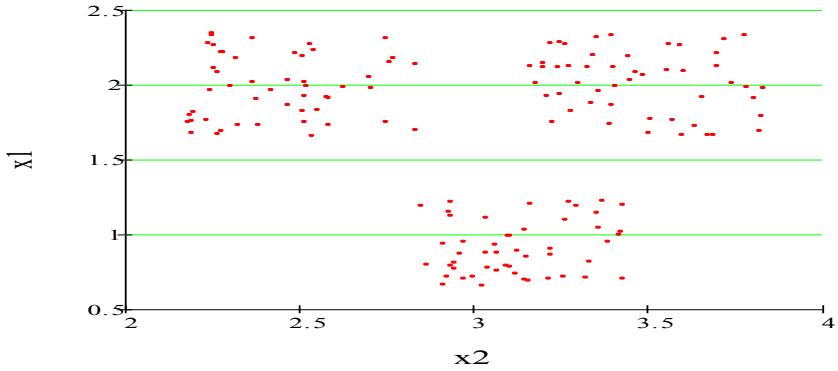


Рисунок 2 - Графическое представление сгенерированной выборки

Параметр δ=0.8. Результаты классификации представлены в таблице.

Таблица 2 – Параметры полученных классов

Оценка центров классов	Класс 1	Класс 2	Класс 3
x1	2	1	2
x2	2.5	3.2	3.5

Классификация в данном случае проведена безошибочно. Таким образом, можно сделать вывод о том, что алгоритм достаточно хорошо справляется с задачей даже в случае, когда классы расположены в пространстве относительно близко.

4 Обработка данных испытаний ЭРИ

В качестве примера рассматривается классификация электрорадиоизделий. Космические аппараты представляют собой сложные технические системы. Бортовая аппаратура в космическом пространстве не подлежит ремонту, поэтому для эффективного функционирования необходимо, чтобы ее надежность была максимальной. Требуемый уровень надежности обеспечивается за счет различных факторов, главным из которых является использование высоконадежных электронных компонентов. Космический аппарат содержит от 100 до 200 тыс. элементов электронно-компонентной базы (ЭКБ). К ним относятся микросхемы, транзисторы, диоды, конденсаторы, реле, резисторы и т. д.

Таким образом, одной из основных задач современной космической отрасли является комплектация бортовой аппаратуры КА высоконадежной ЭКБ. В первую очередь следует предотвратить попадание в аппаратуру продукции, которая не удовлетворяет требованиям надежности. В рамках решения этой проблемы необходимо обеспечить закупку ЭКБ у проверенных поставщиков, а также проведение входного контроля (ВК), дополнительных отбраковочных испытаний (ДОИ) и разрушающего физического анализа (РФА) ЭКБ[4].

Далее представлены результаты численных расчетов по диагностике ЭРИ по реальным данным, полученным при измерении параметров транзисторов на ОАО «ИТЦ НПО ПМ». Рассматривались данные тестов проверки качества транзисторов 2Т866А аА0.339.431 ТУ от 2000г. Переменными, определяющими качество изделий в данном случае, являются:

Таблица 3 – Виды измерений транзистора

Переменная	Пояснение – вид испытания
x1	Обратный ток коллектора при Uк=40В Iкбо не более 2мА
x2	Обратный ток коллектора при Uк=100В Iкбо не более 3мА
x3	Обратный ток эмиттера при Uэб=4В Iкбо не более 4мА
x4	Напряжение насыщения база эмиттер при Iб=100 мА Uбн не менее 0,05В и не более 0.999В
x5	Напряжение насыщения база эмиттер при Iб=316 мА Uбн не менее 0,05В и не более 0.999В
x6	Напряжение насыщения база эмиттер при Iб=999мА Uбн не менее 0,7В и не более 1В
x7	Напряжение насыщения база эмиттер при Iб=100мА Iк=1А Uбн не менее 0,2В и не более 0,98В
x8	Напряжение насыщения база эмиттер при Iб=316мА Iк=3,16А Uбн не менее 0,3В и не более 1В
x9	Напряжение насыщения база эмиттер при Iб=999мА Iк=9,99А Uбн не менее 1В и не более 1,6В
x10	Напряжение насыщения коллектор эмиттер при Iб=10мА Iк=100мА Uкн более 0,2В
Переменная	Пояснение – вид испытания
x11	Напряжение насыщения коллектор эмиттер при Iб=100мА Iк=1мА Uкн не менее 0,01В и более 0,9В
x12	Напряжение насыщения коллектор эмиттер при Iб=316мА Iк=3,16А Uкн не менее 0,01В и более 0,9В
x13	Напряжение насыщения коллектор эмиттер при Iб=999мА Iк=9,99А Uкн не менее 0,3В и более 1,19В
x14	Статический коэффициент передачи тока при Uк=1В Iэ=10мА h21э не менее 8
x15	Статический коэффициент передачи тока при Uк=1В Iэ=3,16А h21э не менее 20 и не более 165
x16	Статический коэффициент передачи тока при Uк=1В Iэ=9,99А h21э не менее 12 и не более 90

где Iкбо – обратной ток коллектора, Iэ – ток эмиттера, Iб – ток базы, Iк – ток коллектора, Uк – напряжение коллектора, Uэб – напряжение эмиттер-база, Uбн – напряжение базы насыщения, Uкн – напряжение коллектор насыщения, h21э – статический коэффициент передачи тока. Таким образом, дана выборка из 78 элементов, каждый из которых описывает определенный транзистор, качество которого определяется путем измерения 16 параметров.

Пусть $(x_{1,},x_2,...,x_n)$ n-мерный вектор параметров, определяющий качество того или иного изделия. Тогда имеется выборка $(x_{1,i},x_{2,i},...,x_{n,i})$ (где s – объем выборки), состоящая из измерений тестовых параметров группы s изделий. Требуется на основании имеющейся информации провести классификацию имеющихся данных.

4 Результаты классификации транзисторов

Для диагностики транзисторов проведем классификацию всех имеющихся наблюдений с целью выявления групп транзисторов в пространстве диагностических показателей. Требуется собрать заданные 78 корпусов транзисторов в кластеры по 16 параметрам, характеризующим их качество[5].

Приведены результаты классификации методом кристаллизации, приведенным ранее. Согласно результатам таблицы, полученной в результате классификации, можно сказать, что для данных, включающих 78 наблюдений, оптимальным является решение, где вся выборка делится на 2 класса, соответствующих транзисторам различного качества. Получим также таблицу принадлежности каждого элемента к конкретным кластерам, в которой можно увидеть, что к первому кластеру принадлежат 35 транзисторов, а ко второму – 43. Ниже приведены средние значение переменных для каждого кластера.

Таблица 4 – Средние значения центров классов

Класс / Признак	Класс 1	Класс 2
x_1	0,0040	0,0040
x_2	0,0404	0,0603
x_3	0,0008	0,0007
x_4	0,7065	0,7063
x_5	0,7568	0,7576
x_6	0,8322	0,8346
x_7	0,7560	0,7613
x_8	0,8837	0,8940
x_9	1,2403	1,2615
x_{10}	0,0359	0,0520
Признак	Класс 1	Класс 2
x_{11}	0,1056	0,1082
x_{12}	0,2571	0,2531
x_{13}	0,6890	0,6858
x_{14}	45,9140	26,1286
x_{15}	72,4023	41,4343
x_{16}	50,0600	32,2189

В результате предварительного анализа параметров полученных групп, можно сказать, что в наибольшей степени данное разделение по кластерам проявляется в различиях значений статического коэффициента передачи тока. При этом, чем больше коэффициент h21э (переменные x14-x16), тем, естественно, больше усиление входного сигнала. Таким образом, транзисторы разделены на группы, где в первую группу попали более качественные транзисторы (с меньшим значением Iкбо (что говорит об устойчивости транзистора в работе) и большими усилительными свойствами).

Таким образом, выборки данных измерений качества транзисторов были разделены на классы, которые отличаются различными значениями большинства параметров, что может соответствовать различным уровням качества рассматриваемых изделий (транзисторов). Такое разделение на группы объясняется тем, что в данной выборке содержались транзисторы, принадлежащие разным партиям изготовления[6]. В соответствии с этим элементы имеют различные значения всех параметров, что связано с физическими условиями изготовления партии, а также качеством и параметрами используемого для изготовления материала.

Заключение

При анализе различных реальных данных часто возникает необходимость в задаче группировки данных, что приводит к появлению кластеров в пространстве параметров, характеризующих качество изделия. В данном примере в классе годных изделий в результате диагностических испытаний транзисторов явно выделяются две группы, которые условно можно назвать «хорошими» и «очень хорошими». Исходя из этого, появляется возможность изготавливать ЭРИ того или иного заданного качества. Предложен алгоритм решения задачи кластеризации, который не требует знания количества классов. Полученные результаты могут быть ис-

пользованы для создания моделей «реальности», то есть генерации данных, которые должны быть максимально подобными исследуемой выборке. На основании анализа результатов модельных и реальных данных могут быть сделаны выводы об обоснованности и качестве проведенной классификации. Развитие настоящей работы может привести к решению проблемы оптимизации технологического процесса изготовления ЭРИ на заводах - изготовителях.

Список литературы

[1] Загоруйко Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск : Изд-во Ин-та математики, 1999. 270 с.

[2] Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Процессы // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 3 (29). С. 4–9.

[3] Цыпкин Я. З. Основы теории обучающихся систем. М. : Наука, 1970. 252 с.

[4] Данилин Н. С. Диагностика и контроль качества изделий цифровой микроэлектроники. М. : Издательство стандартов. 1991. 176 с.

[5] Коплярова Н.В., Орлов В.И., Сергеева Н.А., Федосов В.В. О непараметрических моделях в задаче диагностики электрорадиоизделий. Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды IX Всероссийской научно-практической конференции / Сиб. гос. индустр. ун-т, - Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2013. – 492 с. С 342-347.

[6] Орлов В.И., Сергеева Н.А. О непараметрической диагностике и управлении процессом изготовления электрорадиоизделий. / Вестник СибГАУ. 2 (48). – 2013г. с 70-75.

МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНЫХ ПРОЕКТОВ

А.И. Малахова

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия
aimalakhova@gmail.com
тел.: +7 (347) 2737835

Ключевые слова: *управление знаниями, метод, программный проект, онтология, интеллектуальная поддержка принятия решений*

Abstract

The paper considers the question of intelligence decision making support in project management based on the results of ontological analysis. For the knowledge base development the knowledge management method including operations of forming the hierarchical structure of decision support rules in ontology, transforming the determinate rules into fuzzy rules and control of matching the fuzzy rule base required properties is developed.

Введение

Управление процессом разработки программных проектов является сложной, многокритериальной задачей, решаемой в соответствии с масштабом разрабатываемых проектов и количеством и качеством функций, требуемых к выполнению разработанными программными системами. Для заказчика программной системы важна прозрачность и управляемость, а также возможность оперативного принятия решений на основе качественной информации. В связи с этим, исследования, направленные на разработку правил управления проектами на основе онтологии, являются актуальными.

Основой интеллектуальной поддержки принятия решений является база знаний, содержащая правила принятия решений. Для формирования базы знаний разработан метод управления знаниями, включающий совокупность операций по формированию иерархической структуры правил принятия решений в онтологии, преобразованию детерминированных правил в нечеткие, а также контролю соответствия базы нечетких правил требуемым свойствам (рисунок 1).

1 Формирование правил поддержки принятия решений в онтологии

В рамках предложенного метода управления знаниями в организационном управлении программными проектами одной из главных операций является классификация проблемных ситуаций, возникающих в процессе управления, и отображение множества организационных задач принятия решений в проблемных ситуациях на множество правил принятия решений.

Формирование правил принятия решений является расширением разработанной онтологической модели. Источниками для формирования правил являются:

- знания экспертов, выраженные в форме правил принятия решений;
- объектное моделирование процессов организационного управления программными проектами, включающее разработку словаря терминов основных понятий;
- суждения, содержащиеся в документах, регламентирующих управление разработкой;
- суждения, сформированные в результате интеллектуального анализа данных о процессах организационного управления;

- неявные знания, содержащиеся в прикладном программном обеспечении информационно-управляющей системы организации.

Рисунок 1 – Метод управления знаниями

Аксиомы, описывающие конкретные ситуации предметной области, и правила, описывающие каузальные отношения, сформированы в Protégé на языке SWRL. Язык формализации онтологических правил SWRL является расширением OWL-DL как в форме абстрактного синтаксиса, так и для выражения семантики теоретической модели для написания правил. Язык SWRL дополнительно поддерживает разработку правил в соответствии с принципами дескриптивной логики. При формировании условной части и заключения в правиле используются объекты онтологии OWL-DL (OWL классы сущностей и их свойства, примеры сущностей и отношения между ними).

Полученные правила записаны на языке SWRL в виде дизъюнктов Хорна (1):

(1) $Rule : C_1(?x) \wedge C_2(?y) \wedge P_1(?x,?y) \wedge C_3(?x,?z) \rightarrow C_2(?z,?y)$,

где $(C_1, C_2, C_3) \in C$, $P_1 \in P$, x, y – экземпляры или переменные, z – переменные или значения.

База знаний разрабатываемой интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР) содержит множество правил: правила контроля исполнения; правила, разрешающие или запрещающие отдельные управляющие воздействия; правила взаимодействия пользователя с ИСППР и др. В зависимости от решаемых задач правила объединены в блоки $Rules_j$: $KB = \dot{U} \{Rules_j\}$, где KB – база знаний, $Rules_j$ – j-й блок правил.

Структурирование базы знаний выполнено таким образом, чтобы отобразить множество классов проблемных ситуаций, связанных с решением организационных задач, на соответствующее множество блоков правил, что позволяет ускорить поиск решений в базе знаний.

В качестве примера в на рисунке 2 приведены правила поддержки принятия решений руководителя группы разработки при анализе работы участников процесса разработки программных проектов.

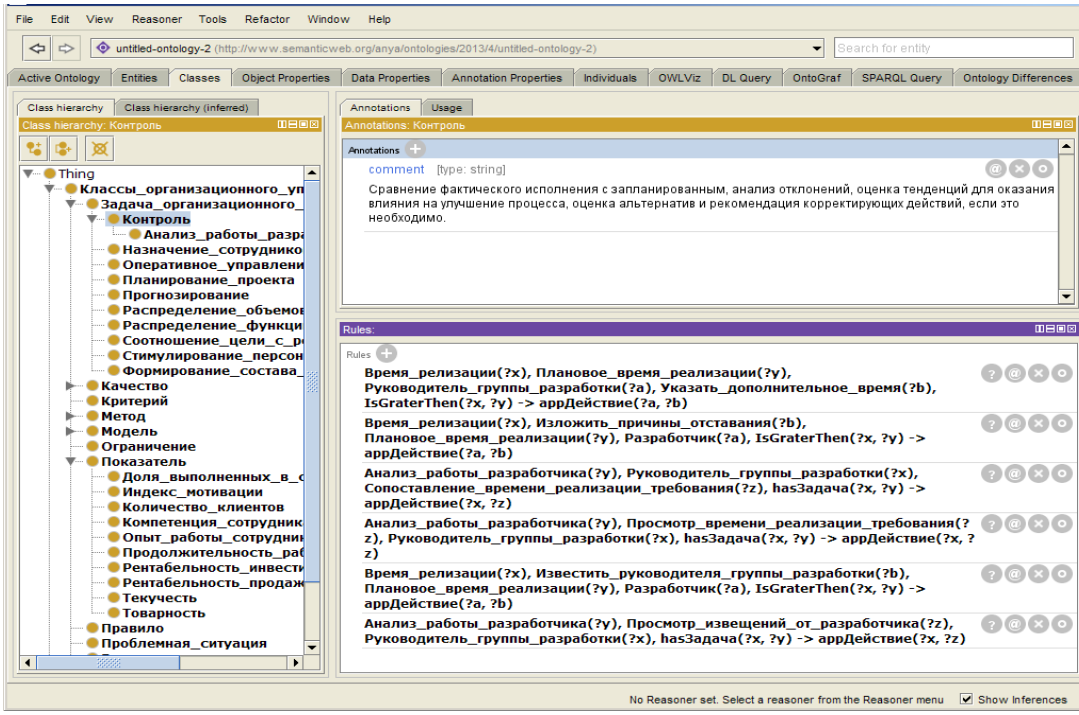


Рисунок 2 – Правила поддержки принятия решений

Семантическая целостность знаний достигается за счет представления классов объектов и отношений между ними в онтологии поддержки принятия решений на языке OWL DL, в соответствии с дескрипционной логикой. Непротиворечивость, полнота и непрерывность знаний обеспечиваются в процессе построения правил в базе знаний, а корректность взаимодействия пользователя с ИСППР контролируется в результате сопоставления решений, рекомендованных ИСППР, с решениями, принимаемыми управляющими – пользователями системы, и оценками экспертов, полученными в ходе имитационного моделирования.

Для оказания информационной поддержки принятия решений на уровне терминологии предметной области, а также поиска нужных правил в Protégé используется модуль информационного поиска, позволяющий извлекать информацию из онтологии на основе запросов к данным на языке SPARQL (SPARQL – Protocol and RDF Query Language, англ.). При помощи SPARQL-запросов можно определить связи между понятиями (классами онтологии) или определить множество понятий, удовлетворяющих определенным критериям.

Таким образом, разработанная онтология обеспечивает интеллектуальную поддержку принятия решений в условиях детерминированного управления программными проектами.

2 Проектирование системы нечеткого вывода

Вместе с тем, анализ основных задач организационного управления программными проектами показал, что принятие управленческих решений происходит в условиях неполноты информации, присутствующей при реализации программных проектов. Неполнота информации выражается в аспектах неопределённости и нечеткости.

Проблема неопределённости в той или иной степени присуща всем сложным системам. В контексте проводимых исследований неопределённость можно описать как неизвестное значение истинности высказывания [3]. Приведем основные виды неопределённостей, присущие

процессу организационного управления программными проектами, основываясь на исследованиях, проведенных в [2]:

1) неопределённость, связанная с неполнотой априорных знаний о проблеме организационного управления, на основе которых принимается решение (недостаточность теоретических знаний о предметной области организационного управления);
2) неопределённость входной информации для анализа проблемной ситуации, обусловленная низкой точностью оперативной информации, получаемой в ходе разработки программного проекта;
3) нечеткость в процессе принятия решений на разных уровнях иерархической системы управления, обусловленная наличием нечетких целей управления и неэффективностью процессов координации согласования управляющих решений, принимаемых управляющими проекта различного ранга, включая заказчика проекта;
4) неточность представления знаний на естественном языке, неоднозначность и неопределённость терминов из области разработки программных проектов, области организационного управления программными проектами, которая в большой степени преодолевается за счет проведения онтологического анализа и построения онтологии поддержки принятия решений;
5) неопределённость, неточность и противоречия, содержащиеся в стандартах, инструкциях, руководствах и других документах, регламентирующих процессы управления программными проектами.

Неопределённость процесса управления программными проектами также обуславливается наличием слабоструктурированных и неструктурированных задач. Слабоструктурированные задачи, решаемые, к примеру, на этапах планирования, мониторинга, количественного и качественного анализа программного проекта, содержат неизвестные или неизмеримые компоненты, крайне сложные для оценивания.

Неструктурированные задачи, часто решаемые на этапах разработки требований к программному проекту, идентификации рисков проекта, содержат не формализуемые процедуры, базирующиеся на неструктурированной информации, которая определяется высокой степенью неопределенности. Решение задач этого класса при принятии решений основано на информированности, квалификации, интуиции, творческом потенциале управляющего.

Значительная доля информации для принятия решений доступна в виде эвристических описаний процессов функционирования, следовательно, она может быть нечеткой и выраженной математическими зависимостями, определенными в теории нечетких множеств.

В проводимых исследованиях предложено развить представление знаний об управлении проектами от детерминированной модели представления знаний к нечеткой, на основе теории нечетких множеств Л. Заде [3].

Примерами нечетких ситуаций при принятии решений в управлении программными проектами могут служить ситуации оценки качества выполнения работ экспертами, перегрузки средств вычислительной техники и т.д. В этих ситуациях трудно бывает выделить четкую границу между допустимыми и недопустимыми значениями характеристик, и многие понятия естественного языка не могут быть формализованы с помощью классических математических понятий, так как граница между двумя классифицируемыми состояниями является нечеткой, размытой.

Знания экспертов, которые служат основой для построения правил в базе знаний, зачастую выражены нечетко в виде лингвистических переменных, словесно на естественном языке отражающих знания и опыт экспертов по управлению программными проектами.

Таким образом, можно говорить о наличии в онтологии нечеткой базы правил, строящихся на основе понятия лингвистической переменной [3]., которая может быть описана набором вида (2):

(2) $L = \langle W, T, X, G, M \rangle$,

где W – наименование лингвистической переменной; T – множество ее значений (терм-множество), представляющих собой наименования нечетких переменных, областью определения каждой из которых является множество X Множество T называется базовым терм-множеством лингвистической переменной; G – синтаксическая процедура, позволяющая оперировать элементами терм-множества T, в частности, генерировать новые термы (значения); M – семантическая процедура, позволяющая превратить каждое новое значение лингвистической переменной, образуемое процедурой G, в нечеткую переменную, т.е. сформировать соответствующее нечеткое множество.

В качестве примера лингвистических переменных можно привести: качество выполнения работы (высокое, выше среднего, среднее, ниже среднего, низкое); опыт работы сотрудника (большой, средний, малый; достаточный, недостаточный) и т.п.

В соответствии с принципами менеджмента знаний [1] сформированы следующие требования к разрабатываемой базе знаний: семантическая целостность знаний; непротиворечивость, полнота и непрерывность знаний; корректность взаимодействия пользователя с интеллектуальной системой поддержки принятия решений.

Нечеткая система формирования решения построена на нечетких правилах. Правила нечеткого управления, будучи условными высказываниями типа «Если - То», представляют нечеткую импликацию (3):

(3) B_i : Если x_1 есть A_1^i и x_2 есть A_2^i и … и x_n есть A_n^i то y_i есть B_i ,

Здесь A_i , B_i – это лингвистические значения, идентифицированные нечетким способом через соответствующие функции принадлежности $\mu_A(x_i)$ и $\mu_B(y_i)$ для переменных x и y.

Для формализации знаний в условиях неопределенности применена модель нечеткого вывода, в основе которой содержится нечеткая база знаний с правилами нечеткого управления. Совокупность условий и выводов в нечеткой базе знаний определяет продукционное нечеткое правило (*fuzzy rule*) в модели *Takagi-Sugeno-Kang* (*TSK*) [3].

Для систем с n входами и одним выходом множество высказываний, представляющих знания предметной области, может быть описано совокупностью *TSK* нечетких правил вида (4):

(4) R_i : Если x_1 есть A_1^i и x_2 есть A_2^i и … и x_n есть A_n^i то $y_i = f(x_i^1, \ldots, x_i^n)$,

где R_i – i-е правило (i=1,2,...,K); x_j – (j=1,2,...,n) – входные переменные; A_j^i – нечеткие подмножества, определенные при помощи кусочно-линейных функций принадлежности (треугольных, трапециевидных или гауссовых); y_i – выход i-го правила.

ИСППР разрабатывается для поддержки принятия решений в весьма сложной предметной области организационного управления проектами, для описания которой требуется значительное количество правил. В сложных системах, состояние которых характеризуется большим количеством признаков, возникает проблема обеспечения полноты базы знаний. Следовательно, количество правил увеличивается экспоненциально с увеличением количества входных переменных, что приводит к увеличению времени логического вывода решения. База знаний, содержащая большое количество правил, сложна в восприятии, редактировании и использовании. Но процесс принятия решений требует, тем не менее, полного осмысления проблемной ситуации. Это противоречие разрешается путем построения иерархической базы знаний [2]. Подобный подход отвечает иерархической структуре процесса управления программными проектами. Адекватным средством моделирования рассматриваемой структуры является нечеткая иерархическая система. Декомпозиция базы правил производится в соответствии с иерархией объектов, установленной в результате онтологического анализа. Таким образом, каждое правило включает ограниченное количество входных переменных. Выход модуля базы знаний i-го уровня является входом модуля базы знаний (i+1) уровня (рисунок 3).

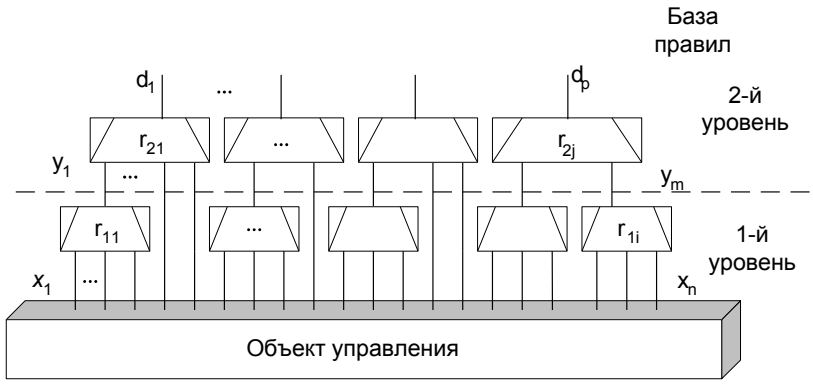


Рисунок 3– Иерархия правил управления в базе знаний

Задачей правил первого уровня является оценка нарушения границы области допустимых значений по отдельным переменным состояния, наиболее полно характеризующим классы проблемных ситуаций. Правила второго уровня определяют управленческие решения или действия, рекомендуемые для данной проблемной ситуации.

Нечеткое моделирование представленных правил осуществляется в среде *MATLAB* при помощи пакета Fuzzy Logic Toolbox, в котором реализованы функции нечеткой логики и нечеткого вывода.

Для каждого из оцениваемых параметров в Fuzzy Logic Toolbox была построена система нечеткого вывода типа Fuzzy Inference System (FIS) по методу Сугэно. Для обеспечения полноты базы правил в качестве функции принадлежности была взята гауссовская функция принадлежности (гауссиана) типа (5):

$$\mu_A(x_j) = e^{\frac{-(x_j - a_j)^2}{2b_j^2}}, \quad (5)$$

Для общего анализа разработанной нечеткой модели также может оказаться полезной визуализация соответствующей поверхности нечеткого вывода, реализуемая в программе просмотра поверхности системы нечеткого вывода. Полученная поверхность позволяет проанализировать зависимость значений выходной переменной от отдельных входных переменных. Для удобства поиска решений в системе нечеткого вывода в среде *MATLAB* был разработан интерфейс, посредством которого возможен ввод значений входных переменных и получение значений выходных переменных для соответствующих блоков правил, а также просмотра поверхности нечеткого вывода (рисунок 4).

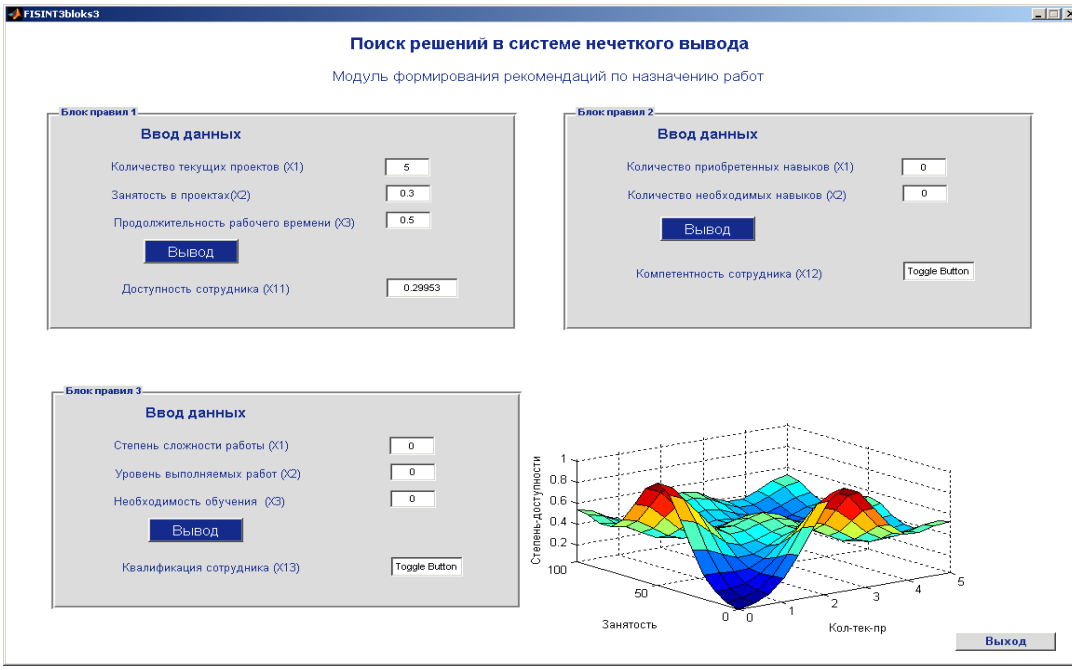


Рисунок 4 – Поиск решений в системе нечеткого вывода

Проанализировав полученную поверхность нечеткого вывода, можно сделать вывод о том, что она отвечает экспертным представлениям в рассматриваемой предметной области. Однако описанный выше процесс формирования правил основан только на знаниях экспертов. Для большей объективности правил проведено обучение параметров функций принадлежности входных и выходной переменной с применением нейро-нечеткой адаптивной сети ANFIS в среде *MATLAB*. В результате обучения сформированы новые правила гибридной системы нечеткого вывода.

Заключение

В выполняемых исследованиях был предложен метод управления знаниями при разработке программных проектов, включающий совокупность операций по формированию иерархической структуры правил принятия решений в онтологии, преобразованию детерминированных правил в нечеткие, а также контролю соответствия базы нечетких правил требуемым свойствам.

В соответствии с предложенным подходом были разработаны правила поддержки принятия решений в онтологии, которые обеспечивают интеллектуальную поддержку принятия решений в условиях детерминированного управления программными проектами.

В рамках проектирования системы нечеткого вывода в среде *MATLAB* полученные правила были преобразованы в нечеткие. В соответствии с иерархией объектов, установленной в результате онтологического анализа, была построена нечеткая иерархическая база знаний. В среде *MATLAB* был разработан интерфейс, посредством которого возможен ввод значений входных переменных и получение значений выходных переменных для соответствующих блоков правил, а также просмотра поверхности нечеткого вывода. По результатам анализа полученной поверхности нечеткого вывода была произведена адаптация параметров правил с применением нейро-нечеткой сети ANFIS.

Благодарности

Работа выполнена в соответствии с грантом РФФИ 13-08-00321: «Интеллектуальное управление взаимодействием сложных процессов на основе онтологического анализа и обработки знаний в условиях неопределенности».

Список литературы

[1] ГОСТ Р 53894-2010. Менеджмент знаний. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2011. – 11 с.

[2] Бадамшин Р.А. Проблемы управления сложными динамическими объектами в проблемных ситуациях на основе знаний / Бадамшин Р.А., Ильясов Б.Г., Черняховская Л.Р. – М.: Машиностроение, 2003 – 240 с.

[3] Люгер Дж. Искусственный интеллект: стратегии методы решения сложных проблем: Пер. с англ. / Люгер Дж. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 864 с.

МЕТОД АЛЬФА-СЕЧЕНИЯ НЕСТРОГИХ ФОРМАЛЬНЫХ КОНТЕКСТОВ В АНАЛИЗЕ ФОРМАЛЬНЫХ ПОНЯТИЙ

В.П. Офицеров[1], В.С. Смирнов[2], С.В. Смирнов[2]

[1]Московский городской педагогический университет
115191, Москва, 2-й Тульский переулок, 4, Россия

[2]Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
smirnov@iccs.ru
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *анализ формальных понятий, концептуальное шкалирование, векторная логика, нестрогий формальный контекст, альфа-сечение, решетка формальных понятий*

Abstract

The paper investigates the application of multiple-valued logic in the Formal Concept Analysis (FCA). The requirement to use of such logic is caused by uncertainty and inconsistency of the initial data on a domain of interest (DI). Primary processing of these data - conceptual scaling - introduces the conceptual interrelation effect of some Basic Semantic Propositions on a DI (BSP) which has a form of "*x* object has *y* property". In the case of multiple-valued estimations of BSP-validity the specified interrelation should be taken into account at the replacement stage of non-strict Formal Context by its precise approximation. In this article we offer and prove the rational method of this stage of FCA.

Введение

Анализ формальных понятий (АФП) [1, 2] – один из теоретически хорошо обоснованных и активно развиваемых методов анализа данных, в котором отражен классический подход к понятию как к фундаментальному эпистемологическому элементу, определяемому объемом и содержанием. Имеется множество систем информационного моделирования, имеющих в своей основе или интегрирующих АФП, например: *ConExp*, *Galicia*, *ToscanaJ*, *Python FCA Tool*, *gB* [3-7] и др. Метод широко применяется в различных областях науки и техники: медицине, генетике, психологии, анализе литературных источников, реинжиниринге программного обеспечения, проектировании, организации процессов обучения и т.д. Во многом успех АФП обусловлен его пригодностью для вывода *формальных онтологий* из экспериментальных данных, представляющих предметную область (ПрО), или, проще, из данных измерения ПрО [8-11].

Исходные данные о ПрО для применения АФП организуются в *формальный контекст* (ФК) - кортеж (G^*, M, I), где G^* - эмпирическая обучающая выборка объектов ПрО, M - множество свойств объектов, фиксируемых измерительными процедурами, которыми располагает исследователь, I - матрица инцидентности «объекты-свойства», каждый элемент которой b_{ij} представляет оценку истинности *базового семантического суждения* (БСС) о ПрО: «объекту $g_i \in G^*$ присуще свойство $m_j \in M$». Классический АФП исходит из того, что $b_{ij} \in \{$**Истина**, **Ложь**$\}$. В *нечетком* АФП [12-15] $b_{ij} \in [0, 1]$. В [16] описано применение для оценки БСС истинностных значений многозначной векторной V^{TF}-логики[1], формирование соответствующего *нестрогого* ФК и его α-аппроксимации для АФП-вывода *решетки четких формальных понятий*, которая при описанных в [11, 16] предпосылках описывает онтологию ПрО.

[1] С точки зрения мощности моделирования V^{TF}-логика обобщает нечеткую логику и положения ряда оригинальных многозначных логик [17].

Предлагаемая статья продолжает исследование, начатое в [16], концентрируя внимание на двух аспектах:

- возникновении зависимости – *концептуального сопряжения* - между измеряемыми свойствами ПрО (и, следовательно, между соответствующими БСС), причиной которой является фундаментальная когнитивная процедура АФП - *концептуальное шкалирование* [1, 2];
- аппроксимации нестрогого соответствия «объекты-свойства» его четким вариантом – «*альфа-сечением*» - и появлении в альфа-сечении *неопределенностей* и *противоречий* при оценке концептуально сопряженных БСС.

1 Формирование нестрогого формального контекста и его использование для вывода решетки формальных понятий

1.1 От таблицы «объекты-свойства» к нестрогому формальному контексту

Общепринято, что базовой формой эмпирической информации о ПрО служит *таблица «объекты-свойства»* (ТОС) [18, 19]. Однако исследование генезиса нестрогого ФК показывает, что для построения такого контекста нужна более архетипическая основа, чем обычная ТОС, т.е. такие исходные данные, которые включают информацию, с необходимостью порождающую многозначные заключения об истинности БСС ПрО. Конструктивный ответ о составе подобных данных дает морфологический анализ ТОС, который вскрывает реалии накопления эмпирической информации, элиминируемые стандартной структурой ТОС: многократную проверку, вообще говоря, каждого БСС; конгруэнтность части источников свидетельств об истинности БСС; дифференциацию доверия к различным источникам данных [16].

Тем не менее, согласно [11, 16] основным условием, обеспечивающим извлечение ФК из ТОС, служит учет того обстоятельства, что всякое измерение свойства объекта может дать специальный результат **None**. Это может свидетельствовать о семантическом несоответствии исследуемого объекта и измерительной процедуры, о нахождении значения измеряемого свойства за порогами чувствительности, вне динамического диапазона средства измерений и т.п. В итоге следствием *однократного измерения* свойства m_j объекта g_i истинность соответствующего БСС оценивается значением **Ложь** при получении результата **None** и **Истина** в противоположном случае.

Классический АФП объясняет происхождение ФК несколько иначе: ТОС трактуется как *многозначный контекст* (G^*, M, V, $\boldsymbol{I}$), где G^* и M имеют уже указывавшийся смысл, V - множество значений свойств, а $\boldsymbol{I}$ - тернарное отношение между G^*, M и V ($\boldsymbol{I} \subseteq G^* \times M \times V$), определенное для *всех пар* из $G^* \times M$. Если **None** $\notin V$, то *эффект различения объектов ПрО по составу свойств*, подобный тому, что дает учет **None**-результата измерения, достигается путем выполнения когнитивной процедуры, именуемой *концептуальным шкалированием* [1, 2]. В ее основе лежит субъективное «расщепление» фактических диапазонов средств измерений с образованием новых отличительных свойств объектов ПрО, измеряемых обычно в бинарной шкале наименований [19] – см. таблицу 1. При этом важно отметить следующее:

- все новые свойства, полученные в результате концептуального шкалирования некоторого «исходного» свойства, оказываются *концептуально сопряженными* (к-сопряженными), а именно: соответствующие нововведенным свойствам БСС *совместны*, причем истинным может быть *одно и только одно* из этих к-сопряженных БСС;
- концептуальное шкалирование может быть произведено для свойства, общего лишь для *части объектов* ПрО (с целью дальнейшей детализации их описания), поэтому к-сопряженность БСС возникает *только для этих* объектов.

Описанное в [16] формирование нестрогого ФК учитывает (помимо прочего) оба очерченных выше приема фиксации неоднородности состава свойств объектов ПрО.

Таблица 1 – Пример. Концептуальная шкала для свойства «Рост» объектов-мужчин («×» - **Истина**, пробел - **Ложь**)

Рост, см	Низкий	Средний	Высокий
< 168	×		
168-175		×	
> 175			×

1.2 Альфа-сечение нестрогого формального контекста и вывод решетки формальных понятий

Согласно [16] истинность БСС в нестрогом ФК оценивается вектором ⟨*Истина*, *Ложь*⟩ (т.е. применяется многозначная логика класса V^{TF} [17]):

$b_{ij} = \langle b^{+}_{ij}, b^{-}_{ij} \rangle$; $b^{+}_{ij}, b^{-}_{ij} \in [0, 1]$,

где компонент (аспект истинности) b^{+}_{ij} - *Истина* - формируется свидетельствами, подтверждающими БСС, а компонент (аспект) b^{-}_{ij} - *Ложь* - отрицающими БСС.

По аналогии с нечеткими отношениями[2] соответствие «объекты-свойства» I нестрогого ФК как и всякое нестрогое отношение может быть разложено по четким отношениям векторного уровня $\alpha = \langle \alpha^{+}, \alpha^{-} \rangle$:

$$I = \Upsilon_{\alpha^{+}, \alpha^{-} \in [0,1]} \left\langle \alpha^{+}, \alpha^{-} \right\rangle \cdot I^{(\alpha)},$$

$$I^{(\alpha)} = (b^{(\alpha)}_{ij})_{i=1,\ldots,r;\, j=1,\ldots,s}, \quad b^{(\alpha)}_{ij} = \begin{cases} \textbf{Истина}, & \text{если } b^{+}_{ij} \geq \alpha^{+} \wedge b^{-}_{ij} \leq \alpha^{-}; \\ \textbf{Ложь} & \text{в противоположном случае.} \end{cases}$$

Каждое четкое отношение $I^{(\alpha)}$, или *альфа-сечение* нестрогого соответствия I, определяет четкий ФК в качестве *приближения*, *α-аппроксимации* исходного нестрогого ФК так, что:

- сохраняются все БСС нестрогого ФК;
- все БСС, оценка истинности которых в соответствии с отношением логического порядка, присущего логике V^{TF}, не «достигает» α - выбираемого исследователем *порога доверия к исходным данным* о ПрО, - признаются ложными, остальные считаются истинными (см. рисунок 1);
- отдельно взятое БСС с оценкой истинности $\langle b^{+}_{ij}, b^{-}_{ij} \rangle$ признается ложным, если порог доверия $\alpha = \langle \alpha^{+}, \alpha^{-} \rangle$ выбран так, что $\alpha^{+} > b^{+}_{ij}$ или $\alpha^{-} < b^{-}_{ij}$, и, напротив, истинным, когда $\alpha^{+} \leq b^{+}_{ij}$ и $\alpha^{-} \geq b^{-}_{ij}$ (см. рисунок 2).

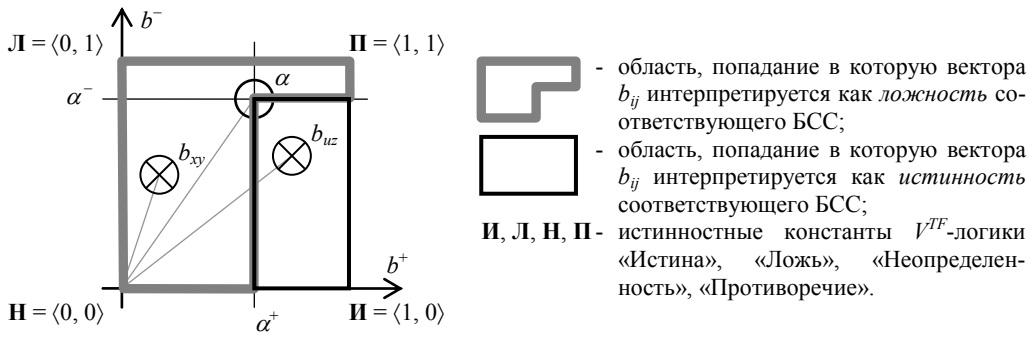
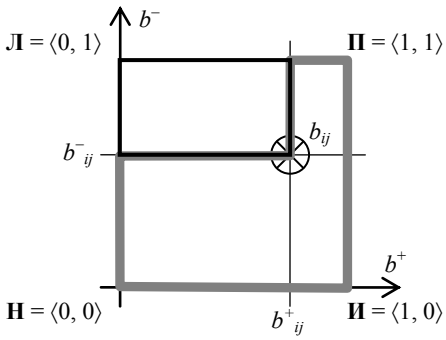
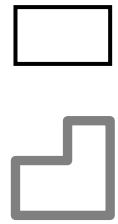


Рисунок 1 – Оценка истинности базовых семантических суждений предметной области, определяемая порогом доверия к исходным данным $\alpha = \langle \alpha^{+}, \alpha^{-} \rangle$

[2] Очевидно, что среди векторных логик V^{TF}-логики наиболее близки к нечетким логикам, что способствует поиску и развитию подобных аналогий.





- область, при выборе в которой порога доверия $\alpha = \langle \alpha^+, \alpha^- \rangle$, данное БСС с векторной оценкой истинности $\langle b^+_{ij}, b^-_{ij} \rangle$ признается *истинным*;
- область, при выборе в которой порога доверия $\alpha = \langle \alpha^+, \alpha^- \rangle$, данное БСС с векторной оценкой истинности $\langle b^+_{ij}, b^-_{ij} \rangle$ признается *ложным*.

Рисунок 2 – Области выбора порогов доверия к исходным данным $\alpha = \langle \alpha^+, \alpha^- \rangle$, определяющие приближенную оценку истинности в шкале {**Истина**, **Ложь**} для отдельно взятого базового семантического суждения предметной области, векторная оценка истинности которого равна $\langle b^+_{ij}, b^-_{ij} \rangle$

Альфа-сечение нестрогого ФК как всякий четкий ФК ПрО может быть обработан известными в АФП алгоритмами вывода *решетки формальных понятий* [1, 2]. Это означает выявление всех формальных понятий ПрО и отношения частичного порядка между ними, известного в классической логике как отношение *обобщения* между понятиями.

2 Эксперимент по формированию и обработке нестрогого формального контекста

Экспериментальное исследование проблем применения многозначной векторной логики в АФП проводилось в области портретной идентификации людей, которая играет существенную роль в криминалистике [20, 21]. Выбор этой ПрО сделан по следующим соображениям:

- с одной стороны, исходные данные, используемые при описании внешности человека, характеризуются существенной неопределенностью и противоречивостью, поскольку, как правило, поступают от других *людей* (независимых экспертов, «свидетелей»);
- с другой стороны, учение о признаках внешности человека, их материальном и идеальном отображениях - *габитология* [20] – является по существу хорошо апробированным результатом концептуального шкалирования в своей области, и номинальные значения к-сопряженных признаков (свойств) элементов внешности человека для удобства сбора информации предлагаются в форме ответов на вопросы в закрытой форме (рисунок 3).

Участниками эксперимента – *респондентами* - стали практически все сотрудники Института проблем управления сложными системами РАН, каждому из которых было предложено *быстро*, *особо не задумываясь* и используя заранее подготовленную *таблицу-анкету* охарактеризовать ряд внешних портретных признаков товарищей по работе.

Строки предложенной таблицы представляли сотрудников Института, а столбцы – запрашиваемые признаки (свойства) внешности сотрудников, сгруппированные по элементам портретной идентификации (были использованы не более 30% наиболее простых анатомических и функциональных признаков из габитологии). Каждая такая группа столбцов, по построению представляющая содержательно замкнутую совокупность к-сопряженных свойств, дополнялась двумя специальными столбцами: «Иное» и «Отказ».

- «Иное» следовало использовать в случаях, если, по мнению респондента, значение рассматриваемой характеристики у данного сотрудника отличается от приведенных вариантов ее значения[3];

[3] Тем самым формально допускалась неполнота концептуального шкалирования признаков внешности человека в габитологии. Эксперимент подтвердил необоснованность этого опасения, но в общем случае наличие такого варианта ответа при формулировке вопросов в закрытой форме обязательна.

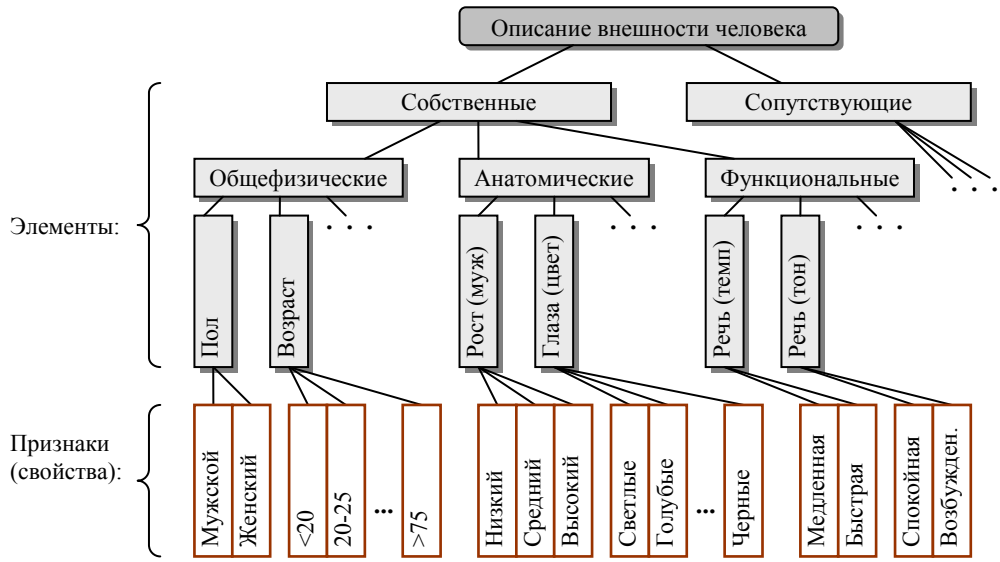


Рисунок 3 – Фрагмент классификация элементов и характеризующих их признаков в портретной идентификации человека

- «Отказ» предлагалось отметить, когда респондент по какой-либо причине не рисковал выбрать содержательный вариант ответа о некотором элементе внешности человека, или, просто, не желал освещать данный вопрос[4].

Описание респондентом внешности сотрудника Института сводилось к простановке «галочек» в соответствующей строке ТОС-анкеты. Это описание признавалось корректным, если в группе к-сопряженных свойств (включая «Иное» и «Отказ») отмечалось одно и только одно свойство. Выполнение априори задаваемых концептуальных сопряжений «второго порядка» к которым в габитологии относится, например, требование раздельного описания роста мужчин и женщин - если описывается внешность мужчины, то не должно быть отмечено ни одно свойство, характеризующее рост женщин, и наоборот, - в эксперименте не контролировалось.

К каждому сотруднику-респонденту была обращена просьба охарактеризовать не менее пяти сотрудников по его выбору. Данные собирались анонимно, но анкеты респондентов-женщин, обычно более внимательных к внешности окружающих, отмечались как заслуживающие достаточно высокой степени доверия $t_Ж \in (0, 1)$. Уровень доверия к ответам мужчин был ниже: $t_M < t_Ж$. Доверие к экспертизе сотрудников-совместителей оценивалось еще меньше: $t_C < t_M$.

Интеграция результатов проведенного опроса органично интегрировались в нестрогом ФК ПрО «Внешность сотрудников Института».

На первом этапе ТОС-анкета каждого респондента трансформировалась в локальный нестрогий ФК:

- сохранялись лишь корректно заполненные строки таблицы;
- согласно V^{TF}-логике «галочка» интерпретировалась как константа **И** = ⟨1, 0⟩, а в качестве содержания неотмеченных позиций в строке принималось значение истинности **Л** = ⟨0, 1⟩.

[4] Возможность выбора респондентом ответа «Отказ» соответствует одному из ключевых положений формирования ТОС: всякая измерительная процедура может дать специальный результат **Failure**, указывающий на *невыполнение* задачи измерений (отказ, сбой измерительного средства, воздержание при голосовании и т.п.) [16]. Вместе с тем, в рассматриваемой ТОС-анкете это положение реализовано в упрощенном варианте, когда результат **Failure** связывается с группой к-сопряженных свойств, характеризующей отдельный элемент внешности человека. Этот вариант лучше воспринимается респондентами и принципиальных искажений в формирование ТОС и ФК не вносит.

Исключение предполагал лишь случай отметки в группе к-сопряженных свойств позиции «Отказ»; тогда в качестве оценок истинности *каждого* из соответствующих к-сопряженных БСС надлежало использовать истинностную константу «*недоопределенность*» $\mathbf{O} = \langle 0.5, 0.5 \rangle$;

- исключались столбцы «Отказ» и строки, целиком заполненные константами **Л** (эти строки представляли сотрудников Института, внешность которых респондент не стал описывать);
- наконец, содержимое каждой ячейки «взвешивалось» в соответствии с приписанным респонденту уровнем доверия $t_X \in \{t_Ж, t_M, t_C\}$ путем умножения вектора истинности БСС на величину t_X. Строго говоря, это означает объединение свидетельств об истинности каждого БСС - вектора $\langle b^+_{ij}, b^-_{ij} \rangle$ - и уровня доверия к источнику БСС – вектора $\langle t_X, t_X \rangle$ - по схеме так называемого «00-композиционного совмещения» V^{TF}-логики на основе композиционного умножения согласно *t*-норме $x \bullet y = xy$ [16, 17].

На втором этапе локальные нестрогие ФК механически (в силу тождества структуры всех обрабатываемых ФК) объединялись в искомый интегрированный нестрогий ФК. При этом свидетельства о внешность одного и того же сотрудника (т.е. оценки истинности БСС из одноименных строк) совмещались по схеме «усиления-усреднения» - частного случая «11-композиционного совмещения» на основе композиционного сложения согласно *s*-норме $x \oplus y = \mathbf{min}(1, x + y)$ [16, 17].

В таблице 2 представлен *фрагмент* построенного нестрогого ФК – нестрогий ФК*, в который отобраны данные о сотрудниках, чья портретная идентификация произведена пятью и более респондентами, а из характеристик внешности оставлены лишь рост и цвет глаз.

Таблица 3 представляет альфа-сечение ФК* при пороге доверия к исходным данным $\alpha = (0.35, 0.35)$, а на рисунке 4 приведена *линейная диаграмма* [1, 2] решетки формальных понятий, выведенная из классического ФК, являющего (0.35, 0.35)-аппроксимацией нестрогого ФК*.

Таблица 2 – Фрагмент нестрогого формального контекста предметной области «Внешность сотрудников Института»

Сотрудник	Рост (мужской)			Рост (женский)			Глаза (цвет)						
	Низкий	Средний	Высокий	Низкий	Средний	Высокий	Светлые	Голубые	Серые	Зеленые	Желтые	Карие	Черные
Виттих В.А.	**.31**, .36	**.36**, .31	**0**, .68	**0**, .68	**0**, .68	**0**, .68	**.14**, .53	**.03**, .64	**.36**, .32	**.14**, .53	**.03**, .64	**.09**, .58	**.03**, .64
Смирнов С.В.	**0**, .68	**.12**, .57	**.57**, .12	**0**, .68	**0**, .68	**0**, .68	**.04**, .64	**.16**, .52	**.04**, .64	**.04**, .64	**.04**, .64	**.52**, .16	**.04**, .64
Кузнецов С.В.	**0**, .72	**.60**, .12	**.12**, .60	**0**, .72	**0**, .72	**0**, .72	**0**, .72	**0**, .72	**0**, .72	**.32**, .40	**0**, .72	**.40**, .32	**0**, .72
Скобелев О.П.	**.05**, .56	**.49**, .12	**.12**, .49	**0**, .61	**.07**, .54	**0**, .61	**.08**, .53	**.08**, .53	**.18**, .43	**.08**, .53	**.08**, .53	**.36**, .26	**.08**, .53
Боровик С.Ю.	**.08**, .64	**.31**, .40	**.40**, .31	**0**, .71	**0**, .71	**0**, .71	**.08**, .64	**.21**, .50	**.50**, .21	**.08**, .64	**.08**, .64	**.08**, .64	**.08**, .64
Андрианов М.П.	**.04**, .72	**.04**, .72	**.72**, .04	**0**, .77	**0**, .77	**0**, .77	**.19**, .58	**.16**, .61	**.46**, .31	**.04**, .72	**.04**, .72	**.04**, .72	**.04**, .72
Кутейникова М.М.	**0**, .70	**0**, .70	**0**, .70	**.06**, .64	**.29**, .41	**.41**, .29	**.14**, .56	**.18**, .52	**.44**, .26	**.06**, .64	**.06**, .64	**.06**, .64	**.06**, .64
Морозова Л.Ф.	**0**, .71	**0**, .71	**0**, .71	**0**, .71	**.54**, .17	**.17**, .54	**0**, .71	**0**, .71	**.07**, .64	**0**, .71	**0**, .71	**.54**, .17	**.10**, .61
Сергеева Н.А.	**0**, .74	**0**, .74	**0**, .74	**0**, .74	**.74**, 0	**0**, .74	**.28**, .46	**0**, .74	**.46**, .28	**0**, .74	**0**, .74	**0**, .74	**0**, .74

Таблица 3 – Альфа-сечение нестрогого формального контекста, заданного таблицей 3 при пороге доверия к исходным данным $\alpha = (0.35, 0.35)$

Сотрудник	Рост (мужской)			Рост (женский)			Глаза (цвет)						
	Низкий	Средний	Высокий	Низкий	Средний	Высокий	Светлые	Голубые	Серые	Зеленые	Желтые	Карие	Черные
Виттих В.А.		×							×				
Смирнов С.В.			×									×	
Кузнецов С.В.		×										×	
Скобелев О.П.		×										×	
Боровик С.Ю.			×						×				
Андрианов М.П.			×						×				
Кутейникова М.М.						×			×				
Морозова Л.Ф.					×							×	
Сергеева Н.А.					×				×				

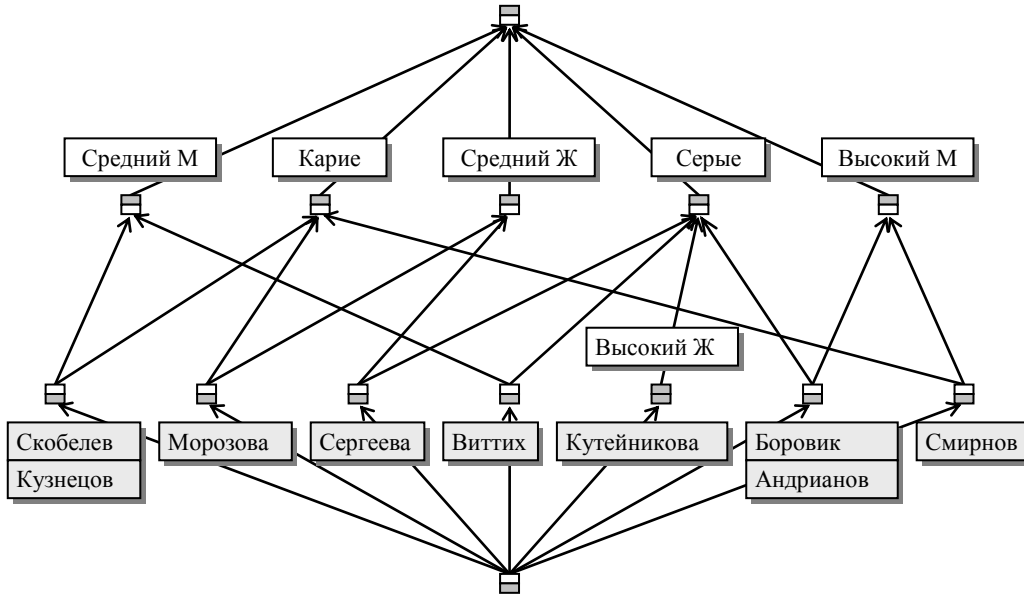


Рисунок 4 – Линейная диаграмма решетки формальных понятий, выведенных из фрагмента нестрогого формального контекста, характеризующего внешность сотрудников Института

Экспериментирование с величиной порога доверия к данным, содержащимся в нестрогом ФК с к-сопряженными свойствами, быстро убеждает, что получаемые альфа-сечения зачастую оказываются *семантически некорректными*, т.к. в них обнаруживаются нарушения необходимых и достаточных условий к-сопряженности, априори вводимых концептуальным шкалированием (см. подпункт 1.1). Например, в альфа-сечении ФК* при пороге доверия к исходным данным $\alpha = (0.3, 0.4)$ объекты «Виттих В.А.» и «Боровик С.Ю.» получают противоречивое описания роста (см. таблицу 4). В (0.4, 0.3)-сечении ФК* (таблица 5) первый из указанных объектов оказывается уже полностью неопределенным, второй – неопределенным в части роста, а описания объектов «Кузнецов С.В.» «Скобелев О.П.» и «Андрианов М.П.» становятся неопределенными в части цвета глаз.

Таблица 4 – Альфа-сечение нестрогого формального контекста, заданного таблицей 3 при пороге доверия к исходным данным $\alpha = (0.3, 0.4)$

Сотрудник	Рост (мужской)			Рост (женский)			Глаза (цвет)						
	Низкий	Средний	Высокий	Низкий	Средний	Высокий	Светлые	Голубые	Серые	Зеленые	Желтые	Карие	Черные
Виттих В.А.	×	×							×				
Смирнов С.В.			×									×	
Кузнецов С.В.		×										×	
Скобелев О.П.		×										×	
Боровик С.Ю.		×	×						×				
Андрианов М.П.			×						×				
Кутейникова М.М.						×			×				
Морозова Л.Ф.					×							×	
Сергеева Н.А.					×				×				

Таблица 5 – Альфа-сечение нестрогого формального контекста, заданного таблицей 3 при пороге доверия к исходным данным $\alpha = (0.4, 0.3)$

Сотрудник	Рост (мужской)			Рост (женский)			Глаза (цвет)						
	Низкий	Средний	Высокий	Низкий	Средний	Высокий	Светлые	Голубые	Серые	Зеленые	Желтые	Карие	Черные
Виттих В.А.													
Смирнов С.В.			×									×	
Кузнецов С.В.		×											
Скобелев О.П.		×											
Боровик С.Ю.									×				
Андрианов М.П.			×										
Кутейникова М.М.						×			×				
Морозова Л.Ф.					×							×	
Сергеева Н.А.					×				×				

Таким образом, эксперименты доказывают, что произвольное альфа-сечение нестрогого ФК с к-сопряженными свойствами представляет собой в общем случае *неопределенный* и/или *противоречивый* ФК ПрО.

3 Рациональный метод альфа-сечения нестрогого формального контекста

3.1 Область допустимых значений порога доверия к исходным данным

Теоретически вопрос о корректном альфа-сечении нестрогого ФК с к-сопряженными свойствами может быть решен на первый взгляд достаточно просто.

Пусть (G^*, M, I) – нестрогий ФК и $IR_1, \ldots, IR_l$ – множества индексов групп к-сопряженных свойств ПрО, $0 \le l \le |M|/2$, $IR_n \cap IR_m = \varnothing$ при $m \ne n$ $(m, n = 1, \ldots, l)$, $2 \le |IR_m| \le |M|$.

В альфа-сечении нестрогого ФК количество возможных вариантов определения значений соответствия «объект-свойства» в шкале {**Истина**, **Ложь**} для IR_m-группы к-сопряженных свойств равно $2^{|IR_m|}$. Из них допустимыми являются лишь $|IR_m|$ вариантов, которые определя-

ются необходимыми и достаточными условиями к-сопряженности, априори вводимыми концептуальным шкалированием (см. подпункт 1.1).

Для IR_m-группы к-сопряженных свойств, характеризующих объект $g_i \in G^*$, эти условия будут выполнены, если выбор порога доверия к исходным данным $\alpha = \langle \alpha^+, \alpha^- \rangle$ обеспечит истинность выражения

$$(1)\quad T^{(\alpha)}_{(i)IR_m} = \begin{Bmatrix} (T^{(\alpha)}_{ij_1} \wedge F^{(\alpha)}_{ij_2} \wedge F^{(\alpha)}_{ij_3} \wedge ... \wedge F^{(\alpha)}_{ij_{IR_m}}) \,\Theta \\ (F^{(\alpha)}_{ij_1} \wedge T^{(\alpha)}_{ij_2} \wedge F^{(\alpha)}_{ij_3} \wedge ... \wedge F^{(\alpha)}_{ij_{IR_m}}) \,\Theta \,... \\ (F^{(\alpha)}_{ij_1} \wedge F^{(\alpha)}_{ij_2} \wedge F^{(\alpha)}_{ij_3} \wedge ... \wedge T^{(\alpha)}_{ij_{IR_m}}) \end{Bmatrix},$$

где $T^{(\alpha)}_{ij_k} = (\alpha^+ \le b^+_{ij_k}) \wedge (\alpha^- \ge b^-_{ij_k})$, $F^{(\alpha)}_{ij_k} = (\alpha^+ > b^+_{ij_k}) \vee (\alpha^- < b^-_{ij_k})$, $k = 1,...,|IR_m|$ (см. подпункт 1.2 и рисунок 2); Θ - «разделяющая дизъюнкция».

Если объект g_i описывается несколькими к-сопряженными группами свойств – набором множеств $IR_{(i)} \subseteq \{IR_1,\ldots, IR_l\}$, - то для семантически корректного представления этого объекта в альфа-сечении выбор порога α должен дать выполнение конъюнкции

$$(2)\quad T^{(\alpha)}_{(i)} = \mathrm{I}_{\,IR_m \in IR_{(i)}} T^{(\alpha)}_{(i)IR_m}.$$

Наконец, условием корректности *всего* альфа-сечения нестрогого ФК с к-сопряженными свойствами будет выбор такого порога α, который доставит истинность конъюнкции

$$(3)\quad T^{(\alpha)} = \mathrm{I}_{\,i=1,...,|G^*|} T^{(\alpha)}_{(i)}.$$

Очевидно, что развертывание формул от (1) к (3) только сужает область $S^{(\alpha)}$ единичного квадрата (см. рисунки 1 и 2), при попадании в которую порога доверия $\alpha = \langle \alpha^+, \alpha^- \rangle$ возможно построение семантически определенного и непротиворечивого альфа-сечения нестрогого ФК с к-сопряженными свойствами. Вместе с тем структура ограничений (1)-(3) подсказывает *компромиссный путь* решения задачи корректной α-аппроксимации нестрогого ФК.

Действительно, если область $S^{(\alpha)}$ пуста, то работу с порогом доверия α можно заменить манипулированием *набором* порогов доверия к данным, описывающим *каждый объект* $g_i \in G^*$: $\alpha_{(i)} = \langle \alpha_{(i)}{}^+, \alpha_{(i)}{}^- \rangle$, - рассчитывая, что формула (2) определит непустую область $S^{(\alpha)}_{(i)}$ для выбора порога $\alpha_{(i)}$, обеспечивающего семантически корректное описание объекта g_i в альфа-сечении нестрогого ФК. Когда обнаружится, что для какого-то объекта $g_i \in G^*$ область $S^{(\alpha)}_{(i)}$ пуста, то надлежит перейти к анализу областей выбора подходящих порогов на уровне *каждой группы* $IR_m \in IR_{(i)} \subseteq \{IR_1,\ldots, IR_l\}$ к-сопряженных к свойств этого объекта: $S^{(\alpha)}_{(i)IR_m}$, - т.е. вместо работы с «объектным» порогом $\alpha_{(i)}$ оперировать порогами доверия к исходным данным для каждой такой группы свойств объекта g_i: $\alpha_{(i)IR_m} = \left\langle \alpha^+_{(i)IR_m}, \alpha^-_{(i)IR_m} \right\rangle$. И только в том случае, когда пустой окажется хотя бы одна область $S^{(\alpha)}_{(i)IR_m}$ придется констатировать, что построение семантически корректного альфа-сечения исходного нестрогого ФК невозможно, и квалифицировать этот нестрогий ФК как *недоопределенный*.

Таким образом, построение семантически корректного альфа-сечения нестрогого ФК с к-сопряженными свойствами требует от исследователя априорного знания детальной картины *допустимых областей выбора порогов доверия* к исходным данным разного уровня вплоть, вообще говоря, до каждой группы к-сопряженных свойств всех без исключения объектов выборки G^*. Эти сведения для удобства восприятия сведены в таблицу 6.

Таблица 6 – Априорные сведения, необходимые для выбора порога доверия к исходным данным и построения семантически корректного альфа-сечения нестрогого формального контекста

Условие корректного выбора порога доверия к исходным данным (номер формулы) и область их выполнения	Порог доверия к исходным данным, подлежащий выбору
(3), $S^{(\alpha)}$	$\alpha = \langle \alpha^+, \alpha^- \rangle$
(2), $S^{(\alpha)}_{(i)}$, $i = 1,...,\left\|G^*\right\|$	$\alpha_{(i)} = \left\langle \alpha^+_{(i)}, \alpha^-_{(i)} \right\rangle$, $i = 1,...,\left\|G^*\right\|$
(1), $S^{(\alpha)}_{(i)IR_m}$, $i = 1,...,\left\|G^*\right\|$, $IR_m \in IR_{(i)}$	$\alpha_{(i)IR_m} = \left\langle \alpha^+_{(i)IR_m}, \alpha^-_{(i)IR_m} \right\rangle$, $i = 1,...,\left\|G^*\right\|$, $IR_m \in IR_{(i)}$

Разумеется, определение областей выполнения условий (1)-(3) и поддержку выбора порогов доверия к исходным данным для семантически корректной α-аппроксимации нестрогого ФК с к-сопряженными свойствами можно *автоматизировать*. Но даже тогда эта операция, предполагая непосредственное участие исследователя, определенно будет противоречить «духу» решаемой задачи, лишать ценностей, которые важны при концептуальном моделировании. Вместо ожидаемого «сжатия» информационно-логической картины ПрО она наполнится потенциально весьма значительным количеством деталей, призванных зафиксировать «свободный выбор» исследователя в «многоэтажном» лабиринте возможностей настройки (см. таблицу 6), что сделает ее избыточно сложной и практически малополезной.

Выход видится в *автоматическом* построении *одного*, но в некотором смысле *рационального* альфа-сечения нестрогого ФК.

3.2 Наиболее правдоподобное альфа-сечение нестрогого формального контекста

Правдоподобие альфа-сечения нестрогого ФК будем связывать с выбором порога доверия, выделяющего *наиболее правдоподобное* суждение из всех допустимых суждений об истинности (в шкале {**Истина**, **Ложь**}) набора к-сопряженных БСС, определяемого *каждой группой* к-сопряженных свойств *у каждого объекта* исходного нестрогого ФК (см. нижнюю строку в таблице 6).

Прежде всего, для выбора таких порогов необходимо, чтобы в каждой области $S^{(\alpha)}_{(i)IR_m}$, где производится поиск одного из нужных порогов, все суждения были ранжированы.

Для ранжирования суждений в V^{TF}-логике используются отношения *эквивалентности*, *доминирования*, *правдоподобия* и *нестрогой импликации*, которые определяются соотношениями между компонентами векторных оценок истинности ⟨*Истина*, *Ложь*⟩ сопоставляемых суждений [17]. Если *рациональным* признавать выбор суждения с максимальным значением аспекта *Истина* при минимизации значения аспекта *Ложь*, то целесообразно опереться на отношение нестрогой импликации, которое *линейно упорядочивает* множество векторов истинности по правдоподобию/доминированию. Это весьма упрощает выбор рационального суждения, однако свойственный нестрогой импликации примат правдоподобия над доминированием порождает эффект «логического скачка»[5]. Для его *смягчения* (но не полного устранения) в [17] предлагается формировать предпочтения с помощью ряда *числовых показателей*, характеризующих сравниваемые суждения. В частности, рекомендуется следующий способ:

1) упорядочить суждения по *мере достоверности*, которая для суждения с оценкой истинности $\langle b^+, b^- \rangle$ определяется величиной $\mu_Д = b^+ - b^-$;
2) при равных достоверностях упорядочить суждения по *мере определенности*, вычисляемой для суждения с оценкой истинности $\langle b^+, b^- \rangle$ по формуле[6] $\mu_О = b^+ \oplus b^-$.

[5] Согласно нестрогой импликации из трех суждений с оценками истинности $\langle \alpha^+ - \delta, 0 \rangle$, $\langle \alpha^+, 1 \rangle$, $\langle \alpha^+ + \delta, 0 \rangle$ второе предпочтительнее первого, хотя первое при $\delta \to 0$ почти не отличается от лучшего – третьего (подробнее см. [17]).

[6] В качестве композиционного сложения в формуле целесообразно применить s-норму $x \oplus y = \mathbf{max}(x, y)$.

Таким образом, рациональное с позиций правдоподобия ранжирование суждений о пороге доверия к истинностным оценкам БСС из набора, индуцируемого группой к-сопряженных свойств объекта нестрогого ФК, не представит трудности. Вопрос состоит *в отыскании* всех этих суждений, т.е. эффективном анализе выражений вида (1) для выявления допустимых областей выбора порогов доверия.

Для наглядности проанализируем условие (1) графически на примере группы из *трех* к-сопряженных свойств некоторого объекта нестрогого ФК (т.е. трех к-сопряженных БСС), что, как станет ясно, вполне достаточно для необходимых обобщений.

Для упрощения записи пронумеруем рассматриваемые БСС цифрами 1, 2, 3, которые будем использовать и для идентификации компонент векторов истинности этих БСС, и для индексации оценок истинности БСС в шкале {**Истина**, **Ложь**}.

Во-первых, имеется всего один вариант соотношения компонент векторов истинности к-сопряженных БСС, устанавливающий «линейное» доминирование среди БСС (рисунок 5а).

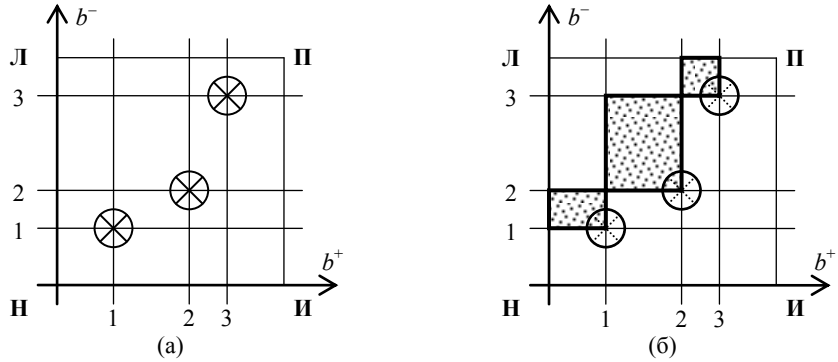


Рисунок 5 – Линейное доминирование среди базовых семантических суждений (БСС) предметной области (а) и соответствующие ему области выбора порогов доверия к исходным данным, гарантирующие допустимую оценку истинности в шкале {**Истина**, **Ложь**} для к-сопряженных БСС (б)

Формирование областей выбора порога доверия к исходным векторным оценкам истинности рассматриваемых БСС согласно условию (1) в разрезе слагаемых разделяющей дизъюнкции иллюстрирует рисунок 6. Используются обозначения рисунка 2, а области выбора порога для каждого допустимого варианта идентификации истинности к-сопряженных БСС в шкале {**Истина**, **Ложь**} выделены узором «конфетти».

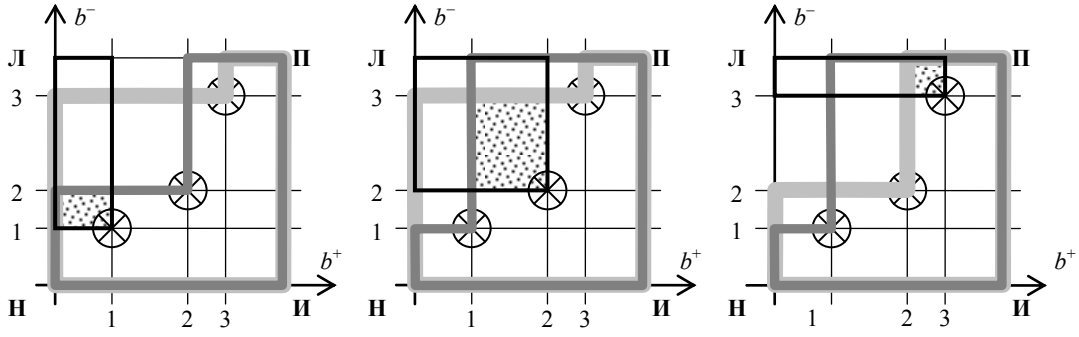


Рисунок 6 – Формирование областей выбора порога доверия к исходным данным, гарантирующих допустимые оценки истинности к-сопряженных базовых семантических суждений (БСС) предметной области в шкале {**Истина**, **Ложь**} при линейном доминировании среди БСС

На рисунке 5б представлена вся область выбора порога доверия, где каждая подобласть связана с векторной оценкой истинности одного и только одного из рассматриваемых БСС, истинность которого (и только его) при выборе порога в данной подобласти оценивается как **Истина**. Более того, эта векторная оценка и есть единственный *рациональный выбор* порога внутри связанной с ней подобласти. Следовательно, выбор порога доверия следует производить лишь *среди векторных оценок истинности рассматриваемых* БСС. Причем очевидно, что ни уменьшение, ни увеличение количества к-сопряженных БСС при сохранении среди них линейного доминирования не изменит общую картину исследуемой области выбора порога.

Во-вторых, имеется всего один вариант соотношения компонент векторов истинности к-сопряженных БСС, определяющий отсутствие доминирования среди БСС (рисунок 7а).

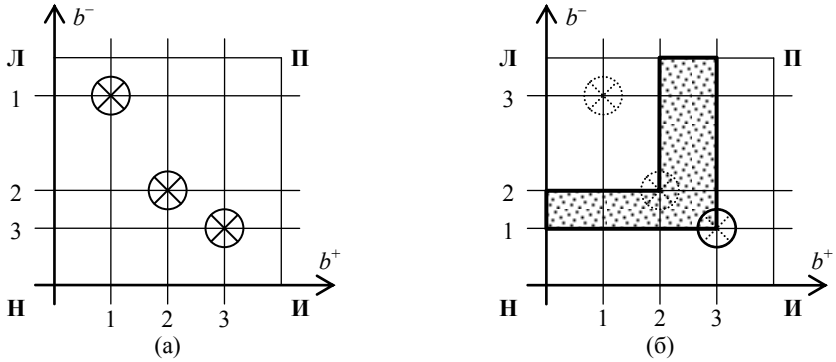


Рисунок 7 – Отсутствие доминирования среди базовых семантических суждений (БСС) предметной области (а) и соответствующая ему область выбора порогов доверия к исходным данным, гарантирующая допустимую оценку истинности в шкале {**Истина**, **Ложь**} для к-сопряженных БСС (б)

Формирование областей выбора порога доверия к исходным векторным оценкам истинности рассматриваемых БСС согласно условию (1) демонстрирует рисунок 8, а итоговую картину идентификации области выбора дает рисунок 7б, который указывает *единственную точку рационального выбора* порога доверия – *векторную оценку истинности* того из к-сопряженных БСС, которое обладает наибольшим аспектом *Истина*. Нетрудно видеть, что ни уменьшение, ни увеличение количества к-сопряженных БСС при сохранении качественного отличия рассматриваемого случая – отсутствия доминирования среди БСС - не может изменить полученного результата анализа.

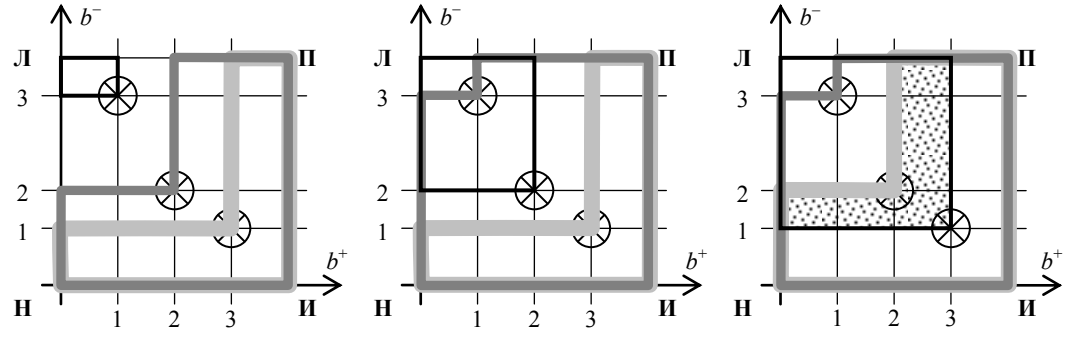


Рисунок 8 – Формирование областей выбора порога доверия к исходным данным, гарантирующих допустимые оценки истинности к-сопряженных базовых семантических суждений (БСС) предметной области в шкале {**Истина**, **Ложь**} при отсутствии доминирования среди БСС

Во-третьих, анализу подлежат все случаи соотношения компонент векторов истинности к-сопряженных БСС, когда среди БСС наблюдается неполное доминирование. Всего таких случаев для рассматриваемых трех БСС имеется четыре:

- среди двух БСС отсутствует доминирование, но они оба доминируют третье (см. рисунок 9а; на рисунке 10 показывается формирование областей выбора порога доверия для этого случая, а на рисунке 9б – результат проведенного анализа);
- среди двух БСС отсутствует доминирование, но они оба доминируются третьим (см. рисунок 11а; на рисунке 12 показывается формирование областей выбора порога доверия для этого случая, а на рисунке 11б – результат проведенного анализа);
- среди двух БСС отсутствует доминирование, но одно из них доминируют третье, а у другого с третьим доминирование отсутствует. Этот случай имеет два варианта реализации – I и II, - смотря по тому, с каким из первых двух БСС у третьего отсутствует доминирование (см. рисунки 13-16);

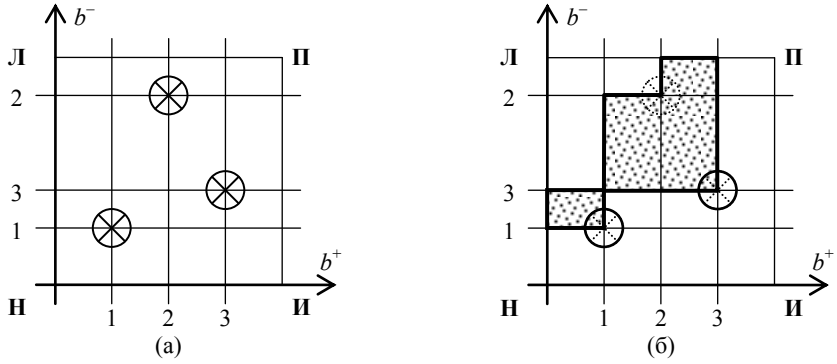


Рисунок 9 – Отсутствие доминирования среди двух базовых семантических суждений (БСС) предметной области при доминировании ими третьего БСС (а) и соответствующая этому случаю область выбора порогов доверия к исходным данным, гарантирующая допустимую оценку истинности в шкале {**Истина**, **Ложь**} для к-сопряженных БСС (б)

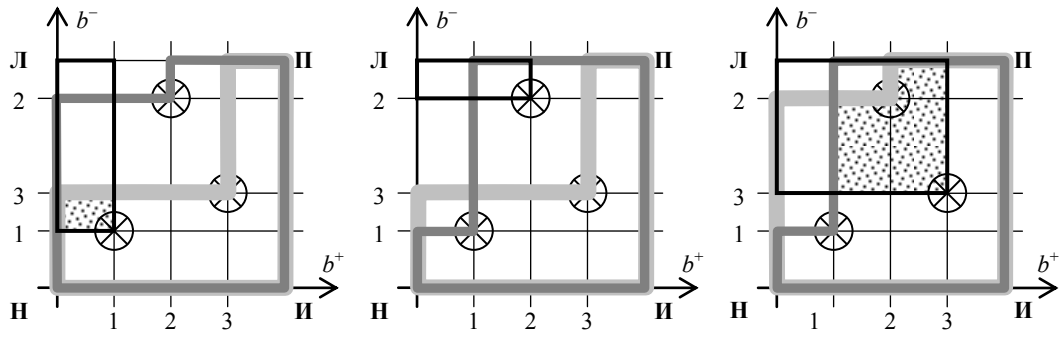


Рисунок 10 – Формирование областей выбора порога доверия к исходным данным, гарантирующих допустимые оценки истинности к-сопряженных базовых семантических суждений (БСС) предметной области в шкале {**Истина**, **Ложь**} при отсутствии доминирования среди двух БСС при доминировании ими третьего БСС

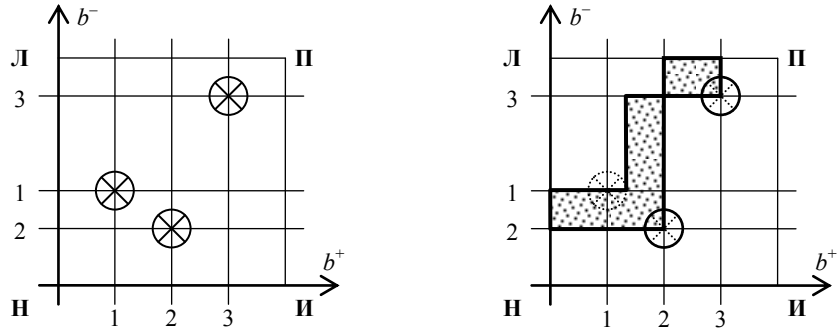


Рисунок 11 – Отсутствие доминирования среди двух базовых семантических суждений (БСС) предметной области при доминировании их третьим БСС (а) и соответствующая этому случаю область выбора порогов доверия к исходным данным, гарантирующая допустимую оценку истинности в шкале {**Истина**, **Ложь**} для к-сопряженных БСС (б)

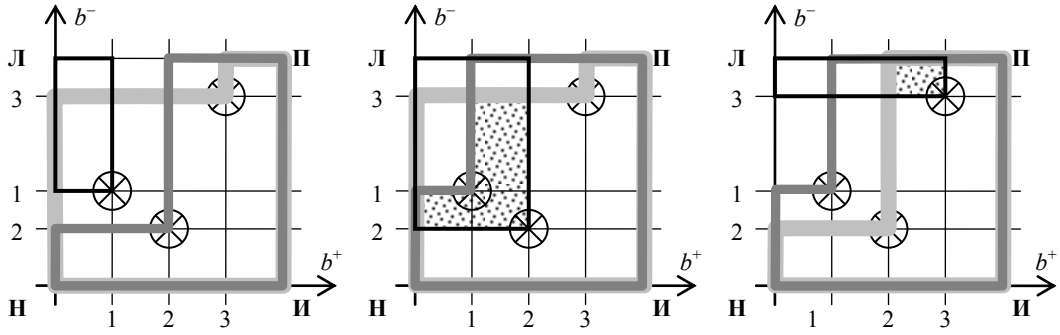


Рисунок 12 – Формирование областей выбора порога доверия к исходным данным, гарантирующих допустимые оценки истинности к-сопряженных базовых семантических суждений (БСС) предметной области в шкале {**Истина**, **Ложь**} при отсутствии доминирования среди двух БСС при доминировании их третьим БСС

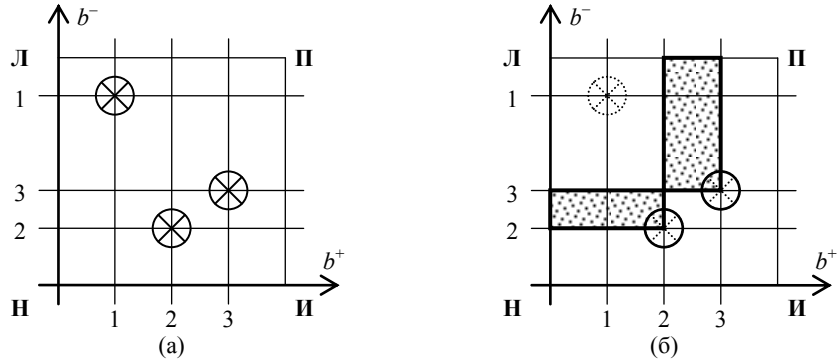
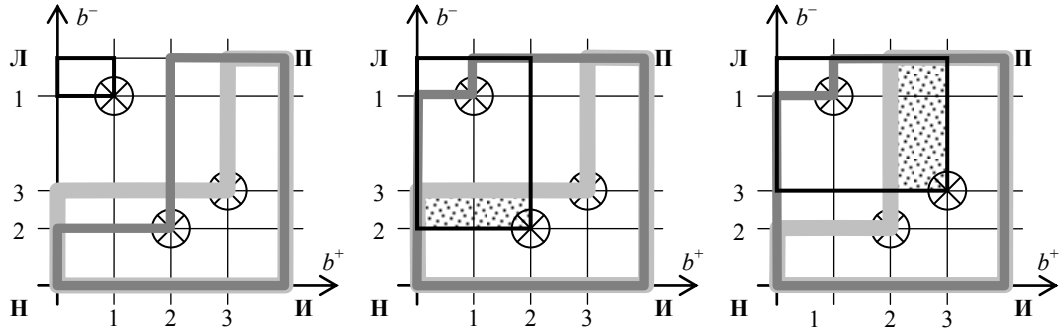
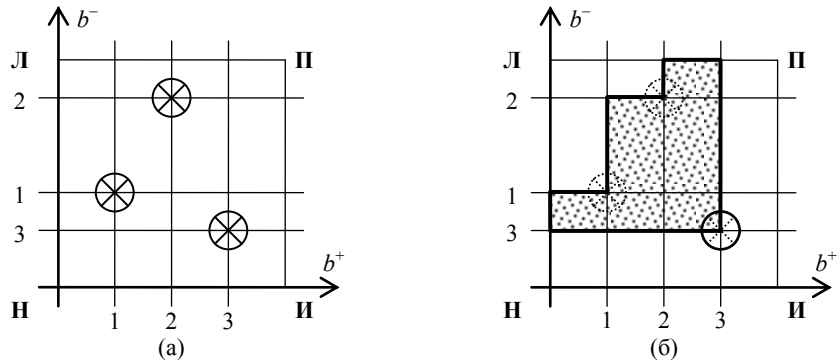


Рисунок 13 – Отсутствие доминирования среди двух базовых семантических суждений (БСС) предметной области в варианте I (а) и соответствующая ему область выбора порогов доверия к исходным данным, гарантирующая допустимую оценку истинности в шкале {**Истина**, **Ложь**} для к-сопряженных БСС (б)



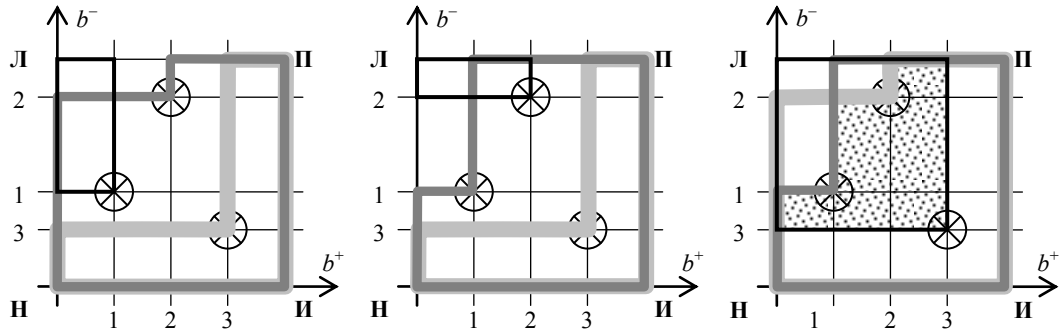
(**Истина**$_1$ **Ложь**$_2$, **Ложь**$_3$) (**Ложь**$_1$ **Истина**$_2$, **Ложь**$_3$) (**Ложь**$_1$ **Ложь**$_2$, **Истина**$_3$)

Рисунок 14 – Формирование областей выбора порога доверия к исходным данным, гарантирующих допустимые оценки истинности к-сопряженных базовых семантических суждений (БСС) предметной области в шкале {**Истина**, **Ложь**} при отсутствии доминирования среди двух БСС в варианте I



(а) (б)

Рисунок 15 – Отсутствие доминирования среди двух базовых семантических суждений (БСС) предметной области в варианте II (а) и соответствующая ему область выбора порогов доверия к исходным данным, гарантирующая допустимую оценку истинности в шкале {**Истина**, **Ложь**} для к-сопряженных БСС (б)



(**Истина**$_1$ **Ложь**$_2$, **Ложь**$_3$) (**Ложь**$_1$ **Истина**$_2$, **Ложь**$_3$) (**Ложь**$_1$ **Ложь**$_2$, **Истина**$_3$)

Рисунок 16 – Формирование областей выбора порога доверия к исходным данным, гарантирующих допустимые оценки истинности к-сопряженных базовых семантических суждений (БСС) предметной области в шкале {**Истина**, **Ложь**} при отсутствии доминирования среди двух БСС в варианте II

Конфигурация построенных областей выбора порога доверия к исходным данным во всех случаях неполного доминирования среди к-сопряженных БСС (рисунки 9б, 11б, 13б, 15б) показывает, что *рациональный выбор* порогов доверия следует производить лишь *среди векторных оценок истинности рассматриваемых* БСС, которые образуют Парето-оптимальное множество при максимизации аспекта *Истина* и минимизации аспекта *Ложь*. При этом необходимо отметить следующее:

- результаты анализа двух первых рассмотренных случаев соотношения компонент векторов истинности к-сопряженных БСС – линейного доминирования и отсутствия доминирования - обобщаются результатом исследования неполного доминирования среди БСС;
- результат, полученный при исследовании неполного доминирования среди БСС, качественно не измениться при увеличении количества к-сопряженных БСС[7,8].

Этим завершен анализ выражения (1), и указан метод формирования области $S^{(\alpha)}_{(i)IR_m}$ - области выбора порогов доверия $\alpha_{(i)IR_m} = \left\langle \alpha^{+}_{(i)IR_m}, \alpha^{-}_{(i)IR_m} \right\rangle$, выделяющих допустимые суждения об истинности (в шкале {**Истина**, **Ложь**}) набора к-сопряженных БСС, определяемого каждой группой IR_m к-сопряженных свойств у каждого i-го объекта нестрогого ФК.

Каждая такая область, если она существует[9], имеет вид Парето-оптимального множества векторных оценок истинности, выделенного из векторов истинности набора к-сопряженных БСС по критериям максимума аспекта *Истина* и минимума аспекта *Ложь*. Однако с позиций V^{TF}-логики это множество можно ранжировать и определить *единственный рациональный порог доверия*, который определит наиболее правдоподобное суждение из всех допустимых суждений об истинности (в шкале {**Истина**, **Ложь**}) указанного набора к-сопряженных БСС. Такой выбор для каждой группы к-сопряженных свойств у всех объектов исходного нестрогого ФК обеспечит формирование *наиболее правдоподобного* альфа-сечения нестрогого ФК.

Заключение

В статье получила дальнейшее развитие методика формирования понятийной структуры предметной области по имеющимся противоречивым экспериментальным данным об этой предметной области в виде таблицы соответствия «объекты-свойства». В основе методики лежит анализ формальных понятий, в котором отражено классическое понимание понятия как фундаментального смыслового элемента, определяемого объемом и содержанием.

Для моделирования истинности базовых семантических суждений предметной области, т.е. суждений о наличии у объектов тех или иных априори известных свойств, использована векторная логика с двумя аспектами *Истина* и *Ложь*.

Исследован (в том числе экспериментально) эффект концептуальной сопряженности у части базовых семантических суждений, которую привносит концептуальное шкалирование – метод первичной обработки исходных данных в анализе формальных понятий. В случае векторных оценок истинности базовых семантических суждений указанная сопряженность должна быть учтена на этапе замены нестрогого формального контекста предметной области его альфа-сечением, служащим информационной базой - формальным контекстом – для вывода решетки формальных понятий предметной области.

---

[7] Уменьшение количества к-сопряженных БСС до двух приводит к ранее рассмотренным случаям линейного доминирования и отсутствия доминирования среди БСС.

[8] Например, можно предложить двухэтапное формирование области выбора порога доверия: на первом этапе для произвольной тройки БСС производится построение Парето-оптимального множества их векторов истинности, а на втором осуществляется перебор векторных оценок истинности всех остальных БСС в надежде пополнить построенное Парето-оптимальное множество.

[9] Нетрудно проверить, что она может оказаться пустой уже при *равенстве* векторных оценок истинности у двух к-сопряженных БСС.

В предложенном методе наиболее правдоподобного альфа-сечения нестрогого формального контекста предусматривается выбор рациональных порогов доверия к векторным оценкам истинности концептуально сопряженных базовых семантических суждений, когда пороги устанавливаются индивидуально для каждой группы этих суждений у каждого объекта обучающей выборки.

Планируемая в дальнейшем интеллектуализация операции альфа-сечения нестрогого формально контекста должна по запросу публиковать «объяснение» выбора локальных порогов доверия к исходным данным, составляющим различные элементы аппроксимируемого нестрогого формального контекста, и обеспечивать возможность корректного изменения этих порогов по желанию исследователя.

Список литературы

[1] *Ganter, B.* Formal Concept Analysis. Mathematical foundations / B. Ganter, R. Wille. - Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. - 290 p.

[2] Formal Concept Analysis Homepage - http://www.upriss.org.uk/fca/fca.html

[3] Concept Explorer - http://conexp.sourceforge.net

[4] Galicia Lattice Builder - http://www.iro.umontreal.ca/~galicia

[5] ToscanaJ - http://toscanaj.sourceforge.net

[6] Python FCA Tool - https://github.com/ae-hse/fca

[7] *Смирнов, С.В.* Среда моделирования для построения инженерных теорий / С.В. Смирнов // Известия Самарского научного центра РАН. 1999. Т. 1. № 2. С. 277-285.

[8] *Godin, R.* Ontology Design with Formal Concept Analysis / R. Godin, H. Mili, G.W. Mineau et al. // Theory and Application of Object Systems (TAPOS). 1998. Vol. 4. N. 2. - P. 117-134.

[9] *Obitko, M.* Ontology Design with Formal Concept Analysis / M. Obitko, V. Snasel, J. Smid // Proc. of the CLA 2004 International Workshop on Concept Lattices and their Applications (Ostrava, Czech Republic, September 23-24, 2004). Eds.: V. Snasel, R. Belohlavek . – Technical University of Ostrava. - P. 111-119.

[10] *Пронина, В.А.* Использование отношений между атрибутами для построения онтологии предметной области / В.А. Пронина, Л.Б. Шипилина // Проблемы управления. 2009. №1. - С. 27-32.

[11] *Смирнов, С.В* Онтологии и анализ формальных понятий / С.В. Смирнов // Информационные и математические технологии в науке и управлении: Труды XVII Байкальской Всероссийской конф. (30 июня-9 июня 2012 г., Иркутск, Россия). Часть III. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2012. - С. 140-148.

[12] *Pollandt, S.* Fuzzy-Begriffe: Formale Begriffsanalyse unscharfer Daten / S. Pollandt. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1997. – 153 S.

[13] *Tho, Q.T.* Automatic Fuzzy Ontology Generation for the Semantic Web / Q.T. Tho, S.C. Hui, A.C.M. Fong, T.H. Cao // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2006. Issue 6. Vol.18. - P. 842–856.

[14] *De Maio, C.* Towards Automatic Fuzzy Ontology Generation / C. De Maio, L.V. Fenza, S. Senatore // In: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (Jeju Island, Korea, 2009, August 20-24). - P. 1044–1049.

[15] *Belohlavek, R.* Computing the lattice of all fixpoints of a fuzzy closure operator / R. Belohlavek, B. De Baets, B. Outrata, J. Vychodil // IEEE Trans. on Fuzzy systems. 2010. Issue 3. Vol.18. P. 546-557.

[16] *Офицеров, В.П.* Использование V^{TF}-логики для определения формальных контекстов и построения онтологий предметных областей / В.П. Офицеров, С.В. Смирнов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV международной конф. (25-28 июня 2013 г., Самара, Россия). – Самара: СамНЦ РАН, 2013. - С. 291-297.

[17] *Аршинский, Л.В.* Векторные логики: основания, концепции, модели / Л.В. Аршинский. - Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2007. – 228 с.

[18] *Барсегян, А.А.* Анализ данных и процессов / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, И.И. Холод, М.Д. Тесс, С.И. Елизаров. - 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 512 с.

[19] *Загоруйко, Н.Г.* Когнитивный анализ данных / Н.Г. Загоруйко. – Новосибирск: Академичесое изд-во «Гео», 2013. – 186 с.

[20] Мир экспертиз - http://mir-ekspertiz.info/priznaki-vneshnosti-cheloveka-ponyatie-klassifikaciya-gabitoskopiya

[21] Эксперт-Криминалист - http://www.expert-kriminalist.ru/readers/portret_readingroom/details/31

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА SMARTFACTORY ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО СОГЛАСОВАННОМУ УПРАВЛЕНИЮ ЦЕХАМИ ПРЕДПРИЯТИЙ

П.О. Скобелев[1], А.С. Вылегжанин[2], Я.Ю. Шепилов[2], Д.Н. Казанская[2], Д.В. Павлова[2], О.И. Храмова[2]

[1]Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
petr.skobelev@gmail.com
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

[2]ООО «НПК «Разумные решения»
443013, Самара, ул. Московское шоссе, 17, офис 1201, Россия
shepilov@smartsolution-123.ru
тел/факс: +7 (846) 279-37-78

Ключевые слова: *мультигентная система, оперативное планирование, производственный цех, реальное время, сетецентрический подход, согласованное взаимодействие, планшет мастера, интеллектуальный терминал рабочего*

Аннотация
Issues and problems discovered during system operation at the enterprise are considered and requirements to the intelligent management system of enterprise production resources are formulated. It is shown that the suggested approach radically changes the character of user-system interaction, by creating conditions for discovery of knowledge, skills, talents and competencies of every worker.

Введение

В настоящее время мультиагентная система (МАС) SmartFactory внедрена и используется на предприятиях ОАО «Ижевский мотозавод – Аксион Холдинг», ОАО «Кузнецов» и ОАО «Авиаагрегат».

Результаты внедрения системы, а также особенности взаимодействия с пользователями на указанных предприятиях подробно рассмотрены в работах [1-7]. Однако, в процессе эксплуатации были обнаружены некоторые узкие места, которые раньше система не учитывала.

В рамках эксплуатации МАС SmartFactory осуществляется поиск путей повышения эффективности и удобства использования системы. Важнейшим направлением этой работы является доработка эксплуатируемой МАС для управления ресурсами предприятия с учетом всех особенностей производства.

Использование МАС SmartFactory предоставляет возможность наладить работу этих предприятий изнутри за счет внедрения новых принципов организации и управления без колоссальных финансовых вливаний, сплотить коллектив для работы на конечный результат, максимально включить в управление предприятием волю, знания и умения людей и, в конечном счете, сделать использование существующих ресурсов предельно эффективным, инициировать инновации и рост производства, внутреннее развитие предприятия.

Рассматриваемый подход и предлагаемая система предназначены, в первую очередь, для использования на предприятиях аэрокосмического комплекса, отличающихся высокой сложностью и инновационным характером производимых изделий, где высокий результат может быть достигнут лишь в согласованной командной работе высококвалифицированных инженеров, руководителей подразделений, мастеров и рабочих.

1 Планирование в реальном времени

В отличие от традиционных систем планирования ресурсов предприятий, функционирующих в пакетном режиме (в рамках ежедневных, еженедельных, ежемесячных циклов планирования), предлагаемая система, в зависимости от возникающих событий, постоянно функционирует на сервере в режиме реального времени, позволяя адаптивно проводить перепланирование выбранных заказов и ресурсов, на которые оказывают влияние приходящие события.

Разработанный метод адаптивного планирования в реальном времени основан на мультиагентной технологии [8-9] с использованием онтологии, которая включает типичные классы оборудования, технические характеристики структуры продукции и технологические процессы (наборы связанных операций), навыков работников и т.д.

В разработанном методе адаптивного планирования реализован набор специализированных агентов, которые представляют интересы и работают от лица и по поручению заказов, рабочих, оборудования, операций, инструментов и материалов, используя отношения следования между операциями.

Система обеспечивает быстрое адаптивное реагирование на приходящие новые события и проактивно улучшает операционный план, обнаруживая конфликты и вызывая цепочку сдвигов и перераспределение ранее запланированных операций на другие ресурсы для их разрешения.

Адаптивность означает, что даже небольшое событие может вызвать неожиданно большие изменения в планах, находящихся в неустойчивом равновесии, влияние события может распространяться на весь план цеха, вызывая длинную цепь изменений. В результате план работ цеха строится не просто как статичный файл данных, полученный в виде классического комбинаторного поиска, а как баланс интересов вовлеченных в процесс агентов потребностей и возможностей, достигаемый путем выявления конфликтов и проведения переговоров агентов. В ходе данных переговоров система учитывает текущее состояние планов, значимость заказов, структуру продукции, технологические процессы, навыки работников, доступность оборудования, материалов и инструментов, последовательность работы и время выполнения операций.

При необходимости диспетчер цеха может активно вмешаться в план в интерактивном режиме в любое время, проведя ручную доработку плана (по принципу «drag & drop» - «потянуть и бросить»), при этом для всех зависимых операций план будет автоматически перепланирован. Эти функции дают возможность существенно сократить сложность планирования и позволяют сделать его более быстрым, адекватным, точным и достоверным, а также удобным для пользователя.

НПК «Разумные решения» ставит перед собой задачу создать инструмент построения и исполнения планов в реальном времени на основе концепции «живого расписания», при котором планирование никогда не останавливается, а план лишь уточняется и корректируется без полного пересмотра.

Подробное описание метода адаптивного планирования на основе мультиагентной технологии рассмотрены в работах [10-12].

Система состоит из базового ядра MAC, включающего в себя подсистему планирования и модуль управления заказами (Рисунок 1). В зависимости от структуры производства и штата предприятия, для ключевых участников производственного процесса предусмотрено добавление и настройка специализированных автоматизированных рабочих мест (АРМ), например, для рабочих, технологов, нормировщиков и т.д. Данные АРМ позволяют оперативно «на месте» вводить любые непредвиденные события, связанные с использованием оборудования («задача выполнена», «станок сломан», «рабочий не явился» и т.д.), которые могут инициировать процессы перепланирования для исключения простоев.

Система реализует следующие функциональные возможности:

- автоматизация оперативного планирования комплексом производственных структурных подразделений (заготовительного, инструментального, механосборочного, испытательного, ремонтных типов цехов) машиностроительного предприятия;
- планирование использования производственных ресурсов и распределения новых заказов по имеющимся мощностям;
- мониторинг и контроль исполнения намеченных планов;
- автоматизация подготовки данных для планирования производства сложных изделий, в том числе, при получении этих данных из смежных систем.

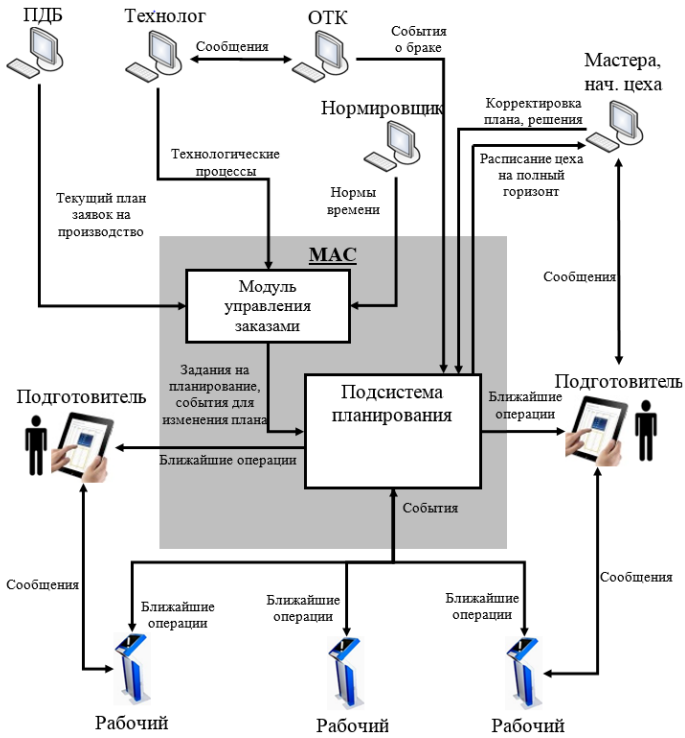


Рисунок 1 - Схема взаимодействия SmartFactory с пользователями

2 Управление цехом для мастера

Для упрощения работы мастера на заводе ему необходим инструмент, способный автоматизировать практически всю его работу.

Важным направлением развития мультиагентной системы управления цехом является совершенствование АРМ мастера, обеспечивающего наглядность и удобство работы матера с системой.

На основании анализа специфики работы мастеров с МАС, а также их навыков был выявлен ряд необходимых доработок (упрощение ввода событий в систему, создание доступной для редактирования очереди событий и др.).

Для упрощения работы мастера по построению плана и анализу результирующих показателей цеха и участка предлагается создать интерактивный конструктор плана участка (цеха), который позволит провести моделирование и построить варианты плана (Рисунок 2). В режиме планирования проведение моделирования невозможно, т.к. может привести к потере реального плана. Для этого предлагается возможность загрузить текущий план в систему

моделирования для отработки различных вариантов плана участка, которые могли бы улучшить показатели работы цеха в целом. Интерактивность такого конструктора заключается в том, что любое действие мастера сразу будет вызывать перепланирование (только в рамках данного конструктора, не изменяя реальный план) и пересчет показателей работы участка и рабочих, а также показателей цеха в целом.

При этом мастер не строит план с нуля, а корректирует предложенный системой план. На мастера ложится задача максимальной оптимизации плана и соблюдения всех неизвестных системе ограничений. Когда план участка полностью отработан, мастер может заменить старый план на новый.

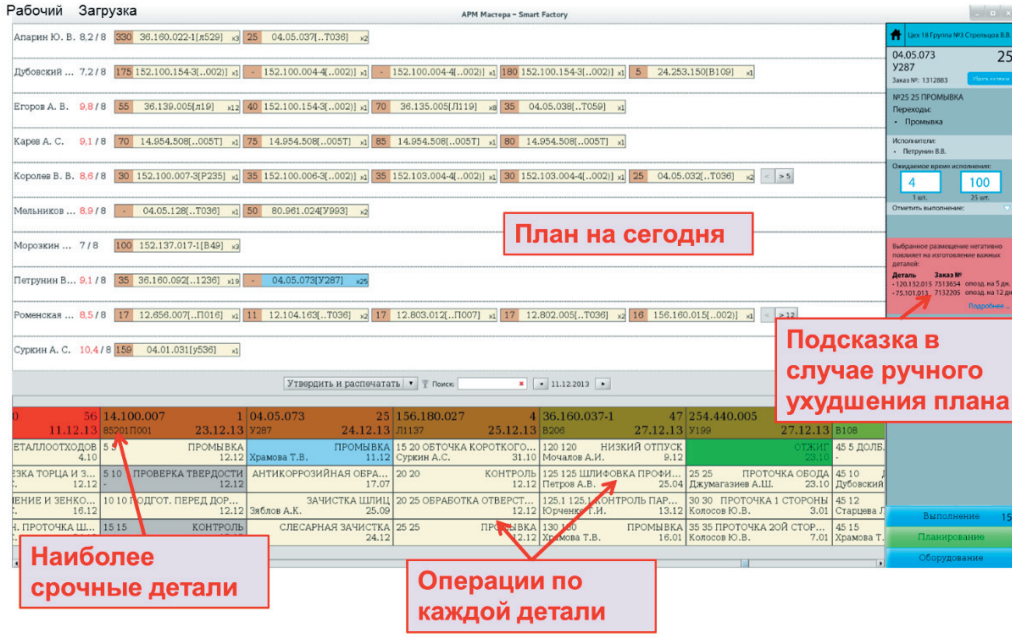


Рисунок 2 - Возможный вид экрана интерактивного конструктора АРМ мастера

Логика планирования в системе должна быть направлена на соблюдение сроков каждого основного заказа и не допускает постоянный сдвиг работ вправо без анализа всех вариантов (переброска операций на другие ресурсы, обмен операциями с другими ресурсами). Возможный подход для ускорения работ – передать работу на другой участок с имеющимся свободным рабочим. Для этого система должна показывать занятость соседних участков.

Для реализации логики планирования будет введен агент мастера, выполняющий следующие функции:

- спланировать важнейшие заказы по срокам сдачи,
- определить, у кого из рабочих недостаточная зарплата и «подтянуть» работы по валовой продукции из работ других рабочих или даже из работ следующего месяца,
- бронировать некоторый буфер в планах рабочих для возникающих непредвиденных событий.

Для корректировки логики планирования возможен также другой вариант: технологи, создавая новую технологию, разрешат выписку материалов и старт заготовительных операций с опережением, чтобы загрузить рабочих. Мастер может разрешить рабочему не ждать отметки отдела технического контроля (ОТК), а сразу брать следующую деталь и начинать

работать, если ОТК не подтверждает качество, операции приостанавливаются, выдаются сообщения мастеру, заместителю начальника цеха и другим заинтересованным лицам.

Если же при стремлении выполнить работу в срок у системы так и не нашлось вариантов в ходе поиска комбинаций, то необходимо находить самые длинные операции или указанные мастером на критическом пути и предлагать рабочим сверхурочные работы, или искать свободные ресурсы в других участках цеха, либо в других цехах.

Поскольку мастер постоянно перемещается по участку и находится в коммуникации с рабочими, чтобы оценивать текущую производственную ситуацию, и при этом ему приходится часто возвращаться к компьютеру, чтобы вносить информацию, следует соответствующие сообщения и предложения отправлять на АРМ мастера, который предполагается реализовать в форме планшета, постоянно находящегося в руках у мастера. При наличии терминала рабочего можно выводить журнал (лог) событий на планшет мастера:

- рабочий закончил или наоборот начал работу,
- пришел материал на склад,
- поменялась технология,
- неожиданно возник брак на одной из операций как событие от ОТК и т.д.

Планшет позволит мастеру повысить эффективность, своевременность и качество принимаемых решений.

3 Интеллектуальная система мотивации работников предприятия

3.1 Проблемы мотивации персонала на предприятиях

На сегодняшний день на предприятиях существуют проблемы мотивации персонала:

- для большинства работников предприятия не ясны условия и перспективы для роста;
- цели работников часто «расходятся» с целями предприятия;
- зачастую к рабочим относятся как к ресурсу производства, интеллектуальные и волевые ресурсы не востребованы;
- отсутствие среды для мотивации и условий для самовыражения, проявления инициативы;
- отсутствие прозрачной системы отслеживания и контроля результатов.

Производственные нормативы на изготовление продукции при сдельной оплате труда также являются демотивирующим фактором по следующим причинам:

- отсутствует связь норм времени с реальностью;
- происходит ежегодный пересмотр норм времени в сторону уменьшения, исходя из результатов наиболее продуктивных работников. В результате, они вынуждены работать медленнее, чтобы в будущем не пришлось выполнять ту же работу за меньшую оплату;
- нормативы не учитывают квалификацию и специализацию, состояние работника, внешние факторы. В таких условиях их директивная функция способна усугублять перечисленные проблемы и порождать новые. Напротив, рабочий, самостоятельно контролирующий свои трудозатраты, может адаптивно подстраиваться под ситуацию.

3.2 Назначение интеллектуальной системы мотивации

Люди – одна из основных движущих сил любой системы, поэтому именно от сотрудников зависит успешное функционирование компании. При этом мало обеспечить ее профессионалами и правильно определить организационную структуру. Компания должна вовлечь каждого сотрудника в достижение общей цели и работать на результат.

Фактически, впервые на практике речь идет о включении работников завода в процессы управления, чтобы полноценно использовать волю, знания и умения людей для повышения эффективности работы предприятия. Это одно из важнейших отличий формирующейся новой «экономики знаний и реального времени», отражающей возрастание роли активного,

познающего и созидающего человека в процессах принятия решений на всех уровнях работы предприятий.

Данная система позволит каждому рабочему задавать как свои потребности, так и свои возможности, например, готовность повышать квалификацию, готовность к работе в ночную смену и выходные и т.д. При этом каждому рабочему будут видны также и его результаты, включая объем выполненных работ и оплату по тарифу, план на ближайший горизонт и ожидаемая оплата до конца месяца, процент допущенного брака, рейтинг качества и эффективности и другие.

Внедрение такой системы мотивации позволит предприятию, во-первых, повысить производительность труда сотрудников компании, во-вторых, увеличить число квалифицированных и взаимозаменяемых работников.

3.3 Функции интеллектуальной системы мотивации

Для лучшего понимания возможностей предлагаемого решения рассмотрим использование интеллектуального терминала рабочего на примере взаимодействия мастеров и рабочих, которое может осуществляться в ходе построения и согласования сменно-суточных заданий (Рисунок 3).

На экране интеллектуального терминала рабочего предлагаются следующие основные окна:

- *Мой текущий план* – позволяет увидеть запланированные работы, которые могут изменяться по ходу развития ситуации в цехе.
- *Моя текущая оплата* – сдельная заработная плата на данное число с начала месяца и плановая до конца месяца.
- *Ваше ближайшее задание* – показывает детали предлагаемой операции и запрашивает параметры ее выполнения для согласования со всеми другими участниками, что означает участие в процессе принятия решений, как и любой последующий ввод непредвиденного события, влияющего на планы.
- *Мои результаты* – показывает прогресс по выполнению заданий, отсутствие брака, рост производительности труда и другие показатели.

Система предоставляет возможность задать для каждого рабочего профиль, опыт и квалификацию, включая в будущем индивидуальную траекторию приобретения новых знаний и умений. Задания, выполняемые в цехе, при этом будут планироваться на каждого рабочего с учетом информации о компетенциях, а также указанных ресурсов времени.

Если в цехе нет больше работы, система может связаться с другим цехом и поискать там дополнительные задания, чтобы эффективно использовать время рабочего и не допустить простоя, а также помочь коллегам из соседнего цеха.

При поступлении нового задания система спросит рабочего, подходит ли ему задание и готов ли он выполнить его в срок, все ли необходимые инструменты имеются и какое время потребуется для выполнения, уточняя при этом известные средние нормы по предприятию. Если срок окажется слишком велик, система может сообщить об этом мастеру, который получит уведомление, и одновременно запросить других рабочих со сходной квалификацией о возможности и желании выполнить задание, тем самым стимулируя конкуренцию между рабочими за заказы. Чем больше работ окажется в плане каждого рабочего, тем больше будет его конкретная оплата за день и за месяц, которую также можно сразу видеть на терминале как «план» и «факт» по оплате.

Рабочий, приступая к работе, делает отметку на терминале рабочего. По факту успешного завершения работы вводится соответствующий сигнал-событие, свидетельствующий о том, что результат доступен для контроля качества и передачи следующему работнику по цепочке, причем работа может завершиться как раньше, так и позже, что может премироваться или штрафоваться.

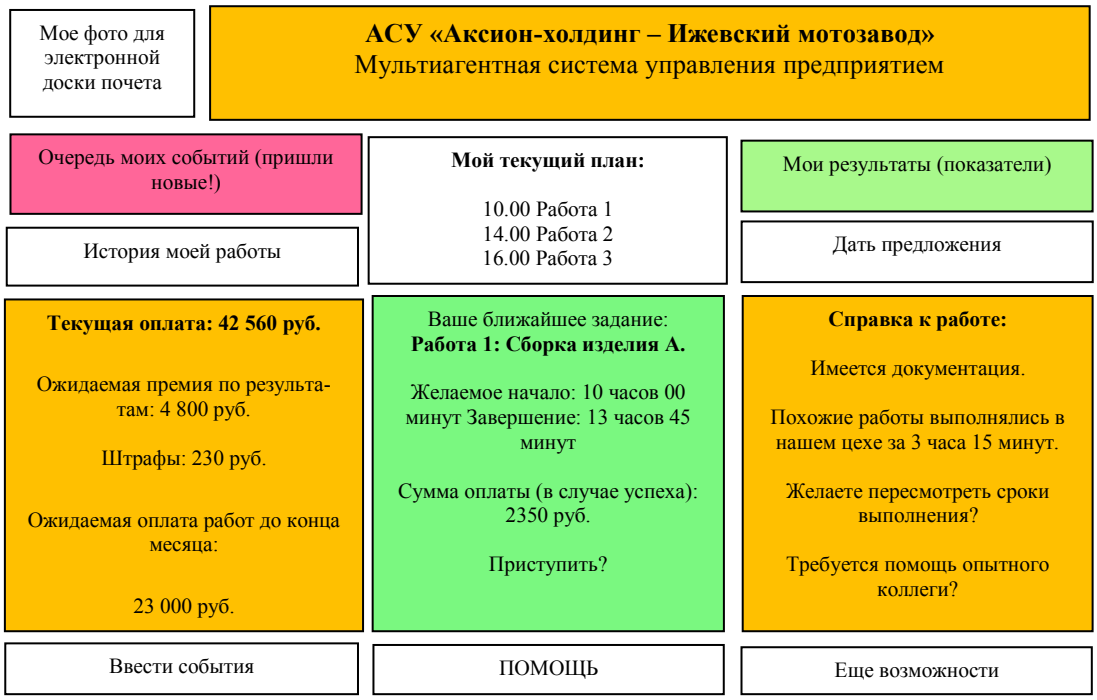


Рисунок 3 - Вид разрабатываемого экрана интеллектуального терминала рабочего

По завершению задания рабочему предлагается самостоятельно оценить качество своей работы, что также будет оцениваться коллегами, использующими результаты его работы, давая важную информацию мастеру и показывая рабочему сводную оценку. А система, в свою очередь, использует информацию для сбора сведений о трудоемкости работы, чтобы учитывать ее для следующего планирования заказа, фиксировать рост производительности труда или выделять наиболее трудоемкие операции.

Кроме того, для каждого рабочего в системе отображается бизнес-радар, который показывает процент выполнения плана, объем отклонений от плана, качество выполнения работ и процент выпуска брака в сравнении со средним по цеху у других рабочих, рост производительности труда, зафиксированные причины проблемных ситуаций и т.д.

Руководители также смогут видеть показатели и корректировать премиальный фонд, проводить воспитательные беседы, принудительно раздавать рабочим «неинтересные работы».

4 Заключение

Для успешного внедрения предлагаемого подхода требуется создание нового поколения интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени, использующих более гибкие и эффективные подходы, методы и средства распределения, планирования и оптимизации ресурсов, а также информационно-коммуникационного он-лайн взаимодействия с пользователями, поскольку каждый мастер и рабочий в определенные моменты времени становится полноправным, а иногда и критически важными участником процесса управления предприятием, когда от работы каждого зависит результат работы всего предприятия.

Переход к управлению ресурсами в реальном времени позволяет своевременно обнаруживать «узкие места» и устранять возможные простои, избыток или дефицит ресурсов

путем адаптивного перепланирования заказов и ресурсов, что улучшает качество обслуживания клиентов, сокращает расходы, уменьшает сроки работ и минимизирует риски.

Реализация предложенной системы позволит перейти к успешному управлению предприятиями в реальном времени, что обеспечит существенное повышение эффективности использования уже имеющихся производственных ресурсов.

Список литературы

[1] И.Ю. Тюрин, А.С. Вылегжанин, М.В. Андреев, Э.В. Кольбова, П.О. Скобелев, Я.Ю. Шепилов. Результаты внедрения и перспективы развития мультиагентной системы для оперативного управления инструментальным цехом ОАО «ИЖЕВСКИЙ МОТОЗАВОД – АКСИОН ХОЛДИНГ» // Труды XIV Международной конференции “Проблемы управления и моделирования в сложных системах”, Самара, 22-25 июня 2012г. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. – С. 735-740.

[2] Андреев М.В., Иващенко А.В., Кривенок С.А. Мультиагентная система распределения производственных ресурсов в тяжелом машиностроении. // Программные продукты и системы. 2010. № 3. – С. 56-62.

[3] Городецкий В.И., Иващенко А.В., Карсаев О.В., Скобелев П.О., Юсупов Р.М., Царев А.В. Мультиагентные технологии для оперативного управления ресурсами в реальном времени // Третья мультиконференция по проблемам управления. 12-14 октября 2010 г. СПб, 2010. – С. 226-230.

[4] Скобелев П.О., Иващенко А.В., Андреев А.В., Бабанин И.О. Мультиагентные технологии для управления распределением производственных ресурсов в реальном времени. // Вычислительные технологии в естественных науках. Перспективные компьютерные системы: устройства, методы и концепции: Труды семинара. Таруса, 24 марта 2011. М.: ИКИ РАН, 2011. – С. 110-122.

[5] Андреев М.В., Бабанин И.О., Вылегжанин А.С., Иващенко А.В, Кольбова Э.В., Скобелев П.О. Мультиагентная система управления инструментальным цехом. // Труды XIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара. 2011. С.451-459.

[6] Андреев М.В., Иващенко А.В., Симонова Е.В., Скобелев П.О., Царев А.В. Автоматизация адаптивного управления производством на промышленном предприятии / // Учебное пособие. Самара. 2009. – 184 с.

[7] 19. А.В. Шишов, А.С. Вылегжанин, Д.В. Павлова, О.И. Храмова, Я.Ю. Шепилов. Разработка и внедрение АСУ «Кузнецов» с применением сетецентрического подхода и мультиагентных технологий // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ 2014), 16 – 19 июня 2014 г., Москва. – М.: ИПУ РАН, 2014. – в печати.

[8] P.O. Skobelev. Multi-Agent Systems for Real Time Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling: Industrial Application. – Proc. of 10-th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2011). – Springer Verlag, France, Toulouse, 2011. – P. 5-14.

[9] Petr Skobelev. Bio-Inspired Multi-Agent Technology for Industrial Applications, Multi-Agent Systems - Modeling, Control, Programming, Simulations and Applications, / Editors: Faisal Alkhateeb, Eslam Al Maghayreh and Iyad Abu Doush (Ed.), InTech, Austria, 2011. Available from: http://www.intechopen.com/articles/show/title/bio-inspired-multi-agent-technology-for-industrial-applications.

[10] В.Ф. Шпилевой, П.О. Скобелев, Е.В. Симонова, А.В. Царев, С.С. Кожевников, Э.В. Кольбова, И.В. Майоров, Я.Ю. Шепилов. Разработка мультиагентной системы «Smart Factory» для оперативного управления ресурсами в режиме реального времени // Информационно-управляющие системы. – 2013. №6(67). – С. 91-98.

[11] V. Shpilevoy, A. Shishov, P. Skobelev, E. Kolbova, D. Kazanskaia, Ya. Shepilov, A. Tsarev. Multi-agent system “Smart Factory” for real-time workshop management in aircraft jet engines production // Proceedings of the 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS’13), May 22-24, 2013, São Paulo, Brazil. 2013. – P. 65-70.

[12] Alexey Goryachev, Sergey Kozhevnikov, Elina Kolbova, Oleg Kuznetsov, Elena Simonova, Petr Skobelev, Alexander Tsarev, Yaroslav Shepilov. «Smart Factory»: Intelligent System for Workshop Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling in Real Time. – Proceedings of the 2012 International Conference on Manufacturing (Manufacturing 2012), November 14-15, 2012, Macau, China. – Advanced Materials Research, vol. 630 (2013), P. 508-513, Trans Tech Publications, Switzerland.

SMART LOGISTICS: МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СБОРНЫМИ ГРУЗАМИ ДЛЯ ВНУТРИРЕГИОНАЛЬНЫХ РАЗВОЗОК

П.О. Скобелев[1], А.Н. Лада[2], Д.С. Рыбак[2], И.А. Пустовой[2], Д.Г. Пейсахович[2]

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия,
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70
petr.skobelev@gmail.com

ООО «НПК «Разумные решения»
443013, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 17, офис 1201
тел./факс: +7 (846) 279-37-78
lada@smartsolutions-123.ru

Ключевые слова: *логистика, внутрирегиональные грузоперевозки, маршрут, адаптивное планирование, мультиагентные технологии*

Abstract
The article describes main functionalities and developing principles of intellectual management system for consolidated cargoes within intra-regional deliveries. The application of adaptive scheduling mechanism for flexible solving the logistic problems is considered.

Введение

Проблема повышения эффективности внутрирегиональных грузовых перевозок является актуальной и значимой. Объемы расходов на логистические процессы в целом в структуре цены товара (включая процессы распределения, складирования, дистрибуции и др.) могут достигать до 40-45 %, при этом сама транспортировка составляет до 30% себестоимости производства продукции.

В этих условиях становится актуальной и значимой задача оптимизации издержек, связанных с логистическими процессами и, в первую очередь, внутрирегиональными транспортными перевозками. Согласно пресс-релизу международной консалтинговой компании *KMPG* [1], внедрение системы планирования на всех уровнях организации является одной из основных инициатив по сокращению издержек для компаний дорожной инфраструктуры, которые могут позволить улучшить показатели операционной эффективности и повысить конкурентоспособность организаций.

Решение столь сложной задачи требует применения развитых средств автоматизации управления, а также современных математических моделей, методов и алгоритмов решения сложных задач планирования и оптимизации мобильных ресурсов в реальном времени. При этом большинство существующих на рынке программных решений ориентированы на пакетную обработку, то есть подразумевают наличие полной и окончательной информации о заказах и ресурсах. В частности, автоматические планировщики, предлагаемые такими известными компаниями, как *SAP*, *Manugistics* (недавно приобретена компанией *JDA*), *i2, ILOG, Парагон, Автор, 1С* и ряд других, как правило, по прежнему реализуют различные методы *Constraint programming* («программирования в ограничениях») и другие комбинаторные переборные методы, например, метод ветвей и границ [2, 3]. Но на практике всегда происходит множество непредвиденных событий, меняющих ситуацию: приходят срочные, а потому выгодные заказы, образуются пробки на дорогах, влекущие непредвиденные задержки, происходят поломки транспортных средств и т.д. При этом расчет оптимального плана для крупной транспортной компании в одном из имеющихся пакетов программ занимает 8-10 часов (при-

мерно для 300 грузовиков и 600 точек развозки в день), за это время, как отмечено выше, ситуация может существенно измениться, что потребует начать планирование заново. В то же время средства для планирования в реальном времени остаются весьма примитивными (например, только в открытые слоты времени), возможность гибкой адаптации на основе приходящих событий связывается преимущественно с возможностью ручной корректировки планов.

Один из новых подходов к решению сложных задач в настоящее время связывается с применением мультиагентных технологий, по своей значимости не уступающими био- и нанотехнологиям [4, 5]. Решение сложных задач планирования в этой технологии достигается за счет распределенного подхода (*Distributed Problem Solving*) на основе моделей, методов и алгоритмов самоорганизации агентов заказов и ресурсов [6].

По результатам расчетов, выполненных в кооперации с учеными Санкт-Петербургского университета [7], ожидается, что переход к принятию решений в реальном времени позволит транспортным предприятиям действовать на 25-40% эффективнее, а также избежать рисков «затоварки», простоя или дефицита транспортных средств, снизить холостой пробег и ущерб для экологии. Возможность принятия решений в реальном времени особенно необходима в ситуации, когда от самого момента времени принятия решения зависит качество сервиса и экономическая эффективность транспортной услуги.

Таким образом, задача планирования и оптимизации внутрирегиональных транспортных перевозок в сложных цепочках поставок является чрезвычайно актуальной и значимой.

1 Мультиагентный подход к решению задачи управления сборными грузовыми перевозками

В статье [8] рассматривается развитие системы управления сборными грузовыми перевозками, которая позволяет решить проблему адаптивного перестроения расписания. По сравнению с предыдущей версией системы грузоперевозок, которая оперировала исключительно перевозками *FTL* (*Full Truck Load*) [9, 10], данная система предоставляет возможность планирования перевозок *LTL* (*Less Than Truckload*), что приводит к значительному увеличению прибыли от выполнения грузоперевозок [11].

1.1 Описание объектной модели системы управления грузоперевозками

Для описания предметной области системы были использованы следующие ключевые сущности: Заказ, Требование, Состояние, Груз и Ресурс. На рисунке 1 представлена диаграмма классов.

Заявка (*Order*) является ключевой сущностью системы и описывает введенный пользователем заказ на перевозку грузов. В заявке определена стратегия перевозки (конкретный способ выполнения данного заказа), а также ряд важных полей, необходимых для корректного планирования заявки (например, «стоимость перевозки»). Заявка содержит список Грузов (*Cargo*), которые вводятся пользователем. Эти грузы будут перевезены в рамках данной заявки. Далее в заявку вводится список Требований (*Requirement*). Требования предназначены для указания системе планирования, какие действия с грузом необходимо выполнить (например, погрузка, разгрузка или стоянка). Требование может включать список предпочитаемых ресурсов. В этом случае оно может быть запланировано только с использованием указанных ресурсов. После планирования заявки система планирования выдает результат в виде списка Состояний (*State*), которые содержат данные о местоположении ресурсов и размещении грузов (*CargoPart*) в определенный момент времени (отметка на временной шкале).

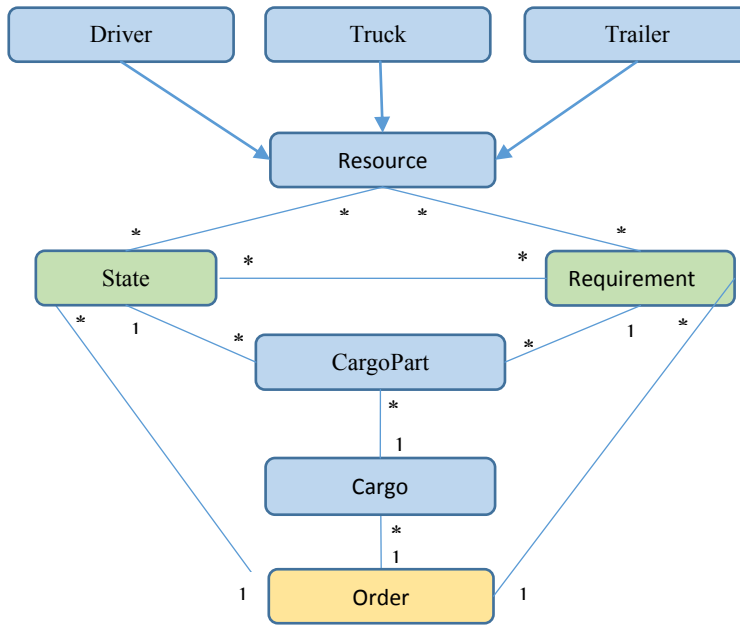


Рисунок 1 – Диаграмма классов объектной модели

1.2 Виды агентов, используемых в системе управления грузоперевозками

В системе используются агенты 8 видов, которые представлены в таблице 1, каждый из них имеет отношение к одному из 2 типов в соответствии с функциональным назначением: агент потребности (*Demand*) или агент возможности (*Resource*) [12]. Основные типы сообщений, которыми обмениваются агенты при переговорах, представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Типы агентов

Вид агента	Назначение
Требование погрузки (D)	Обеспечить погрузку в заданном интервале времени и в заданной локации.
Требование разгрузки (D)	Обеспечить разгрузку в заданном интервале времени и в заданной локации.
Требование стоянки (D)	Обеспечить стоянку ресурса, либо выполнение каких-либо работ с его использованием, в течение заданного интервала времени.
Требование техобслуживания (D)	Обеспечить техобслуживание ресурса в заданный промежуток времени (не связано с конкретной заявкой).
Заявка (D)	Отслеживать получаемую прибыль и, в случае неудовлетворённости, инициировать поиск других вариантов.
Сервисный (R)	Обеспечить завершение цикла планирования и промежуточное сохранение текущих результатов в БД через заданные промежутки времени во время цикла планирования.
Грузовик (R)	Предоставить возможность для перевозки грузов из точки отгрузки в точку назначения.
Трейлер (R)	Отслеживать состав грузов и разрешать конфликты, в случае возникновения.

Таблица 2 – Типы сообщений

Тип сообщений	Агент	Описание сообщения
Перепланирование	*Требование*	Запрос на перепланирование требования.
Дефрагментация	*Требование*	Сигнал о необходимости дефрагментации своей части расписания, с учетом заданных параметров.
Обслуживание допустимого сдвига	*Требование*	В зависимости от содержимого сообщения выполняется одно из действий: сообщение текущего допустимого сдвига требования; уменьшение текущего допустимого сдвига требования в соответствии с параметрами сообщения; увеличение текущего допустимого сдвига требования в соответствии с параметрами сообщения.
Предоставление ресурса	*Требование*	Запрос на наличие возможности перевозки грузов данным грузовиком.
Вытеснение груза	*Трейлер*	Предписание требованию извлечь перевозимые грузы из трейлера.
Изменение стоимости поездки	*Заявка*	Оповещение об изменении стоимости поездки, в которой участвует заявка.
Внешние изменения	*Сервисный*	Сообщение о произведённых пользователем изменениях.

2 Адаптивное планирование сборных грузовых перевозок

В качестве решения задачи управления сборными грузоперевозками предлагается метод адаптивного планирования, разработанный на основе мультиагентного подхода. Процесс решения в общем виде можно разделить на следующие этапы:

1) Инициализация;
2) Построение первоначального плана;
3) Переход к проактивному циклу планирования;
4) Цикл проактивного планирования;
5) Завершение цикла проактивного планирования.

2.1 Инициализация

На этапе инициализации система загружает все необходимые объекты из базы данных (БД) и создает агентов для каждой сущности из следующего набора:

1) Заявка;
2) Требование;
3) Грузовик;
4) Трейлер.
5) Основная очередь планирования заполняется агентами грузовиков.

2.2 Этап пакетного планирования

Менеджер агентов последовательно передает управление агентам грузовиков из основной очереди. Каждый грузовик, ведя переговоры с агентами заявок, выполняет построение собст-

венного первоначального плана. На данном этапе планирование происходит на уровне поездок.

2.3 Переход к проактивному циклу планирования

После завершения построения первоначального плана для каждого грузовика, выполняется подсчет ключевых показателей эффективности (*Key Performance Indicators (KPI)*) и сохранение результата в БД. Полученный *KPI* запоминается системой. Основная очередь планирования заполняется агентами заявок, участвующих в сцене.

2.4 Цикл проактивного планирования

Менеджер агентов последовательно выполняет передачу управления агентам из основной очереди. Агент, получивший управление, из очереди исключается. Во время работы он может ставить агентов других заявок как в основную, так и в экстренную очередь. Экстренная очередь для менеджера агентов имеет приоритет, он не переходит к основной очереди, пока не будет обработана экстренная. При этом алгоритм гарантирует целостность расписания, если экстренная очередь пуста. После завершения обработки очередей данные готовы к записи в БД.

2.5 Завершение очередного цикла проактивного планирования

При завершении очередного цикла проактивного планирования выполняется повторный подсчет *KPI* и, в случае его улучшения, производится сохранение результата в БД.

Далее, цикл проактивного планирования повторяется периодически с изменением порядка следования заявок в очереди. Новый цикл планирования может быть инициирован любым изменением со стороны пользователя либо прямым перезапуском планировщика.

2.6 Этап пакетного планирования

Пакетный планировщик разработан с целью быстрого построения первоначального плана для консолидированных грузоперевозок. Для планирования используется следующий механизм:

- управление последовательно передается каждому грузовику;
- грузовик собирает информацию о ближайших заявках (локации, временные окна, грузы);
- планирование заключается в последовательном наполнении рейсов;
- каждый рейс начинается с пустого грузовика;
- на каждом шаге оценивается прибыль, которую принесет каждая отдельная заявка, если будет взята на рейс;
- по завершению оценки на рейс берется наиболее выгодная заявка;
- шаги повторяются до тех пор, пока не будет отсутствовать возможность взять на рейс очередную заявку;
- после завершения формирования рейса, он накладывается на расписание, и алгоритм переходит к формированию следующего рейса.

Для оценки прибыльности рейса используется критерий (1).

$$(1) \quad KPI_{tr} = \sum_i pr_i - \sum_i \left(\begin{array}{l} c_{fixed} * t_i^{fixed} + c_{op} * t_i^{op} + \\ + c_{transport} * s_i^{transport} + c_{empty} * s_i^{empty} \end{array} \right) \to \max$$

где:

- pr_i – прибыль от заявки;
- c_{fixed} – стоимость использования ресурса в час;

- c_{op} – добавочная стоимость использования ресурса в час во время выполнения операций (погрузка, разгрузка, транспортировка);
- $c_{transport}$ – стоимость 1 км пробега с грузом;
- c_{empty} – стоимость 1 км пробега без груза;
- t_i^{fixed} – общее время использования ресурса в часах;
- t_i^{op} – время использования ресурса для выполнения операций;
- $s_i^{transport}$ – длина пробег ресурса с грузом в метрах;
- s_i^{empty} – длина пробега ресурса без груза в метрах.

Количество рассматриваемых вариантов для заявки после каждого шага построения рейса растет, в то время как количество подходящих заявок падает. Например, на первом шаге для каждой заявки рассматривается 1 опция погрузки и 1 опция разгрузки, на втором – 2 опции погрузки и 4 опции разгрузки (по 2 на каждую опцию погрузки). Таким образом, количество опций для погрузки равно N+1, в то время как количество опций для разгрузки составляет (N+1)*2, где N – количество заявок, уже присутствующих в рейсе.

2.7 Построение и анализ опций планирования для требования

Процесс планирования каждой заявки на этапе проактивного планирования состоит из последовательного планирования ее требований. Рассмотрим механизм построения опций планирования требования.

Для построения опций планирования используется общий механизм для всех типов требований, который имеет следующие этапы:

- выборка групп ресурсов;
- фильтрация групп ресурсов;
- для каждой группы ресурсов:
- определение вариантов планирования,
- фильтрация вариантов планирования (первая стадия фильтрации),
- построение и анализ опций планирования,
- фильтрация опций планирования (вторая стадия фильтрации),
- оценка опций планирования.

Анализ опции планирования состоит из следующих этапов:

- построение цепочки операций;
- построение набора требований для дальнейшей проверки на наличие конфликтов;
- анализ каждого требования набора обработчиками конфликтов.

На текущий момент система поддерживает следующие типы конфликтов: по времени, объему, весу, температуре, типу трейлера, совместимости грузов и «неразрешимый» (при обнаружении конфликта данного типа опция далее не рассматривается).

2.8 Обработка конфликтов

В системе существуют 2 обработчика конфликтов:

- по времени;
- по совместимости грузов.

Обработчик конфликтов по времени проводит анализ следующего условия:

(2) $t_{end} + \delta_{bc} \le t_{start} + \delta_{stop} + \delta_{ac}$,

где:

t_{end} – время окончания выполнения планируемого требования;

t_{start} – время начала выполнения рассматриваемого требования;

a – локация, с которой начинается выполнение планируемого требования;

b – локация, в которой заканчивается выполнение планируемого требования;

c – локация, с которой начинается выполнение рассматриваемого требования;

;

;

δ_{stop} – время, на которое возможно смещение рассматриваемого требования.

Если условие (2) выполнено, существует возможность планирования без конфликта по времени с рассматриваемым требованием.

Для обработчика конфликтов по совместимости грузов перед анализом выполняется построение «карты загрузки» для планируемого требования, которая является набором пар <время, индекс загрузки>. Индекс загрузки отражает несколько показателей:

- объем грузов;
- вес грузов;
- минимально допустимая температура для набора грузов;
- максимально допустимая температура для набора грузов;
- словарь <груз, количество> для подробного отражения текущей загрузки.

Далее производится анализ для каждого требования, входящего в интервал времени, на который построена «карта загрузки», и оценивается возможность разместиться с грузами в трейлере с учетом всех ограничений. Если размещение невозможно, регистрируется конфликт до ближайшего требования погрузки.

3 Архитектура и функции системы управления сборными грузовыми перевозками

В процессе создания системы управления сборными грузоперевозками была разработана архитектура системы, представленная на рисунке 2. Центральным узлом данной системы является Сервер, через который осуществляются коммуникации и взаимодействия между остальными компонентами системы.

Система состоит из следующих компонент: Веб-портал, Мобильный Веб-портал, Модуль поставщика *GPS*-данных, Мобильный интерфейс водителя, Модуль поставщика географических данных, Модуль планирования.

Веб-портал представляет собой веб-интерфейс, через который осуществляется ввод заявок, мониторинг ресурсов, просмотр отчетов, ввод фактической информации о расположении ресурсов и этапах выполнения заявок. Мобильный Веб-Портал также предоставляет собой веб-приложение, предназначенное для внесения водителями информации о выполнении некоторых операций.

Модуль планирования является ключевым в данной системе и обеспечивает возможность автоматического планирования заявок, добавленных в систему пользователем. Модуль поддерживает возможность отслеживания внешних изменений в расписании, свойствах ресурсов, ввода новых заявок и т.п.

Мобильный интерфейс водителя – программно-аппаратное решение, позволяющее водителю указывать фактические отметки времени в процессе выполнения заявок, а также просматривать информацию о состоянии автомобиля, показаниях датчиков, дату и место ближайшего технического обслуживания и ряд других параметров. Модуль поставщика географических данных предоставляет информацию о скорости и времени движения по дорогам, которую он получает из внешнего сервиса *CloudMade*. Модуль поставщика *GPS* передает в систему данные о фактическом месторасположении грузовиков, основываясь на данных бортовых устройств *GPS*.

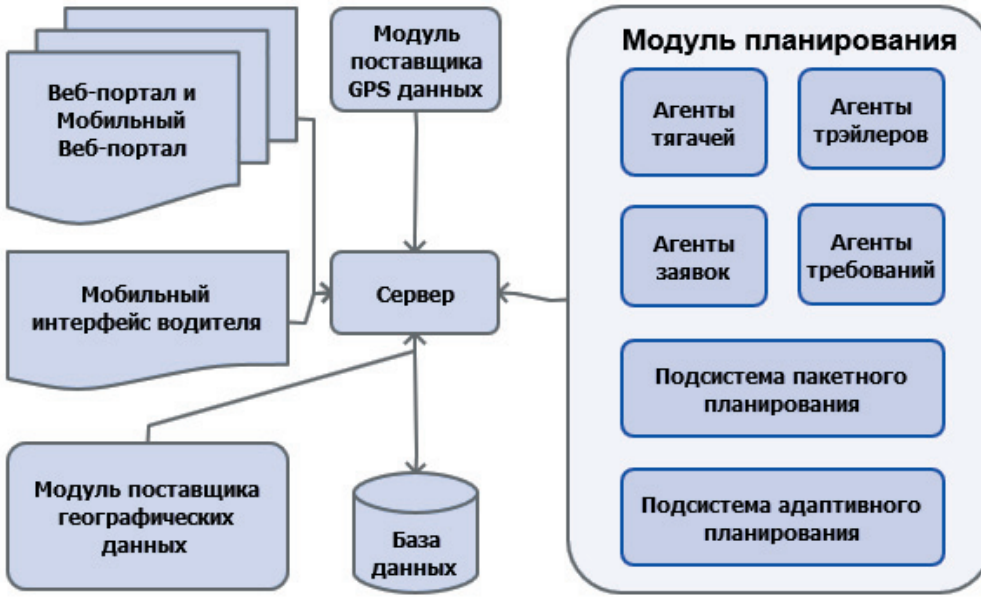


Рисунок 2 – Архитектура системы управления сборными грузовыми перевозками

Заключение

Интеллектуальная мультиагентная система управления внутрирегиональными грузоперевозками *SmartLogistics* позволяет решить поставленные задачи: составление сборок грузов, назначение ресурсов на их доставку, построения близких к оптимальным маршрутов развозки, построения, мониторинга и актуализации плана перевозок и т.д.

В дальнейшем планируется реализация возможности предоставления функциональных возможностей системы по модели «программное обеспечение как услуга» (*SaaS - Software as a Service*). Такой подход сделал бы возможным использование системы небольшими транспортными компаниями, не имеющими возможности покупки полноценного решения, что особенно актуально на рынке внутрирегиональных перевозок.

Кроме этого планируется реализация автоматической корректировки построенного плана с учетом актуальных данных, поступающих от бортовых *GPS/ГЛОНАСС* устройств. Это позволит адаптивно уточнять план развозок, снизить нагрузку на водителей и диспетчеров, и как следствие повысить уровень сервиса для клиентов системы.

Список литературы

[1] Перспективы развития рынка дорожной инфраструктуры в России. – Режим доступа: http://www.kpmg.com/RU/ru/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/press-releases/Pages/Prospects-for-the-development-of-the-road-infrastructure-market-in-Russia.aspx (04.12.2013)

[2] Leung, J.: Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis. Chapman & Hall, CRC Computer and Information Science Series. – 2004.

[3] Stefan, V.: Meta-heuristics: The State of the Art, Local Search for Planning and Scheduling. / Nareyek, A. (eds.) // ECAI 2000 Workshop, Germany, August 21, 2000/ Springer-Verlag, Germany. – 2001.

[4] \Wooldridge, M. An Introduction to Multi-Agent Systems. John Wiley & Sons. – 2002.

[5] Bonabeau, E., Theraulaz, G. Swarm Smarts. What computers are learning from them? Scientific American. – 2000, 282(3). – P. 54-61.
[6] Скобелев П. О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, управление, автоматизация. – 2011. № 12. – С. 33-46
[7] Амелина Н., Лада А., Майоров И., Скобелев П., Царев А. Исследование моделей организации грузовых перевозок с применением мультиагентной системы для адаптивного планирования мобильных ресурсов в реальном времени. // Проблемы управления. – 2011. №6. – С. 31-37
[8] Diyazitdinova A., Ivashenko A, Skobelev P., Tsarev A., Martyshkin D., Syusin I. Multi-Agent Platform for Full Truck Load Scheduling // Interactive Systems and Technologies: The problems of Human-Computer Interaction. Volume III. – Collection of scientific papers. – Ulyanovsk: UlSTU, 2009. – P.132–143.
[9] Н.О. Амелина, А.Н. Лада, И.В. Майоров, П.О. Скобелев, А.В. Царев. Исследование моделей организации грузовых перевозок с применением мультиагентной системы для адаптивного планирования мобильных ресурсов в реальном времени // Проблемы управления. – № 6, 2011. – С. 31-37.
[10] Oleg Granichin, Petr Skobelev, Alexander Lada, Igor Mayorov, Alexander Tsarev. Comparing adaptive and non-adaptive models of cargo transportation in multi-agent system for real time truck scheduling. – Proceedings of the 4th International Conference on Evolutionary Computation Theory and Applications (ECTA'2012), October 5-7, 2012, Barcelona, Spain. – SciTePress, 2012. –P. 282-285.
[11] Oleg Granichin, Petr Skobelev, Alexander Lada, Igor Mayorov, Alexander Tsarev. Cargo transportation models analysis using multi-agent adaptive real-time truck scheduling system // Proceedings of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART'2013), February 15-18, 2013, Barcelona, Spain. – SciTePress, Portugal, 2013, Vol. 2. – P. 244-249.
[12] Виттих В. А., Скобелев П. О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и Телемеханика. 2003. №1. – С. 162-169.

ХОЛОНИЧЕСКАЯ АРХИТЕКТУРА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ПРЕДПРИЯТИЯ

П.О. Скобелев[1], П. Лейтао[2], Д.Н. Казанская[3], Я.Ю. Шепилов[3]

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия,
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70
petr.skobelev@gmail.com

Polytechnic Institute of Bragança
Portugal, 1134, Bragança, Campus Sta Apolónia, Apartado 1134
E-mail: pleitao@ipb.pt,

ООО «НПК «Разумные решения»
Россия, 443013, Самара, Московское шоссе, 17, офис 1201
E-mail: shepilov@smartsolutions-123.ru

Ключевые слова: *оперативное планирование, мультиагентные технологии, p2p сети, рой, событие, адаптивное перепланирование*

Abstract

Principles of coordinated operative scheduling in the changing production environment using p2p-network of schedulers are described in this paper. Operative scheduling method based on the multi-agent technologies is discussed. Architecture and interaction protocols for the solution based on the swarm of schedulers are suggested. Swarm interaction analysis comparing to other cases (including KPI) is performed.

Введение

В современном производстве, гибкость и быстрая реакция на события важна не менее, чем тщательное планирование и распределение ресурсов. Ключевым фактором успеха является создание долгосрочных планов и краткосрочных расписаний с возможностью приспосабливать их к изменениям в производстве, равно как и доступностью ресурсов и запросов от потребителей.

Многие современные производственные компании меняют свою стратегию и поставляют маленькие партии специальных изделий, следуя рыночному спросу на индивидуальный подход и быстроменяющимся технологиям. В таком случае каждая новая партия привносит новые задачи для решения. Даже малейшие изменения в процессе производства приводят к тому, что люди работают медленнее с большим количеством ошибок. Если появляются ошибки на стадии проектирования изделий, то важно исправить и перепроверить их как можно быстрее, чтобы не задерживать фазу выхода в рабочий режим.

В целом, в ситуации, когда вещи меняются быстрее, чем люди могут заметить, научиться и адаптироваться, необходимо, чтобы каждая частица информации была доступна и получена заинтересованными людьми в нужный момент. В отношении производства это означает, что необходимо поддерживать расписание в обновленном состоянии постоянно, и работники должны сразу видеть изменения в производстве, касающиеся их. Также важно быстро и эффективно собирать отзывы у рабочих, чтобы понять, если есть угроза отклонения от запланированного процесса.

Необходимость в таком решении требует немедленного перепланирования в ответ на события, с учетом всех деталей процесса производства, включающих в себя много ограничений и критериев. При работе со сложными процессами производства с множеством взаимозависи-

мостей, много времени занимает полное изменение всего расписания, что делает невозможной обработку данных в реальном времени.

Именно по этой причине стоит применять адаптивный механизм к оперативному планированию. В этом случае, событие влияет только на часть расписания, и нет необходимости перестраивать весь результат. Такой подход изначально применяется в мультиагентных технологиях, где все элементы расписания представлены независимыми агентами и отношениями между ними [1,2]. При использовании мультиагентного подхода, реакция на события становится намного быстрее.

Тем не менее, даже использование мультиагентного подхода не всегда помогает при возросшей сложности и масштабе производства. Для больших предприятий или группы предприятий, где все процессы взаимосвязаны, предлагается использовать одноранговую (p2p) сеть планировщиков [3]. В этом случае, каждый планировщик несет ответственность за полуавтономный производственный цех или небольшую компанию. При организации в p2p-сеть, планировщики согласовывают свои действия, для достижения выполнимого устоявшегося расписания. События изначально обрабатывают локально, а далее они распространяются по p2p-сети только в случае необходимости.

Данный подход реализован в проекте ARUM, который проводится в рамках Седьмой рамочной программы Европейской Комиссии. Основная задача проекта – оптимизация процессов и уменьшение влияния ошибок на стадии ввода продукта в производство, а также в мелкосерийном производстве. В частности, тестирование и аппробация создаваемого решения, а также новых подходов, будет производиться для набирающего обороты производства Airbus A350.

Для этого консорциумом партнеров, включающим в себя ведущие машиностроительные предприятия в области авиастроения (Airbus, Iacobucci) и ряд исследовательских организаций и институтов, являющихся лидерами в области мультиагентных технологий (Университет Манчестера, Чешский Университет Праги и т.д.) предложен ряд новых модулей и технологий, составляющих единую систему [4,5], которая подробнее рассмотрена ниже.

1 Современная организация предприятий

В настоящее время производство становится все более распределенным: вместо концентрации всего процесса в одном цехе или на одной фабрике он разделен на части, которые выполняются разными подразделениями или даже переданы другим компаниям. Таким образом, создание согласованного расписания, которое будет учитывать, как общий крайний срок, так и распределение ресурсов по цехам или фабрикам, которые участвуют в процессе производства и которое будет обновляться в соответствии с текущей ситуацией, становится важным фактором производственного процесса.

В то же время, для современного бизнеса важна быстрая реакция на события, даже без полностью оптимизированного и полноценного плана на весь процесс производства. Таким образом, мультиагентная p2p-сеть, основанная на оперативном планировании, должна составлять расписание с достаточной устойчивостью (связность между несколькими планировщиками) в течение ограниченного временного отрезка.

Планировщики p2p-сети могут включать планировщики на одном уровне деталей процесса (с горизонтальными переговорами между ними) и планировщики, ответственные за различные временные горизонты и уровни деталей (например, оперативный и стратегический уровни ведут вертикальные переговоры).

Во всех случаях, протоколы сообщения между планировщиками должны следовать принципу «насколько можно – локально, насколько нужно – глобально». Такой подход минимизирует взаимодействие между планировщиками настолько, насколько это возможно для решения проблемы силами одного из них.

Обработка событий внутри планировщиков и p2p-сети в целом должна быть адаптивной и перестраивать только ту часть расписания, на которое влияет это событие.

Другие требование к современному производству включают в себя поддержку масштабируемости, экономически эффективный сбор информации через унаследованные системы (ERP, MES, SCADA, DCS), гибкость и поддержку быстрого принятия решений, поддержку моделей фабрик, ориентированных на сервисы, а также интеграцию с сенсорными сетями.

Входные данные для планирования состоят из спецификации процессов производства (затрат, продукции и взаимозависимости), требования к ресурсам и навыкам процессов, политика процессов, спецификация доступных ресурсов и определение заказов. Все изменения входных данных должны быть описаны как события.

Каждый планировщик сети должен работать с данными, относящимися к определенному отделу или организационной единице и строить для них устойчивое расписание (ресурсы, распределенные на определенные работы заказов и время). Расписания различных отделов (цехов) должны быть согласованы до известной степени, но предполагается, что полное согласование может занять неопределенное время, и иногда оно не достигаемо между двумя последовательными событиями. Таким образом, необходима возможность использовать текущие результаты, с учетом определенной измеренной устойчивости, а затем получить уведомление при получении лучшего результата.

2 Методы решения

Для решения задач, поставленных в рамках проекта, была предложена схема распределенной архитектуры системы, центральным элементом которой является интеллектуальная шина iESB, обеспечивающая связь модулей между собой (Рис. 1).

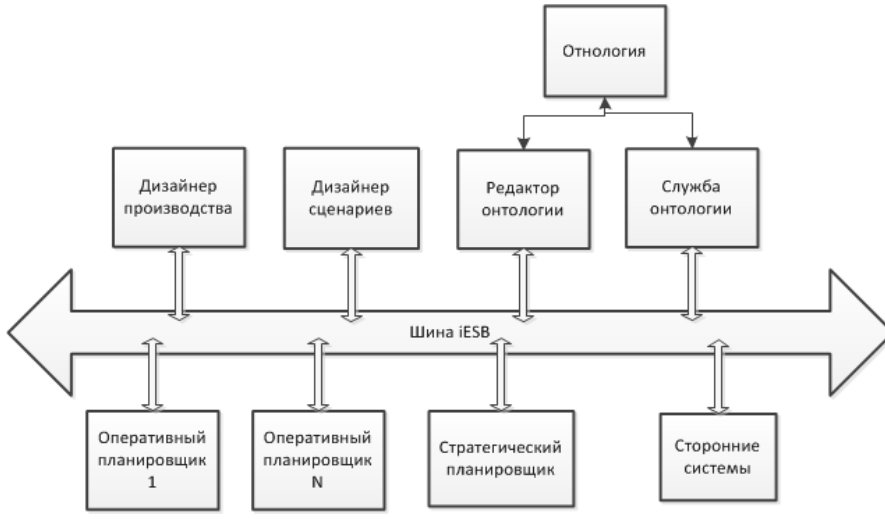


Рисунок 1 – Структура системы

Интеллектуальная шина состоит из нескольких служебных модулей и сервисов, обеспечивающих корректную работу модулей (авторизацию, подключение и удаление модулей, управление правами пользователей и т.д.), не рассматривающихся в данной статье.

Помимо этого, интеллектуальная шина отвечает за сбор данных из существующих (сторонних) систем предприятия, перевод данных в общий формат, понятный всем компонентам системы, и передачу данных другим модулям.

Для того, чтобы обеспечить общий формат данных, используемых на проекте, было предложено использовать онтологию машиностроения как универсальный инструмент описания предметной области. Онтология содержит концепты предметной области, их атрибуты и отношения между ними. В рамках проекта ARUM предложена структура онтологии, состоящая из двух частей: базовая онтологии машиностроения и ее расширений (онтологии событий, онтологии гидравлики, онтологии механической сборки и т.д.), что делает ее достаточно гибкой для использования в разных отраслях и, как следствие, на разных предприятиях. Базовая онтология машиностроения практически не изменяется, в то время как ее расширения постоянно дополняются и изменяются самими пользователями системы с помощью встроенного редактора онтологий. Подобный подход позволяет иметь актуальную онтологическую картину предприятия [6].

Для того чтобы данные, поступающие компонентам системы, имели общий формат, соответствующий существующей онтологии, выделен специальный модуль – служба онтологии, которая отвечает за преобразование данных из внешних систем в необходимый вид.

Тесно связан с использованием онтологии дизайнер производства – модуль, позволяющий пользователям визуально описать текущее состояние (модель производства) как завода в целом, так и отдельного цеха. На экране модуля пользователь может создать план расположения ресурсов в цеху, задав нужные станки, оборудование, персонал. Также пользователь может добавить и описать более абстрактные понятия, такие как используемы в данном цеху технологии, длительность транспортировки и т.д. После создания, модель производства автоматически наполняется данными из существующих систем предприятия. Недостающие данные пользователь может ввести вручную.

Описанная модель производства может затем использоваться дизайнером сценариев. Основная задача данного модуля – описание развития событий для моделирования и игр «что-если». В дизайнере сценариев пользователь выбирает текущий срез состояния модели – сцену, на которой будут в дальнейшем происходить генерируемые события. Далее, он задает механизмы и правила возникновения событий и запускает непосредственно моделирование. Результаты моделирования затем сравниваются по ключевым показателям и выбираются наиболее эффективные стратегии и способы организации производства.

Однако ядром системы являются взаимодействующие между собой планировщики – оперативный и стратегический. Оба планировщика используют одинаковый мультиагентный подход, в котором задачи и ресурсы представлены в виде агентов – автономный сущностей с собственными приоритетами и интересами. Например, агент ресурса рабочего хочет быть полностью загружен задачами, которые позволяют ему расти и обеспечивают получение премии. Агент задачи хочет быть назначен на самого талантливого рабочего. В процессе взаимодействия и переговоров агенты достигают компромисса и получается оптимальное расписание.

Преимуществом подобного подхода является то, что он обеспечивает быструю реакцию на непредвиденные события: любое изменение в системе вызывает новую волну переговоров агентов, продолжающуюся до тех пор, пока не будет получено новое оптимальное расписание.

В то время как оперативный планировщик работает непосредственно с задачами, назначаемыми на конкретные ресурсы, стратегический планировщик оперирует производственными мощностями, планируя общую загрузку подразделений предприятия (Рис. 2).

Оперативный и стратегический планировщики постоянно взаимодействуют, обновляя и корректируя планы. Подробнее данное взаимодействие рассмотрено в следующей главе.

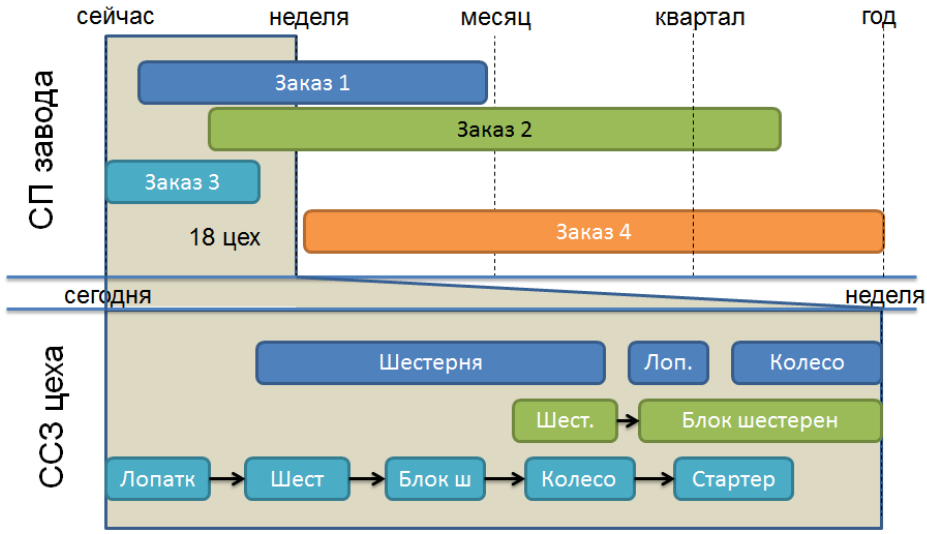


Рисунок 2 – Взаимодействие планировщиков

3 Холоническая архитектура в практике

В отличие от традиционного планирования ресурсов для работы предприятия, которые работают в пакетном режиме с циклом планирования длиной в день-неделю-месяц, предложенный подход является управляемым по событиям и работает непрерывно на сервере в реальном времени. Он адаптивно и индивидуально перестраивает расписание заказов и ресурсов, которые затронуты событиями.

3.1 P2P архитектура решения

Разработанный оперативный метод планирования в реальном времени основан на p2p-сети планировщиков, как это показано на Рисунке 3. Каждый планировщик реализован с помощью мультиагентных технологий как общей основы для создания сложных «совокупностей систем» агентов, поддерживающих баланс интересов агентов и групп агентов.

Эта сеть планировщиков представлена как рой или совокупность мультиагентных планировщиков, где у каждого цеха есть свой планировщик, ответственный за планирование работы цеха. Планировщики постоянно взаимодействуют друг с другом посредством p2p-сети, обмениваясь информацией о событиях, которые происходят в течение процесса производства и могут повлиять на выполнение заказа. p2p-сеть соединена с унаследованными системами, базой данных и онтологией с помощью встроенной Сервисной Шины Предприятия (СШП), таким образом давая возможность планировщикам находить необходимую информацию из этих источников. Следует отметить, что сеть соединена также с пользовательским интерфейсом системы, тем самым давая пользователю возможность изменять расписание вручную и вводить информацию о выполнении операции, задержках выполнения и несоответствиях.

Такая система обеспечивает быстрый отклик на новые события, проактивно улучшает оперативное расписание между событиями путем последовательных сдвигов и перераспределения ранее запланированных операций на другие ресурсы. В этом случае каждое даже «небольшое» событие может повлечь за собой большие изменения в расписаниях, которые рассматриваются как «неустойчивые равновесия» (так как система никогда не останавливается), распространяющиеся на все расписание цеха и также всю сеть планировщиков. Тем не менее, на практике такие «волны изменений» ограничены бонусами и штрафами виртуального рынка агентов и заканчиваются через несколько шагов.

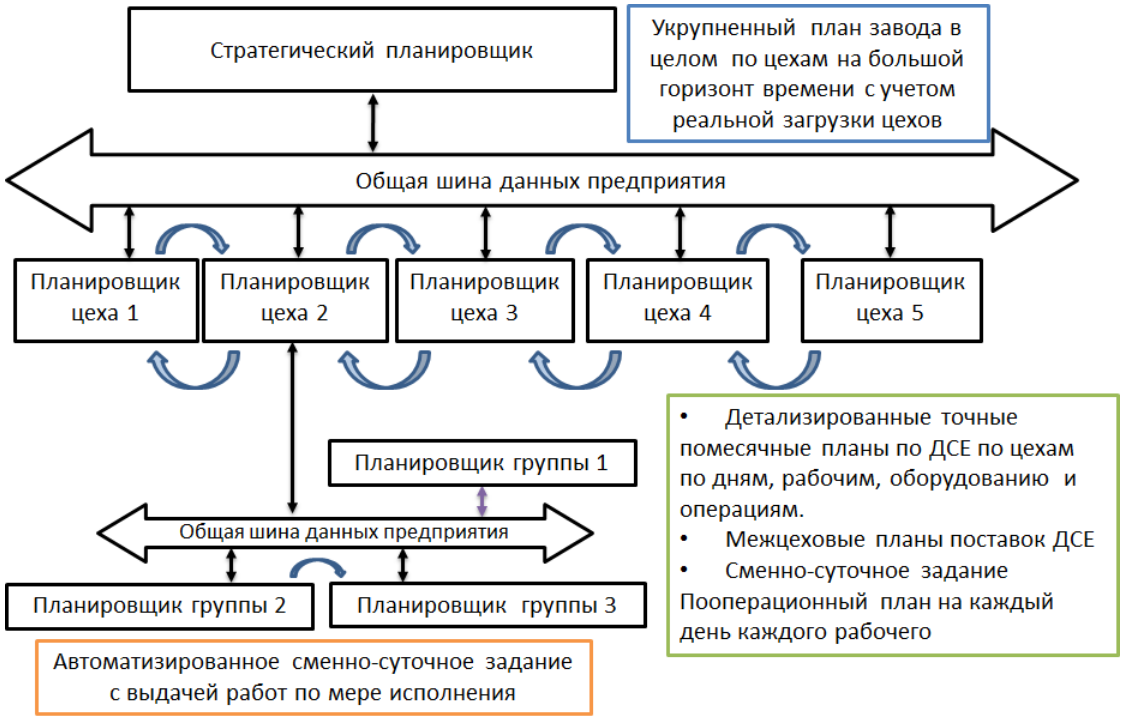


Рисунок 3 – Схема системы

3.2 P2P-согласование планировщиков

Несколько планировщиков могут работать параллельно, как это описано выше, и давать потенциально разные взгляды на одну и ту же ситуацию, поскольку каждый планировщик не учитывает всех деталей и внутренние расписания других цехов. Для того чтобы согласовать решений и получить полное устойчивое расписание, они должен вести переговоры о решениях друг с другом. В рамках данной работы, мы первоначально рассмотрим взаимодействие между оперативными планировщиками (горизонтальное сообщение).

Если определенному планировщику необходимо рассмотреть операцию, которая должна быть выполнена другим цехом, он должен спросить планировщика того цеха о точной стоимости и других параметрах выполнения. Только планировщик цеха, ответственного за выполнение, знает характеристики ресурсов, их доступность и уже запланированные операции. Он может решить, что запрошенное время выполнения не подходит и предложить другой, более выгодный, вариант выполнения.

Пример схемы взаимодействия планировщиков цехов представлен на Рис. 4. Цифрами обозначена последовательность взаимодействий, стрелками – направление связи.

Для минимизации количества сообщений, пересылаемых между планировщиками (и затраченного на них времени), согласование может быть проведено совокупно, с учетом многих операций единовременно, вместо согласования каждой операции в процессе планирования.

Необходимо отметить, что благодаря распределенной природе системы и постоянно поступающим событиям, расписание возможно никогда не будет полностью устойчивым. Так как события возникают в системе часто, сбор актуальной информации со всех планировщиков и терминалов может занять много времени (даже бесконечно). Таким образом, пользователю необходимо решить, когда остановить процесс оптимизации.

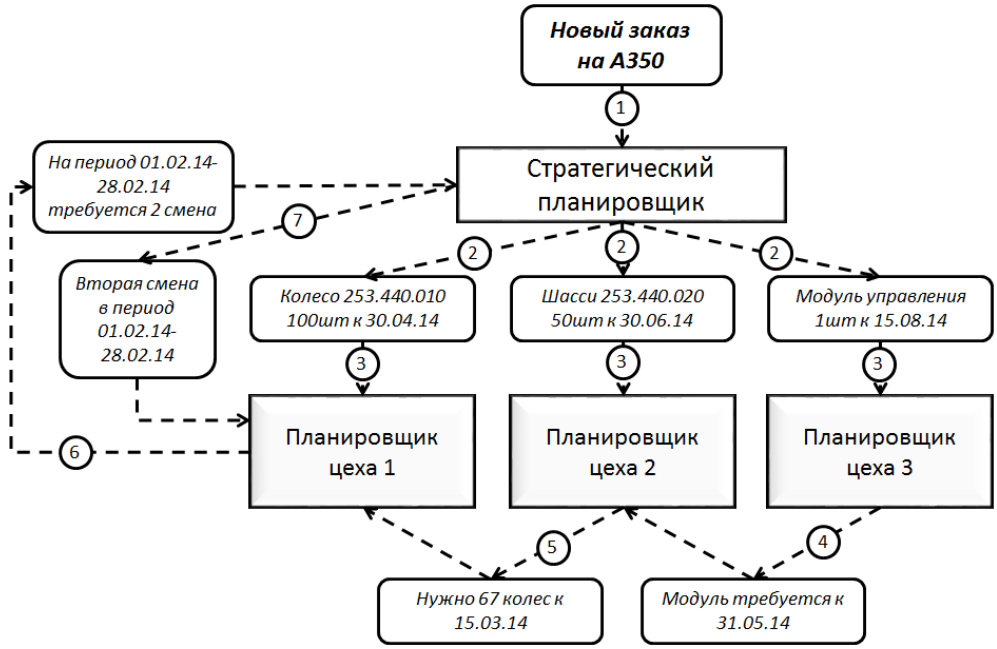


Рисунок 4 – Взаимодействие планировщиков цехов

4 Перспективы развития, ожидаемые результаты

Основным преимуществом разрабатываемой системы является то, что она объединяет разрозненные участки работы предприятия в единое целое, предоставляя менеджменту полную картину. P2P-взаимодействие оперативных планировщиков и стратегического планировщика обеспечивает постоянную актуальность планов предприятия, в то время как интеграция с существующими системами (кадровыми, создания технологий, учета материалов и т.д.) позволяет минимизировать трудозатраты на ввод необходимых данных в систему.

Дополнительным эффектом внедрения системы является увеличение прозрачности, сокращение бумажного документооборота, повышение инициативы на местах. Кроме того, в рамках работы над проектом планируется изучение и применение лучших стратегий и практик оптимизации производства, что позволит обеспечить уровень управления предприятиями, соответствующий самым высоким современным стандартам.

Помимо этого, в результате проекта планируется достичь следующих показателей (Таблица 1).

Таблица 1. Ожидаемый эффект внедрения системы

	Затраты на планирование	Затраты на ввод в производство	Задержка ввода в производство	Объемы производства
Ввод в производство новой модели самолета	-10%	-30%	-30%	+15%
Мелкосерийное производство	-10%	-20%	-20%	+15%
Другие области приложения	-15%		-15%	-

Кроме того, дополнительным эффектом внедрение системы является накопление знаний о производстве, что особенно актуально для случая ввода новой продукции. Возможность ак-

кумулировать знания о сложившихся проблемных ситуациях и способах их преодоления дает неоценимую поддержку, позволяя более оптимально перестраивать расписание, используя предыдущий опыт, тем самым снизить расходы на участие персонала, переналадку оборудования и т.д.

Заключение

Предложенный подход потенциально обеспечивает быстрое сообщение между планировщиками определенных цехов или фабрик, что дает одновременный доступ к согласованной информации о текущей ситуации на всех организационных единицах. Вместе с использованием методов и алгоритмов планирования p2p-сеть гарантирует, что каждый сотрудник цеха получит наиболее актуальное расписание.

Будущее развитие предложенного решение будет направлено на улучшение скорости взаимодействия планировщиков, усовершенствование протоколов сообщения и выполнение вертикального согласования (между стратегическими и оперативными планировщиками).

Прототип p2p-сети планировщиков будет включен в первый прототип разработанного решения для АРУМ. Механизмы взаимодействия будут использоваться не только для общения планировщиков, но и для соединения с другими модулями, такими как модуль проверки текущего состояния, приборная панель, прибор стратегического планировщика. Планировщики также смогут брать информацию из наследованных систем и получать информацию о процессах и обновлении технологий из онтологии.

Благодарности

Исследование было проведено в рамках European Union Seventh Framework Programme FP7/2007-2013, грант №314056.

Список литературы

[1] Скобелев П. О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, управление, автоматизация. 2011. № 12. С.33-46

[2] П.О. Скобелев. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Приложение к теоретическому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии». – 2013. №1. – С. 1–32.

[3] Иващенко А. В., Карсаев О. В., Скобелев П. О., Царев А. В., Юсупов Р. М. Мультиагентные технологии для разработки сетецентрических систем управления. // VI Всероссийская научно-практическая конференция "Перспективные системы и задачи управления", 4 - 6 апреля 2011 г. Таганрог. – Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №3 (116). С. 11-23.

[4] Cesar A. Marin, Pavel Vrba, Paulo Leitao, Lars Monch, Georgios V. Lioudakis, Daria Kazanskaia, Vadim Chepegin, Liwei Liu, Jose Barbosa, Alexander Tsarev, Petr Skobelev, and Nikolay Mehandjiev. Application of Intelligent Service Bus in a Ramp-up Production Context // Proceedings of the 25th International Conference on Advanced Information Systems Engineering (CAiSE'13), June 17-21, 2013, Valencia, Spain. P. 33-40.

[5] Paulo Leitão, José Barbosa, Pavel Vrba, Petr Skobelev, Alexander Tsarev, Daria Kazanskaia. Multi-agent System Approach for the Strategic Planning in Ramp-up Production of Small Lots // Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2013), October 13-16, 2013, Manchester, UK. – 2013. – P. 4743-4748.

[6] Alexander Tsarev, Daria Kazanskaia, Petr Skobelev, Sergey Kozhevnikov, Vladimir Larukhin, Yaroslav Shepilov. Knowledge-driven adaptive production management based on real-time user feedback and ontology updates // Proceedings of the EEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2013), October 13-16, 2013, Manchester, UK. – 2013. – P. 4755-4759.

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ОЦЕНКЕ СТЕПЕНИ АДАПТИВНОСТИ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

П.О. Скобелев[1], И.В. Майоров[2], Е.В. Симонова[1], А.В. Царев[3]

[1]ООО «НПК «Разумные решения»
443013, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 17, офис 1201,
тел./факс.: +7 (846) 279-37-78
petr.skobelev@gmail.com,
simonova@smartsolutions-123.ru,

[2]Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия,
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70
imayorov@smartsolutions-123.ru,

[3]ООО «НПК «Мультиагентные технологии»
443013, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 17, офис 1201,
тел./факс.: +7 (846) 279-37-85
alexander.v.tsarev@gmail.com

Ключевые слова: *мультиагентные системы, управление ресурсами, адаптивность, реальное время*

Abstract

A method for evaluation the adaptability level of multi-agent systems for enterprise resource management is presented. Demand agents and capability agents interact in such systems through the messaging. Each agent is getting the individual bonus and penalty functions, and the functions of satisfaction based on a set of criterias. The system tends to achieve a state of harmony, that is to maximize the total satisfaction of all agents. To measure adaptability level the relation between delta of value and time of transition period is introduced. The developed prototype of adaptive platform for scheduling demonstrates the dynamics of reaching system satisfaction. The examples of adaptive scheduling are modeled. Recommendations for future development are presented.

Введение

Современные методы «умного» управления предприятиями в реальном времени требуют новых подходов к управлению [1], новых моделей и методов планирования ресурсов [2], а также новых инструментальных средств для их воплощения [3].

Однако, существующие системы управления и планирования производственными ресурсами (SAP, Oracle, Microsoft Dynamics AX, Infor ERP SyteLine, Quintiq, Damco и др.) ориентируются на применение “пакетных” методов – когда большинство заказов на работы и их характеристики известны заранее и требуется составить расписание на определенный период вперед, что, как правило, делает создаваемый план плохо реализуемым под действием всевозможных непредвиденных событий, например, приход нового заказа, поломка станка и т.д.

Кроме того, этот переход связан с принципиальными недостатками централизованного планирования – детерминированностью и проблемами учета многочисленных факторов сложности, отсутствием достоверной информации о текущей ситуации, потерей адекватности расписаний с течением времени и т.д. Современные производственные системы обладают слишком высокой сложностью, состоят из десятков и сотен пространственно-распределенных под-

систем, текущее состояние которых в каждый момент зависит от множества внутренних факторов. С другой стороны, внешние взаимодействия – изменения в потоках заказов и их характеристик, цен на ресурсы и путей снабжения, цепочек поставок, не учтенные в первоначальном плане, также приводят к относительно быстрой потере пригодности первоначального расписания.

Основной причиной усиливающегося разрыва между ожидаемыми и фактическими результатами планирования являются многие ограничения сложившихся классических бюрократических форм организации предприятий, препятствующих переходу к новым более современным сетевым формам управления производством, а также недостатки существующих программных систем автоматизации производственных и управленческих процессов на предприятиях.

Поэтому становится особенно актуальной и значимой задача создания адаптивных систем управления ресурсами предприятий, которые бы поддерживали работу в режиме реального времени для обеспечения постоянной адекватности расписания.

В этой связи для таких систем возникает вопрос оценки степени адаптивности таких систем к непредвиденным внешним и внутренним событиям, воздействующим на производственную систему и постоянно выводящую ее из состояния равновесия.

1 Применение мультиагентных технологий к задачам адаптивного производственного планирования

Под ресурсами предприятия можно понимать ресурсы в широком смысле – как производственные (станки, рабочие центры, технологические линии, участки и т.п.), так и людские, финансовые и т.д. Задача планирования ресурсов предприятия – распределение задач и отдельных работ по исполнителям, что во многом близко известным математическим задачам о назначениях, построения производственных планов предприятий и др. [4]. Традиционное централизованное планирование основано на мощных математических методах: линейном и нелинейном программировании, математическом и динамическом программировании, дискретной оптимизации, программировании в ограничениях, методах AI-нейросетей, генетических алгоритмах и других эвристиках и метаэвристиках [5,6].

Следует отметить, что все вышеперечисленные подходы восходят к централизованной пакетной модели планирования. Это означает, что как при динамическом поступлении новых задач, так и при декомпозиции или подвижках существующих, а также при изменении внешних условий требуется перерасчет существующих планов заново, что при больших задержках в расчетах может приводить к появлению значительных участков времени, когда непротиворечивого самосогласованного расписания нет вообще. Поэтому рассмотренные стандартные подходы к планированию динамически меняющихся проектов в общем поле ресурсов не могут в достаточной мере соответствовать потребностям практики.

Одним из способов преодоления недостатков централизованного планирования является использование мультиагентных систем [7].

Мультиагентные технологии (МАТ) начали активно развиваться в конце прошлого века с ростом производительности компьютеров и постепенным формированием сетевых структур на стыке достижений объектного программирования, искусственного интеллекта, параллельных вычислений, телекоммуникаций. Реализуемые на основе МАТ мультиагентные системы представляют собой сети слабо связанных решателей частных проблем (агентов), которые вместе способны решать такие проблемы, которые не под силу ни одному из агентов в отдельности. МАС состоит из множества агентов, помещенных в общую среду, от которой они получают данные, отражающие события, происходящие в среде, интерпретируют их и воздействуют на среду.

Результаты планирования, получающиеся при применении МАС, еще пока уступают по оптимальности “точным” методам в узком “коридоре” выбранных постановок решаемых задач, но уже выигрывают у них в адаптивности, при добавлении предпочтений и ограничений, не укладывающихся в “прокрустово ложе” известных постановок, а также по быстродействию, поскольку, как правило, не требуют полного пересчета при новых событиях.

В мире уже известен ряд первых промышленных мультиагентных систем, реализованных для машиностроительных предприятий Production 2000+, BHP Billiton, Shop Modelarna Liaz, SkodaAuto и др. [8].

Важнейшим достоинством мультиагентной технологии в распределении, планировании и оптимизации ресурсов является возможность адаптивного построения и исполнения планов, когда план не строится всякий раз заново при возникновении новых событий, как это делается в классических методах оптимизации, а только адаптивно корректируется по мере появления событий в реальном времени, при необходимости (и при наличии ресурса времени), на сколь угодно длинную цепочку изменений.

Такая автоматическая адаптация планов, причем часто в ходе их исполнения, осуществляется непрерывно путем выявления конфликтов в расписаниях, проведения переговоров и достижения компромиссов между агентами заказов и ресурсов, что и позволяет системе работать в реальном времени.

Ряд практических примеров созданных нами мультиагентных систем управления ресурсами можно найти в обзорах [7, 9].

2 Адаптивность в сложных системах

Под адаптивной системой понимается самоприспосабливающаяся система, автоматически изменяющая алгоритмы своего функционирования и (иногда) свою структуру с целью сохранения или достижения оптимального состояния при изменении внешних условий.

Существуют десятки различных математических определений адаптации и постановок задач адаптивного управления, а также типов адаптивных систем.

Формальное определение адаптивности, принятое многими исследователями сложных систем, не привязанное к использованию конкретных механизмов адаптации, впервые сформулировано Л. Заде в [10].

Рассматривается система S, имеющая своим входом функцию времени $\boldsymbol{g(t)}$: $R \rightarrow R^m$ из класса $G_v\{\boldsymbol{g(t)}\}$. Семейство входов G_v представляет собой источник, возможно, но не необходимо, снабженный вероятностной мерой, определенной на этом семействе, так, что G_v можно рассматривать как случайный процесс, v- переменная индексации. Качество работы системы S задано функцией $Q(v)$: $R \rightarrow R$, зависимой от v. Вводится критерий допустимости качества в виде: $Q(v) \in \Omega$, где Ω - некоторый класс функций. Информация о системе в рамках введенных обозначений может быть рассмотрена как отношение принадлежности $v \in N$, где N есть определенное множество значений переменной v. Тогда понятие адаптивности как свойства динамической системы через ее внешнее проявление можно дать следующим определением.

Определение. Система S называется адаптивной по отношению к семейству $\{G_v\}$ и Ω, если $Q(v) \in \Omega$ для любого источника семейства $\{G_v\}$, $v \in N$. Другими словами, система S адаптивна по отношению к множеству N и классу Ω, если она отображает множество N в класс Ω, именно: $Q(v)$: $N \rightarrow \Omega$. Определение адаптивности по Л. Заде эквивалентно понятию допустимого поведения динамической системы S для семейства входных функций $\{G_v\}$. Неопределенность ограничена возможными семействами $\{G_v\}$, а допустимое поведение - соответствующим значением $Q(v)$.

К настоящему времени созданы многочисленные методы в нелинейной теории адаптивного управления сложными динамическими системами. Сложная динамическая система как объект управления может быть охарактеризована большой размерностью (сотни и тысячи

входных и выходных переменных), нелинейностью модели, неопределённостями, связанными с моделью, наличием внешних возмущений, сложными множественными целями функционирования и критериями качества [11].

В [12] исследованы многочисленные методы декомпозиции сложных систем, алгоритмы скоростного градиента и псевдоградиента для целевого функционала, геометрические подходы к задачам управления, управление по состоянию и др.

Разработаны также методы анализа и синтеза адаптивных нелинейных открытых систем, адаптивного регулирования взаимосвязанных систем с немоделируемой динамикой [13].

Значительное развитие получили адаптивные подходы к решению задачи управления вычислительными ресурсами в многопроцессорных системах, где целью является не только выполнение задачи как можно быстрее, но и планирование с учетом приоритета, с уменьшением энергопотребления, суммарного запаздывания, оптимизация стоимости выполнения и др. Различные методы разработаны в зависимости от гомогенности или гетерогенности систем процессоров, постоянной или переменной скорости вычислений. Различают собственно проблему распределения, т.е. на каком процессоре должна выполняться каждая задача и проблему приоритезации – выполнение с учетом статических или динамических приоритетов. Алгоритмы также учитывают типы задач, статистические модели потоков – периодические или спорадические, с заданными законами распределения. Анализ производительности систем и метрики подсчитываются введением ограниченной функции спроса и функций загрузки процессоров на каждом интервале времени. Конкретные алгоритмы реального времени сравниваются с оптимальными версиями пакетного детерминированного планирования, когда все характеристики поступающих задач априорно известны [14].

Для оценки адаптивности многопроцессорных систем часто используется время реакции системы на события поступления задач [15]. В эвристической оценке применяется метод учета и балансирования интересов уже выполняющихся задач и задач, ожидающих в очереди.

Непрерывный мониторинг состояния агентов дает возможность находить критические пути в графе задач и оперативно производить перераспределение ресурсов [16].

По результату анализа предлагается выделять адаптивность первого рода, связанную с реорганизацией связей между заказами и ресурсами при поступлении новых событий (самоорганизацию ресурсов) во внешней среде, а также второго рода, связанную с приобретением знаний о внешней среде, которые напрямую влияют на принятие решений по управлению ресурсами.

3 Мультиагентная платформа “Разумных решений” для построения адаптивных мультиагентных систем управления ресурсами

Для быстрого построения прототипов и применения мультиагентных технологий в различных отраслях планирования ресурсов в НПК ”Разумные решения” разрабатывается мультиагентная платформа на основе сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей).

Мультиагентный подход к разработке интеллектуальной систем управления ресурсами основан на использовании концепции сетей потребностей и возможностей, а также метода сопряженных взаимодействий для управления ресурсами предприятий в реальном времени на виртуальном рынке, которые описаны в [17,18].

Согласно данному подходу, каждой заявке, заказу и другим потребностям и возможностям (производственные ресурсы, станки, оборудование, транспортные средства, персонал) присваиваются программные агенты, которые договариваются с другими агентами и планируют выполнение заказов “точно-в-срок” (JIT) или “как можно раньше” (ASAP), что позволяет обеспечить поддержку коллективного согласования и принятия решений в реальном времени на различных этапах планирования и исполнения производственного плана в различных подразделениях, работающих совместно над решением общих задач.

Постоянный поиск соответствий между конкурирующими и кооперирующими агентами потребностей и возможностей на виртуальном рынке системы позволяет строить решение любой сложной задачи как динамическую сеть связей, гибко изменяемую в реальном времени.

На рисунке 1 представлен интерфейс прототипа платформы для создания МАС адаптивного управления ресурсами.

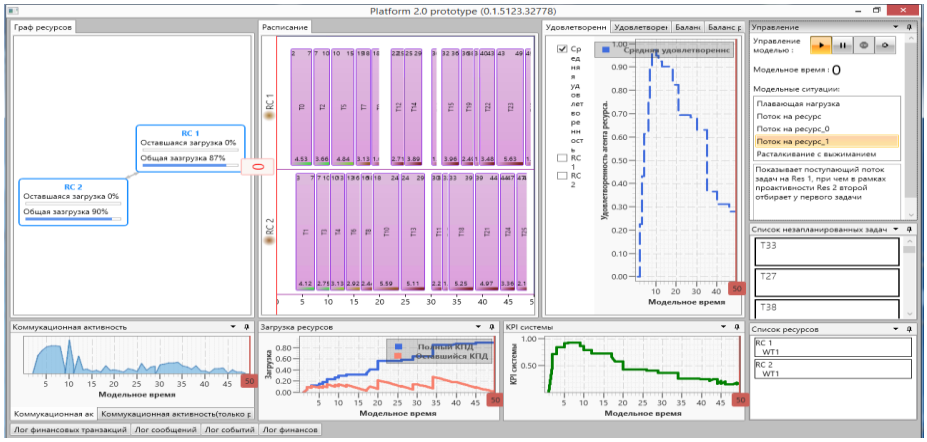


Рисунок 1– Общий вид интерфейса МАС платформы

При этом в развиваемом подходе решение любой сложной задачи, в частности, распределения, планирования или оптимизации ресурсов, выстраивается в ходе переговоров агентов путем приближений в ходе итераций, от самого грубого, простого и быстрого решения – к более сложным и лучшим решениям, требующим больше времени, т.е. обеспечивается управление сходимостью решения, что особенно важно в условиях реального времени.

Такой подход применяется, прежде всего, для решения задач многокритериального планирования, в числе которых традиционно рассматривают качество продукции или услуг, время на их реализацию, цену (себестоимость), риски и другие. В предлагаемом подходе система сама, отталкиваясь от достигнутых показателей и текущей ситуации с заказами и ресурсами, выбирает себе цели для улучшения вектора своих параметров, и в качестве первоочередной цели для улучшения своего состояния берет тот критерий, по которому имеются наихудшие значения показателей.

4 Задача максимизации удовлетворенности в мультиагентной системе заказов и ресурсов

Динамическая оптимизация удовлетворенности агентов в ПВ-сети формулируется следующим образом.

Поступающие заказы (заявки или задачи) имеют собственные критерии (например, срок, себестоимость, риск, приоритет, тип оборудования для выполнения, требуемая квалификация исполнителей и другие), причем их важность может изменяться в ходе выполнения проекта.

Пусть каждый заказ j имеет несколько индивидуальных критериев x_i и предполагаемых идеальных значений x_{ij}^{id}. У каждого агента заказа j подсчитывается функция удовлетворенности [0,1] по компоненте i («виртуальная ценность»), задаваемая, например, в виде кусочно-линейной функции $f_{ij}^{task}(x_{ij}\text{-}x_{ij}^{id})$. В большинстве случаев эта функция имеет колоколообразную форму с максимумом в точке предполагаемого идеального значения. В качестве суммарной удовлетворенности результатом планирования для каждого заказа оценивается сумма удовлетворенностей по каждому критерию i с заданными весовыми коэффициентами α_{ij}^{task}.

Надлежащим выбором знаков и вида функций можно свести задачу каждого агента заказа к задаче увеличения (максимизации) удовлетворенности y_j^{task} заказа j:

$$y_j^{task} = \sum_i \alpha_{ij}^{task} \cdot f_{ij}^{task}(x_{ij} - x_{ij}^{id}),$$

где $\forall j$ весовые коэффициенты нормируются:

$\sum_i \alpha_{ij}^{task} = 1$.

Верхний индекс *task* означает, что величины относятся к агентам заказов(задач).

Для всей мультиагентной системы оперативного распределения заказов по ресурсам аналогично может быть сформулирована задача нахождения таких состояний агентов x_{ij}^* заказов j, чтобы максимизировать суммарную удовлетворенность всех заказов:

(1) $$y^{task} = \sum_j \beta_j^{task} \cdot y_j^{task} = \sum_j \beta_j^{task} \sum_i \alpha_{ij}^{task} \cdot f_{ij}^{task}\left(x_{ij} - x_{ij}^{id}\right),$$

$$y^{task^*} = \max_{x_i}(y^{task}),$$

где β_j^{task} – вес заказа, позволяющий устанавливать и динамически менять приоритеты.

Агенты ресурсов могут стремиться, например, к продаже слотов времени по максимальной цене, минимизации времени простоя, поддержания загрузки заказами на заданном уровне. Поэтому аналогичным образом целевая функция удовлетворенности может быть задана и со стороны ресурсов-исполнителей по критериям z_k, с функциями удовлетворенностей $f_{kl}^{res}(z_k - z_{kl}^{id})$, весом α_{kl}^{res} критерия k для ресурса l и значимостью ресурса β_l^{res} для системы (что аналогично весу заказов для функций агентов заказов):

(2) $$y^{res} = \sum_l \beta_l^{res} \cdot y_l^{res} = \sum_l \beta_l^{res} \sum_k \alpha_{kl}^{res} \cdot f_{kl}^{res}\left(z_{kl} - z_{kl}^{id}\right),$$

$$y^{res*} = \max_{z_k}(y^{res}),$$

(3) $z_{kl} \in D^K$, $x_{ij} \in D^I$ $\forall i, k, I = Dim(D^I), K = Dim(D^K)$.

Переменные x и z принадлежат некоторым областям пространства критериев для заказов и ресурсов, I,K – размерности соответствующих пространств критериев.

Верхний индекс *res* означает, что величины относятся к агентам ресурсов.

Если рассматривать окрестность идеальных значений, то чем ближе запланированные значения критериев к идеальным x_{ij}^{id} и z_{kl}^{id}, тем выше удовлетворенность агентов всей системы (т.е. функции f_{ij}^{task} и f_{ij}^{res} имеют локальный максимум в 0):

(4) $y = y^{task} + y^{res},\ y \to max.$

Таким образом, в ПВ-сети агентов потребностей и возможностей решается задача оптимизации (1)-(4).

Для каждого агента можно задавать свой набор функций удовлетворенности агентов (рисунок 2).

С каждым агентом заказа также связан его “виртуальный счет”, при помощи которого он “покупает” слоты времени у агента ресурсов или выплачивает компенсацию другим агентам заказов. Динамическое состояние виртуальных счетов у агентов заказов определяется с помощью штраф/бонусных кусочно-линейных функций виртуальной стоимости, аналогичных функциям удовлетворенности, но имеющих другую форму и выраженных в единицах денежных средств. Функции стоимости слотов времени заданы у ресурсов в виде тарифной сетки (рисунок 3). Пример графика бонус/штрафных функций агентов задач показан на рисунке 4.

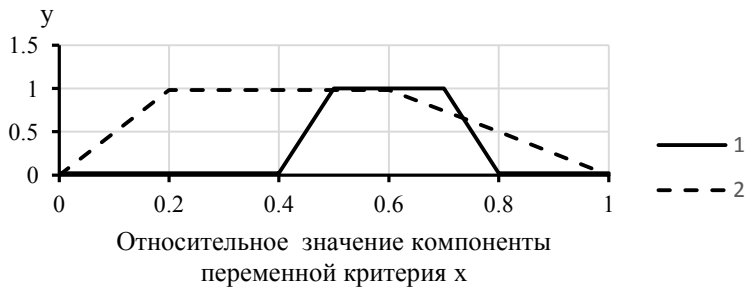


Рисунок 2 – Типичные графики удовлетворенности агента задачи (1) и агента ресурса (2). Критерием x для задачи является время выполнения, для ресурса – загрузка

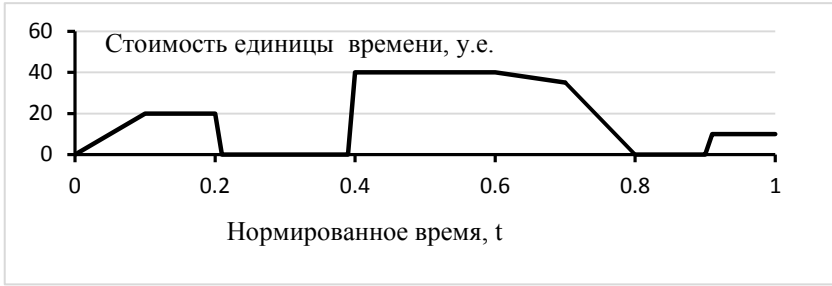


Рисунок 3 – Типичный график тарифа стоимости слотов времени агента ресурса

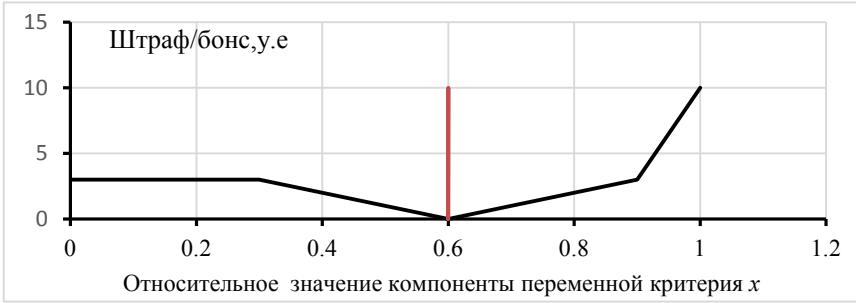


Рисунок 4 – Типичный график бонус/штрафных функций агентов задач

Агенты в системе путем обмена сообщениями стремятся повысить свою удовлетворенность, однако, это происходит лишь в том случае, если суммарная удовлетворенность агентов системы повышается и при наличии достаточного количества денежных средств на виртуальных счетах агентов для совершения операций изменения расписания.

5 Оценка уровня адаптивности

В ходе работы в мультиагентную систему поступают заказы, которые планируются для исполнения на ресурсах. Приходящие и уже ранее распределенные заказы динамически пере-

распределяются по ресурсам системы, поскольку агенты стремятся повысить свою удовлетворенность.

При появлении нового заказа, еще не распределенного системой, в первый момент времени удовлетворенность системы падает, т.к. пришедший агент не сразу находит лучшее место, а лишь через некоторое время общая удовлетворенность начинает расти за счет перепланирования и постепенного улучшения состояния агентов. Поэтому для оценки динамики мультиагентной системы предлагается подсчитывать среднюю удовлетворенность y агентов задач и ресурсов в зависимости от времени:

$$(5)\quad y(t) = \frac{\sum_j y_j^{task}(t) + \sum_l y_l^{res}(t)}{M(t)+N(t)}$$

где y_j^{task} – удовлетворенность агента j-й задачи, y_l^{res} – удовлетворенность агента ресурса l, $N(t)$ и $M(t)$ – число агентов задач и ресурсов соответственно. Эти величины зависят от времени, поскольку задачи приходят в систему, а ресурсы могут включаться и отключаться. Из (5) следует, что максимально возможным является значение, равное 1.

Предположим теперь, что в некоторый момент времени происходит скачкообразное падение производительности системы, например, отключение части ресурсов. Тогда средняя удовлетворенность агентов также упадет до некоторого значения y_1, но через интервал времени T стабилизируется на новом уровне y_2 за счет перепланирования (рисунок 5).

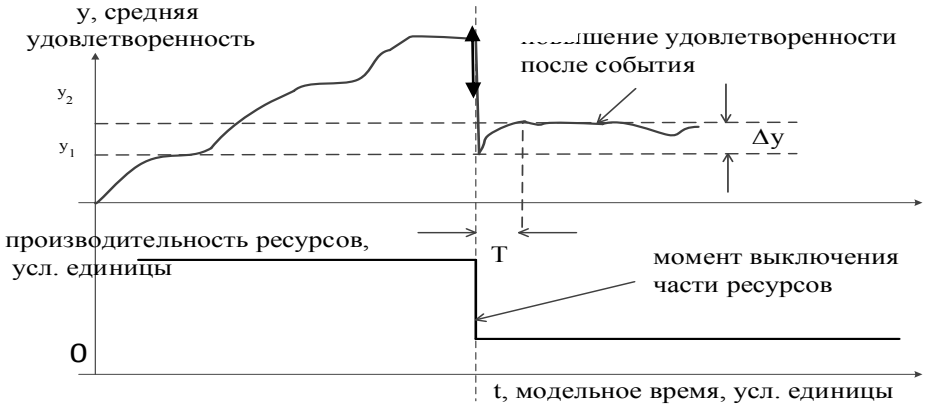


Рисунок 5 – Адаптивность системы по событию отключения части ресурсов
(после момента максимального спада средней удовлетворенности до уровня y_1 через время T МАС приходит к новому квазиравновесному состоянию y_2)

Введем безразмерную степень адаптивности γ мультиагентной системы, характеризующую скорость восстановления локального равновесия:

$$(6)\quad \gamma = (y_2 - y_1) \cdot \frac{h}{T}$$

где y_1 – минимальное значение удовлетворенности сразу после воздействия (до обработки изменений), y_2 – средняя удовлетворенность агентов системы после стабилизации решения (когда больше повысить удовлетворенность не удается), h – шаг времени моделирования, T – время восстановления равновесия средней удовлетворенности y_2. Подобный эффект частичного восстановления может наблюдаться не только при выключении ресурсов, но и при скачкообразном появлении новых потоков задач.

Фактически, речь идет о скорости переходного процесса, который позволяет восстановить состояние системы в случае возникновения возмущающего события, к числу которых могут относиться поломка любого ресурса, отзыв ранее размещенного заказа и т.д.

Важно отметить, что здесь ΔY – отклонение от ранее достигнутого максимума, т.е. безвозвратно потерянная величина ценности (удовлетворенности), а Δy – наоборот, какую ценность помогла система «спасти» пользователю путем адаптивного перераспределения ресурсов.

Разумеется, адаптивность МАС зависит от интенсивности внешних воздействий, например, при введении больших потоков задач, превосходящих производительность системы, спад удовлетворенности будет только нарастать со временем, поскольку эффект нарастания неудовлетворенности вновь поступивших агентов не будет покрываться частичным ростом из-за перепланирования.

Аналогично можно рассматривать адаптивность агентов задач γ^{task} и адаптивность агентов ресурсов γ^{res}. В идеальном случае, при любом изменении среднего уровня за один шаг времени моделирования степень адаптивности будет равна 1. Система, никак не реагирующая на воздействия, согласно (6), будет иметь значение γ=0.

6 Моделирование входных потоков задач

Рассмотрим результаты экспериментов по оценке степени адаптивности системы ресурсов, в любые узлы которой поступают заявки на обслуживание (выполнение).

Пусть в систему, состоящую из 2-х ресурсов различной производительности с функциями удовлетворенности и стоимостью слотов времени, аналогичными приведенным на рисунках 2 и 3, поступает пуассоновский поток задач, каждая из которых характеризуется объемом работы, временем поступления и предельным временем окончания. Типичные функции удовлетворенности и штраф/бонусов задач сходны с функциями, показанными на рисунках 1 и 4. Производится моделирование динамики МАС на горизонте в 70 условных единиц времени. Средний объем задач варьируется от a=0.5 до 3.5 условных единиц работы.

6.1. Средняя удовлетворенность при включении потока

Средняя удовлетворенность при включении потока показана на рисунке 6.

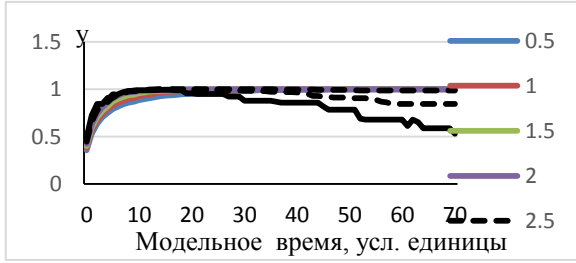


Рисунок 6 – Зависимости средней удовлетворенности агентов системы от времени при различных объемах среднего объема задач (от 0.5 до 3.5)

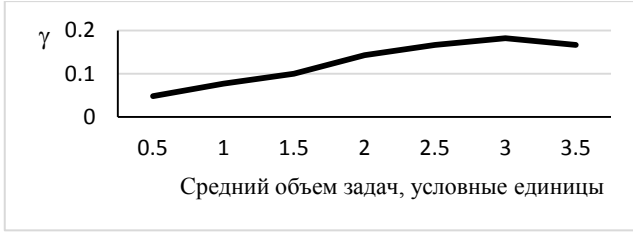


Рисунок 7 – Степень адаптивности МАС в зависимости от объема задач на начальном этапе моделирования

МАС повышает свою адаптивность при возрастании нагрузки, однако затем она падает, потому что эффекты, связанные с понижением удовлетворенности задач при опоздании планирования, начинают преобладать.

6.2. Адаптивность МАС при отключении части ресурсов

В системе из 4-х ресурсов обрабатывается поток задач со средним объемом в 4 единицы. В момент модельного времени t=10 производится отключение двух ресурсов, рисунок 8.

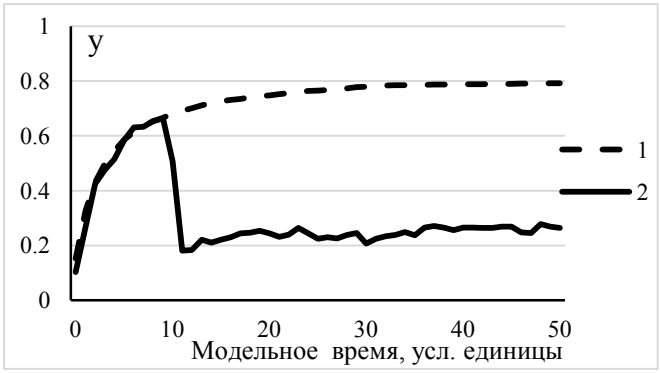


Рисунок 8 – Реакция МАС на отключение части ресурсов в момент t=10 единиц времени:
(1) – динамика системы из 4-х ресурсов, (2) – динамика системы при отключении 2-х ресурсов

Среднее значение удовлетворенности агентов системы падает до y_1 (≈0.18), поскольку задачи перепланируются на оставшиеся ресурсы с опозданием, а затем за счет проактивности перепланируются в лучшие положения, и средняя удовлетворенность повышается до y_2 (≈0.24). На это уходит 5 единиц модельного времени. Отсюда следует, что степень адаптивности такой системы γ=0.012.

6.3 Адаптивность МАС при включении дополнительных ресурсов

Оценка степени адаптивности МАС позволяет предположить, что включение дополнительных ресурсов даст возможность повысить среднюю удовлетворенность агентов для установившихся уровней. В экспериментах к основному потоку задач со средним объемом в 2 единицы в момент времени t=10 добавляются потоки задач с объемом 4…8 единиц, а в момент времени t=15 происходит включение 2–х дополнительных ресурсов с постоянной зависимостью удовлетворенности от загрузки (для исключения влияния удовлетворенности ресурсов от их загрузки). Наблюдаемая динамика приведена на рисунке 9:

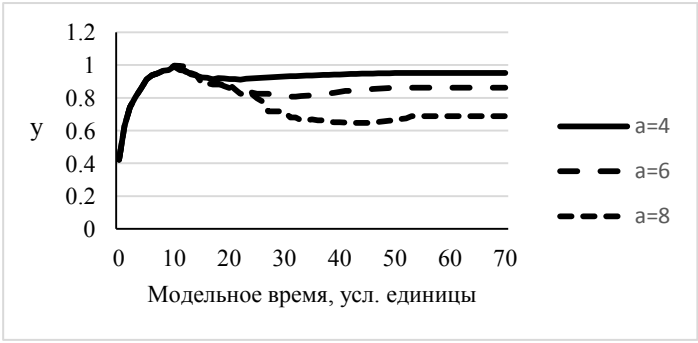


Рисунок 9 – Динамика удовлетворенности МАС при включении потока дополнительных задач со средним объемом от 4 до 8 ед. работы в момент t=10 модельного времени, включение ресурсов производится в момент t=15

МАС адаптируется к изменениям, показывая установившуюся среднюю удовлетворенность в 0.95, 0.85 и 0.75 при включении потока с 4,6,8 средними значениями работы. Для сравнения приведены (рисунок 10) графики средней удовлетворенности при начальном потоке в 2 единицы и включении дополнительного потока в 5 единиц в момент t=10, (график 1).

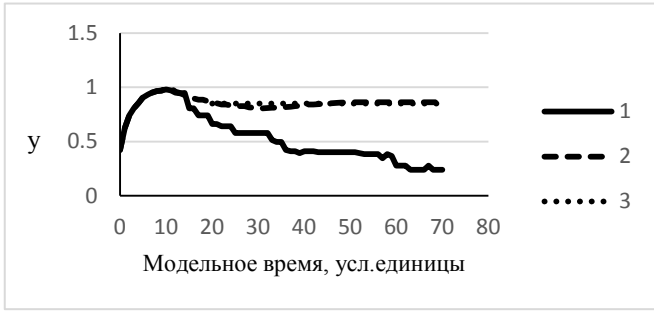


Рисунок 10 – Средний уровень удовлетворенности в зависимости от модельного времени:
1– включение дополнительного потока со средним объемом работ в 5 ед. в момент t=10,
2– включение потока в t=10 и дополнительных ресурсов в t=15,
3– вычисленный уровень средней удовлетворенности по величине степени адаптивности γ=0.011

График (2) показывает среднюю удовлетворенность после включения дополнительных ресурсов в момент t=15, график (3) – вычисленную установившуюся удовлетворенность по степени адаптивности γ=0.011.

Заключение

Динамика сложных мультиагентных систем, описываемых набором различных критериев и функций стоимости, может быть рассмотрена в разрабатываемом прототипе на основе функций удовлетворенности агентов и использования виртуального рынка агентов.

Определение степени адаптивности как отношения изменения удовлетворенности к времени установления равновесия (переходного процесса) позволяет рассматривать динамику разнородных систем с единой точки зрения и находить механизмы повышения степени адаптивности системы в реакции на непредвиденные события.

При этом в качестве механизма управления адаптивностью могут рассматриваться виртуальные налоги, ограничивающие способности агентов по использованию виртуальных денег с учетом достигаемых результатов.

Список литературы

[1] Виттих В.А. Введение в теорию интерсубъективного управления. – Самара, СНЦ РАН, 2013. – 64 с.
[2] Механизмы управления. Управление организацией: планирование, организация, стимулирование, контроль, В. Н. Бурков и др., под ред. Д. А. Новикова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва: ЛЕНАНД, 2013. – 215 с.
[3] М.Ю. Тугаев, А.В. Речкалов, П.О. Скобелев. Управление машиностроительной корпорацией в реальном времени» // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ 2014), 16 – 19 июня 2014 г., Москва. – М.: ИПУ РАН, 2014. – в печати
[4] Leung, J.: Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis. Chapman & Hall, CRC Computer and Information Science Series. – 2004.
[5] Pinedo, M.: Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. – Springer. – 2008.

[6] Malti Baghel, Shikha Agrawal and Sanjay Silakari, Survey of Metaheuristic Algorithms for Combinatorial Optimization // International Journal of Computer Applications, 58(19):21-31, November 2012.
[7] Скобелев П. О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. № 12. – С.33-46.
[8] Leitao Paulo, Vrba Pavel. Recent Developments and Future Trends of Industrial Agents // Proc. of 5th International Conf. on Holonic and Multi-Agent systems in Manufacturing, France, Tolouse, 2011. – Springer. Berlin. – P. 15-28.
[9] Скобелев П.О. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Приложение к теоретическому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии». – 2013. №1. – С. 1–32.
[10] Zadeh L. A. On the definition of adaptivity // Proc. IEEE. – 1963. – Vol. 51. – P. 469–470.
[11] Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах. – М.: Наука, 1990.
[12] Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука. – 2000. – 549 с.
[13] И. Ю. Тюкин, В. А. Терехов. Адаптация в нелинейных динамических системах. – ЛКИ. – 2008.
[14] Davis, R. I. and Burns, A. 2011. A survey of hard real-time scheduling for multiprocessor systems // ACM Comput. Surv. 43, 4, Article 35 (October 2011). DOI = 10.1145/1978802.1978814
[15] Lawrence Barsanti, Angela C. Sodan, Adaptive Job Scheduling Via Predictive Job Resource Allocation, In: Job Scheduling Strategies for Parallel Processing // Lecture Notes in Computer Science. – Vol. 4376, 2007. – P. 115-140.
[16] Yann Chevaleyre at al. Issues in Multiagent Resource Allocation // Informatica. – Vol. 30. – 2006. – P. 3–31.
[17] Виттих В. А., Скобелев П. О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и Телемеханика. – 2003. – №1. –С. 162-169.
[18] Виттих В. А., Скобелев П. О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. – 2009. – №2. – С. 78-87.

ОБРАБОТКА ПОТОКА ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЛАСТИ МАРШРУТИЗАЦИИ

К.А. Стуликова, Д.Ю. Полукаров

ФГОБУ ВПО Поволжский государственный университет телекоммуникация и информатики
443010, Самара, ул. Льва Толстого, 23, Россия
plkw@mail.ru

Ключевые слова: *инфокоммуникационные сети, маршрутизация, онтологическая модель, онтология, пограничный маршрутизатор, междоменная маршрутизация, область маршрутизации*

Abstract
Data flow processing based on the routing domain ontology model was presented at this paper. IDEF0 and DFD diagrams were developed. Developing system gives a multigraph as output information.

Введение

Повышение сложности межсетевого взаимодействия требует новых подходов к управлению информационными потоками в сети. Процесс маршрутизации приобретает качественно новые свойства, характерные для управления сложными системами. Это влечет за собой потребность в развитии теоретических основ и реализации методов автоматизации, оптимизации и интеллектуализации систем сетевого управления информационными потоками.

Потребность в получении высокоэффективных решений для задач сетевого управления и планирования выдвигает на первый план необходимость формирования и представления знаний о предметной области и сопутствующих понятиях в виде концептуальной модели [1,2]. В качестве подобной модели может быть использована онтологическая модель процессов междоменной маршрутизации, отражающая взаимосвязи между основными понятиями предметной области и учитывающая временные, пространственные и качественные характеристики участников маршрутизации.

Поскольку ИКС является сложной системой с множеством неоднородных по составу участников, характеру отношений между ними, территориально разнесенной и административно разрозненной, то достигнуть в такой системе состояния глобального оптимума, которое бы устраивало всех участников сети, практически невозможно. Исходя из этого, при принятии управляющих сетевых решений, прежде всего, следует руководствоваться состоянием отдельных сегментов ИКС [3] и возможностями локального изменения текущей ситуации. При анализе локальных решений маршрутизации сетевому оператору может помочь сформированная на основе онтологической модели процессов междоменной маршрутизации онтология области маршрутизации [4], состоящая из совокупности объектов и взаимосвязей между ними, определяемых закрепленными в наборе правил бизнес-соглашениями и политиками.

Чтобы автоматизировать процесс анализа сетевых решений на основе онтологии области маршрутизации, необходима схема обработки потока пакетов, поступающих на пограничный маршрутизатор. Такая схема позволит однозначно интерпретировать поток входных данных как элементы онтологии области маршрутизации на языке, понятном ЭВМ, с целью дальнейшего использования полученной информации для формирования рекомендаций сетевому оператору с помощью системы анализа потоков данных.

1 Модель области маршрутизации

На начальном этапе формирования схемы обработки потока данных необходимо найти соответствие между атрибутами объектов онтологии и «сырыми» данными, которые можно извлечь из поступающего на порт маршрутизатора потока пакетов и данных из внешних источников. Затем найденное количественное и качественное соотношение описывается на естественном языке в виде онтологической модели области маршрутизации при помощи определенных правил формирования [4]. Полученная онтологическая модель используется для формирования схемы обработки потока данных на уровне отдельных функциональных блоков.

На рисунке 1 приведен пример фрагмента онтологии области маршрутизации в виде мультиграфа этой области. С помощью элементов графа представлены объекты онтологии, меток узлов и дуг графа – атрибуты объектов. Графовое отображение онтологии позволяет облегчить процессы обработки онтологии с помощью ЭВМ.

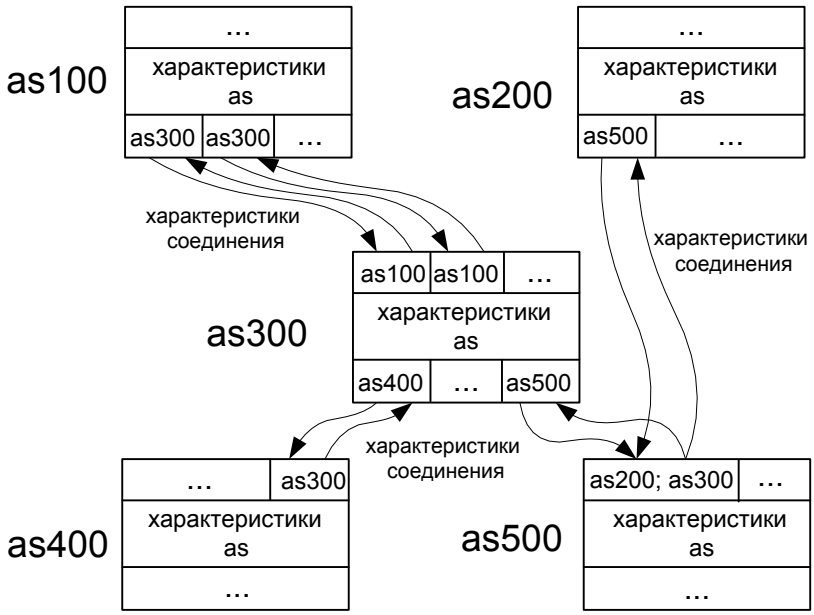


Рисунок 1 – Пример фрагмента онтологии области маршрутизации

В значениях атрибутов для объектов онтологии области маршрутизации отображаются внутренние и внешние свойства ИКС, характеризующие выбранную область маршрутизации. Внутренние свойства элементов сети, например, такие как географическое местоположение узла или пропускная способность линии, изменить трудно, в то время как внешние свойства элементов ИКС, такие как производительность, свойства трафика изменить легко.

В качестве атрибутов объектов онтологии для узлов мультиграфа могут быть использованы следующие свойства:

- состояние узла (количество исходящих/входящих пакетов);
- степень узла (количество соединений с другими автономными системами);
- показатели эффективности (например, процент загрузки процессора);
- географическое положение пограничного маршрутизатора автономной системы;
- тип узла (например, бренд маршрутизатора или версия ПО);
- метрика автономной система, выставленная сетевым администратором и т.д.

Свойства сети для представления метрик ребер мультиграфа:

- текущее состояние соединения (функционирует/не функционирует соединение в настоящий момент);
- объем трафика, проходящий по соединению (исходящие/входящие пакеты);
- производительность соединения (частота ошибок, задержки, потери, колебания трафика, изменение порядка, размер буфера);
- длина соединения;
- вес маршрутизации;
- мощность соединений и т.д.

Заполнение значений атрибутов объектов выполняется, в первую очередь, на основе поступающих на порты маршрутизаторов автономной системы данных из пакетов (BGP-объявлений, ICMP-пакетов, пакетов данных) , а также внешних источников – открытых проектов, которые собирают сетевую статистику (например, CAIDA [5] и GeoLite [6]), и происходит по схеме обработки потока данных, представленной ниже.

2 Схема обработки потока данных

На рисунке 2 показана общая модель обработки потока данных, описанная при помощи IDEF0-нотации [7]. Входными данными модели являются поток пакетов с пограничного маршрутизатора и информация из внешних источников, выходными данными – графовое представление области маршрутизации (онтология области маршрутизации). Управляющей информацией является онтологическая модель области маршрутизации, сформированная на основе концептуальной модели данной предметной области [1,2].

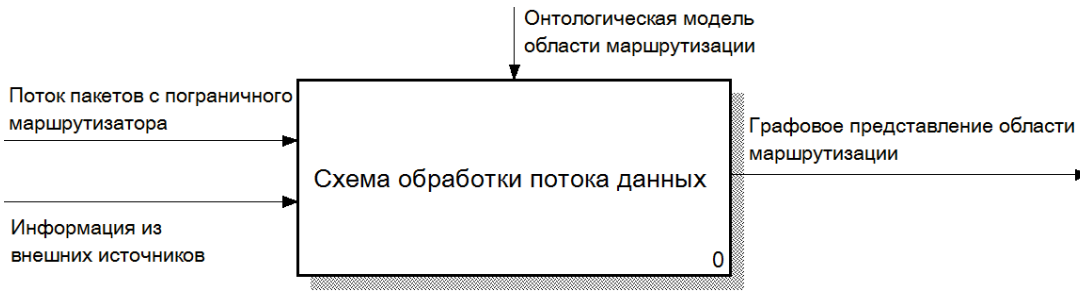


Рисунок 2 – Контекстная диаграмма IDEF0: схема обработки потока данных

При декомпозиции контекстной диаграммы IDEF0 до DFD-диаграммы описания потоков данных уровень детализации увеличивается до основных функциональных блоков схемы обработки данных. DFD-диаграмма также известна как модель процессов. Моделирование процессов используется для визуального представления того, как функционирует система.

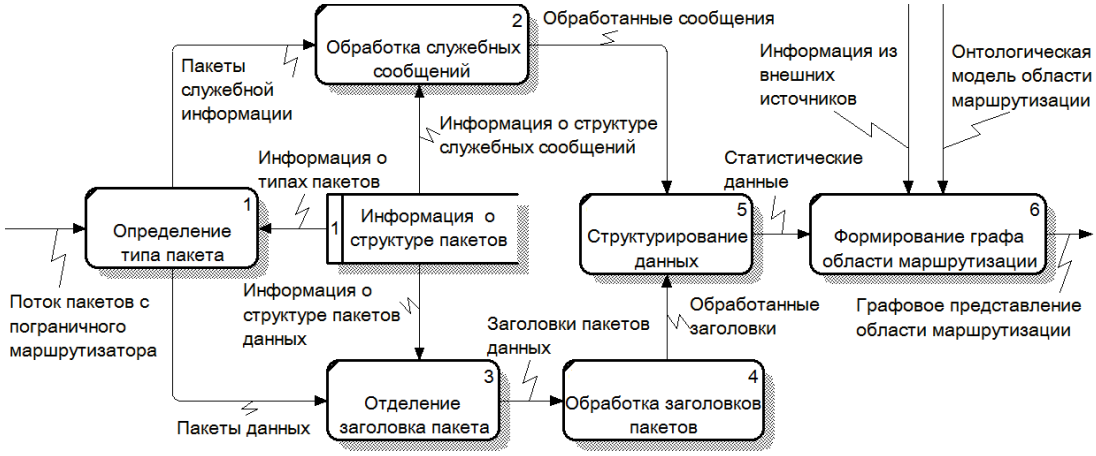


Рисунок 3 –Диаграмма потоков данных A0: схема обработки потока данных

Из рисунка 3 видно, что в процессе анализа информации участвуют заголовки пакетов данных и содержимое служебных пакетов, их обработка осуществляется раздельно. Выделенная информация структурируется , подвергается статистической обработке и организуется в мультиграф связности автономных систем. Информация, которую не удается получить непосредственно из исследуемого информационного потока пакетов, поступает в систему из внешних источников.

Заключение

В данной работе сделана попытка представить процесс обработки потока данных в сети с помощью нотации IDEF. Такое представление позволяет определить структуру разрабатываемой системы, производящей анализ и обработку потока данных пограничного маршрутизатора. Проектируемая система использует для анализа входного потока онтологическую модель области маршрутизации. Таким образом, на выходе системы имеется мультиграф, демонстрирующий графовое представление связности автономных систем.

Список источников

[1] Стуликова К.А., Полукаров Д.Ю. Концептуальная модель представления знаний о маршрутизации в глобальных компьютерных сетях. Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIV Международной конференции, Самара, 2012, с. 268-277.

[2] Стуликова К.А., Полукаров Д.Ю. Построение концептуальной модели представления знаний инфокоммуникационных систем. XIX Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ, Самара, 2012. С. 229.

[3] Стуликова К.А., Полукаров Д.Ю. Размерность кластера в компонентно-кластерном разделении области маршрутизации. XX Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ, Самара, 2013. С. 239-240.

[4] Стуликова К.А., Полукаров Д.Ю. Правила формирования онтологии области маршрутизации для системы анализа потоков данных междоменной маршрутизации. Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIV Международной конференции, Самара, 2013. С. 429-432.

[5] CAIDA: The Cooperative Association for Internet Data Analysis (http://www.caida.org/)

[6] Открытые данные и API (http://www.maxmind.com/ru/opensource)

[7] РД IDEF0 – 2000. Методология функционального моделирования IDEF0. ИПК Издательство стандартов, 2000

КОНЦЕПЦИЯ ПОРТАЛА «ГЕН-ГУРУ-КОН» ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ КОНФЛИКТА

В.А. Филимонов

Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Омский филиал
644099, Омск, ул. Певцова, 13, Россия
filimonov-v-a@yandex.ru
тел: +7 (3812) 23-65-67, факс: +7 (3812) 23-45-84

Ключевые слова: *моделирование конфликтов, коллективное взаимодействие, посредники, форматы субъектов, кросс-технологии, рефлексивный анализ, когнитивная экспертиза*

Abstract

The project of creation of a web portal for collective simulation of the conflicts is described. The project is based on cross-technologies of the situational center. The formal reflexive analysis is supplemented with a wide class of other models. The format of work of participants under masks is offered. Large-scale experiments are planned.

Введение

Моделирование поведения интеллектуальных систем в конфликтных ситуациях продолжает оставаться актуальной и крайне сложной задачей. Сложность обусловлена рефлексивным характером задачи: новые модели поведения, осознанно (рефлексивно) освоенные некоторыми системами, становятся частями этих систем, что требует циклической модификации постановки и решения задач моделирования. Целью проекта, концепция которого предлагается в данном тексте, является создание эффективного инструмента моделирования поведения интеллектуальных систем при наличии конфликта. Практическое значение заключается в обеспечении возможности достаточно глубокого интерактивного анализа конфликтных ситуаций в различных сферах деятельности.

1 История исследования

В 2013 г. был успешно завершён проект «Создание интерактивной версии модели поведения группы на основе теории рефлексивных игр В.А.Лефевра с использованием кросс-технологий», поддержанный грантом РГНФ 13-06-12009в. Опытная эксплуатация сайта ***http://www.reflection.trizkin.ru*** , реализующего упомянутую модель, позволила получить ряд интересных результатов. Оказалось, в частности, что проектирование задач на тему группового конфликта позволяет оценить степень агрессивности членов проектной группы. Было также сформировано новое направление – «Гуманитарная поддержка рефлексивного анализа», включающего создание рефлексивных рассказов, кейсов и т.п.

Идея создания портала для моделирования поведения интеллектуальных систем сформировалась в ноябре 2013 г. в ходе дистанционной беседы с В.А. Лефевром участников конференции «Рефлексивный театр ситуационного центра-2013». Предварительно в качестве цели предполагалось расширение арсенала используемых моделей. Название портала сформировано из наименования авторского инфраструктурного проекта «Ген-Гуру» (2007 г.) с добавлением начала слова «конфликт».

Предлагаемая концепция ориентирована на использование кросс-технологий ситуационного центра [1-10]. Усложнение используемых методов математического моделирования привело к потере понимания самого процесса моделирования и, соответственно, доверия к интер-

претации результатов моделирования. Гипотеза состоит в том, что интеграция результатов позволит специалистам в области моделирования более точно представлять себе возможности существующих методов математического моделирования. Из прецедентов такого рода можно упомянуть систему проектов DARPA (США), в частности, Wargaming the Asymmetric Environment, а также систему из трёх учебно- исследовательских ситуационных центров Московского государственного института международных отношений.

Совершенствование комплексной процедуры моделирования (циклов формализация-моделирование-интерпретация) позволит обеспечить лучшее понимание полученных результатов участниками исследования, не имеющих математической подготовки. Математика бессубъектна, моделирование субъектно по понятию. Введение субъекта в физические картины мира продемонстрировало эффективность расширения этой картины. В нашем случае введение математических моделей субъекта (в том числе коллективного) в процесс математического моделирования делает этот процесс более системным.

Необходимость введения (коллективного) субъекта в картину мира подчёркивается в работе В.А. Виттиха [11], где результат коллективной работы квалифицирован как «субъективная теория». Этот вывод хорошо согласуется с идеей П.С. Порецкого о необходимости определения универсума в процессе вывода логических умозаключений [12, 13].

2 Концепция подхода и особенности реализации

Основные компоненты и способы реализации данного проекта перечислены ниже:

- создание площадки для длительного коллективного интерактивного конструирования, анализа и использования моделей конфликтных ситуаций, а также систем этих моделей;
- организация взаимодействия исследовательских коллективов, разрабатывающих модели поведения интеллектуальных систем;
- организация использования портала клиентов, заинтересованных в разрешении конкретных конфликтных ситуаций;
- поддержка процесса коллективной работы сервисной командой (координаторы, планшетисты, методологи, игротехники, дизайнеры и др.)
- использование результатов «конфликториума» (компонент организационно-деятельностных игр 90-х годов прошлого века) и аналогичных подходов;
- мониторинг психологических характеристик и достижений участников коллективного процесса;
- возможность работы под масками;
- схематизация задач (алгебра конфликта);
- использование когнитивной графики;
- использование средств гуманитарной поддержки (в том числе рефлексивного театра);
- облачная реализация портала.

Математический арсенал проекта предполагается сформировать на единой основе с учётом многовариантности возможных представлений [14-17]. Предполагается, что это будет существенным дополнением к используемому нами аппарату рефлексивного анализа В.А. Лефевра [18-23]. Процедуры математического моделирования предполагается сконструировать как процедуры коллективной работы на основе инфраструктуры ситуационного центра. Аналогично предполагается создание процессов управления постановкой и решением сложных прикладных задач в социально-экономической сфере. Программная реализация предусматривается в варианте создания объектно-ориентированной операционной обстановки, предложенной А.А. Берсом [24].

Для проверки теоретических положений планируется проведение вычислительных экспериментов, в том числе с использованием двухмодульного суперкомпьютерного кластера на базе вычислителей NVIDIA Tesla C1060 Омского филиала ИМ СО РАН (ОФ ИМ СО РАН) и

оборудования Лаборатории защиты информации факультета компьютерных наук Омского государственного университета (ОмГУ).

Неотъемлемой частью работы является проведение экспериментов с группами (студенты, аспиранты, научные сотрудники ИМ СО РАН, ОФ ИМ СО РАН и ОмГУ) по оценке эффективности различных методик в процессе решения прикладных задач.

Наиболее сложной задачей для данного проекта является создание системы форматов субъектов, участвующих в коллективной работе. Отсутствие мониторинга экспертной работы в общественных науках в настоящее время породило фантастическую безответственность экспертов. Проблемой является психологическая защита участников коллективной работы, которые, безусловно, имеют право на ошибку. Автору неизвестны профессиональные экспертизы достижений и ошибок действующих руководителей высокого ранга, сделанные его (руководителя) собственной командой. История полна эпизодами незавидной участи авторов попыток сделать такую экспертизу.

Мы предложили процедуру работы под масками, а также метод абсолютно анонимного рандомизированного рефлексивного опроса [5, 7]. Идея состоит в том, что взаимодействие организуется между масками, систему которых формируют участники работы (проектной группы), а также члены сервисной команды ситуационного центра, обеспечивающие работу портала. Каждый участник, в том числе член сервисной команды, может:

- создать для себя несколько различных масок, от имени которых он может делать различные прогнозы;
- войти в состав группы, работающей под одной маской (примеры – Н. Бурбаки, К. Прутков);
- воспользоваться одновременно обоими этими вариантами.

Мониторинг масок (компетентность, психологические характеристики, популярность и т.п.) доступен всем участникам. При условии сохранения анонимности масок, за которую отвечает сервисная команда, обеспечивается как объективность оценки, так и психологическая защита.

Заметим, что в этом формате в качестве посредников при разрешении конфликта могут выступать как реальные посредники, так и все участники процесса коллективной работы.

Заключение

Работа над проектом будет способствовать совершенствованию теоретических представлений как в области математики, так и в области гуманитарных наук, а также их взаимодействия.

Прикладные результаты могут быть использованы при разработке стратегических решений в различных областях, для защиты информации, борьбы с терроризмом, моделировании опасных природных явлений и техногенных катастроф, в экономике и образовании.

Список литературы

[1] Филимонов В.А. Системное мышление и кросс-технологии ситуационного центра // Проблемы управления в социальных системах, 2013, Т. 5, Вып. 8, с. 124-131.

[2] В.А. Филимонов. Кросс-технологии ситуационного центра как инфраструктура коллективной многодисциплинарной деятельности // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV Международной конференции (25-28 июня 2013 г. Самара, Россия).- Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. – с. 313-316.

[3] Филимонов В. А. Исследовательский комплекс «Ген-Гуру» (эскиз многодисциплинарного проекта) // «Знания-Онтологии-Теории» (ЗОНТ-07). Матер. Всеросс. конф. с междун. участием 14-16 сентября 2007 г., Новосибирск // Новосибирск: Ин-т математики им. С.Л.Соболева СО РАН, Т.1, с. 24-31.

[4] Филимонов В.А. Организация когнитивной экспертизы в исследовательском комплексе «Ген-Гуру» //«Знания-Онтологии-Теории» (ЗОНТ-2011). Матер. Всеросс. конф. с междун. участием 3-5 октября 2011 г., Новосибирск//Новосибирск: Ин-т математики им. С.Л.Соболева СО РАН, Т. 2, с. 113-116.
[5] Филимонов В.А. Технологии ситуационного центра для социальной инженерии//Проблемы управления в социальных системах, Т. 1, Вып. 2, 2009, с. 63 – 74.
[6] Филимонов В.А. Кросс-технологии ситуационного центра для искусственного интеллекта / Тринадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012 (16-20 октября 2012 г., г.Белгород, Россия): Труды конференции. Т.4. - Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. С.188-194.
[7] Мухаметдинова С.Х., Филимонов В.А. Кросс-технологии ситуационного центра в управлении коллективной проектной деятельностью.– Омск: Омский гос. ин-т сервиса, 2012.- 120 с. (монография)
[8] Толстуха С.А., Филимонов В.А. Веб-приложения для моделирования динамических систем и субъектов с рефлексией // Вестник Томского гос. ун-та, серия «Управление, вычислительная техника и информатика (УВТиИ)», 2013, № 1 (26), с. 34-39.
[9] Филимонов В.А., Фоменко А.А. Информационная технология гуманитарной поддержки использования рефлексивного анализа В. А. Лефевра // Наука о человеке : гуманитарные исследования. – Омск, 2013. – № 1, с. 261-267.
[10] Филимонов В.А. Облачная робототехника: социальные сети и навигаторы // Робототехника и искусственный интеллект - 2012: Материалы IV Международной научно-практической конференции. - Красноярск: Центр информации, 2012. – с. 134-137.
[11] Виттих В.А. Принципы построения ситуационных теорий общества // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV Международной конференции (25-28 июня 2013 г. Самара, Россия).- Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. – с. 9- 16.
[12] Порецкий П.С. Логические неравенства. О способах решения логических равенств и об обратном способе математической логики. – М. : Русская правда, 2011. – 160 с.
[13] Лобанов В.И. Русская вероятностная логика. – М. : Русская правда, 2009. – 320 с.
[14] Гуц А.К., Паутова Л.А., Фролова Ю.В. Математическая социология: Учебное пособие.– Омск: Изд-во Наследие. Диалог-Сибирь, 2003. – 192 с.
[15] Математические модели социальных систем: Учебное пособие. – Омск: Изд-во ОмГУ, 2000. 256 с.
[16] Гуц А.К., Паутова Л.А Глобальная этносоциология.–М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ»,2009. – 248 с.
[17] Гуц А.К., Вахний Т.В. Теория игр и защита компьютерных систем: Учебное пособие. – Омск: Изд-во ОмГУ, 2013. 160 с.
[18] Лефевр В.А. Алгебра совести. – М. : Когито-центр, 2003. – 426 с.
[19] Лефевр В.А. Лекции по теории рефлексивных игр. – М. : Когито-центр, 2009. – 218 с.
[20] Лефевр В.А. Что такое одушевлённость. – М. : Когито-центр, 2013. – 125 с.
[21] Филимонов В.А. Алгебра логики и совести/ Вступительное слово В.А.Лефевра// Учеб. пособие для старших классов общеобразовательных и профильных школ.//Омск: ОГИС, 2006.- 72 с. URL: http://www.ofim.oscsbras.ru/~filimono (дата обращения 30.03.2013).
[22] Filimonov V.A. Application of the Reflexive Analysis for Formalization of Situations of the Estimation and of the Choice / ЗОНТ-2013 Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Знания-Онтологии-Теории» (ЗОНТ-2013) 8-10 октября 2013, г. Новосибирск. – Т.2, с. 169-173.
[23] Filimonov V.A. Implementation of the reflexive analysis of V.A. Lefebvre as an example of creation of the active environment //Рефлексивные процессы и управление. Сб. материалов IX Междун. симп. 17-18 октября 2013 г., Москва/ М.: «Когито-Центр», 2013, С. 251-253.
[24] А.А.Берс. Философия информатики. // Материалы 6-й Всеросс. конф. с междун. участием// Омск: Омский гос. ин-т сервиса, 2013, с. 9-23.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗНАНИЙ О РАЗВИТИИ ПРОЦЕССОВ

В.М. Шпаков

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
199178**,** Санкт-Петербург, 14 линия, 39, Россия
vlad@iias.spb.su
тел: +7 (812)328-80-71, факс: +7 (812)328-44-50

Ключевые слова: *представление знаний, обработка знаний, компьютерное моделирование, автоматическое управление*

Abstract

The paper describes an approach to formalization of knowledge about the development of interacting hybrid processes. The approach is based on a mathematical model of hybrid automaton the transition functions of which are represented with help of transformation rules. The method of processes implementation based on the use of the considered formalism is discussed. As examples two process models, initial knowledge of which is specified by a physical model and by an ordinary differential equation, are presented.

Введение

Рассматривается формализация естественнонаучных и экспертных знаний о взаимодействующих гибридных (логико-динамических) процессах. Формализация ориентирована на эффективную компьютерную реализацию процессов. Необходимость в использовании формализованных знаний о процессах возникает при реализации моделей динамических систем, автоматических и супервизорных систем управления, систем поддержки принятия решений. Область применения компьютерных моделей динамических систем достаточно широка. Они используются при проектировании систем, могут входить в состав систем управления и диагностики, являться основой тренажёров и обучающих систем.

Все процессы могут быть представлены с помощью переменных состояния. В случае непрерывного процесса изменения носят количественный характер, а в случае дискретно-событийного процесса изменения происходят мгновенно в дискретные моменты времени и носят качественный характер. В гибридных процессах происходят изменения обоих указанных типов, причем изменения одного типа могут влиять на характер изменений другого типа. Событийные изменения в гибридных процессах называются режимами. При изменении режима может происходить изменение динамики непрерывной составляющей процесса или скачкообразное изменение величин некоторых непрерывных состояний, или и то и другое. С другой стороны, выход некоторого непрерывного состояния за границу заданного диапазона изменений может представлять собой событие и вызывать изменение режима любого гибридного процесса.

1 Формализация знаний о взаимодействующих процессах

В общем случае знания представляются в виде фактов и правил вывода новых фактов [1]. В случае представления знаний о процессах фактами являются текущие значения состояний процессов, а правила, называемые трансформационными, определяют отношения следования или транзитивные отношения для любого из текущих состояний процесса. Таким образом, знания о процессах позволяют обеспечить получение информации о развитии процесса.

Текущее состояние гибридных процессов задается множеством вещественных переменных X, представляющих непрерывные составляющие, и множеством логических переменных W, представляющих дискретные составляющие процессов. Среди этих переменных выделяются подмножества независимых внешних логических воздействий (команд) V и непрерывных вещественных воздействий (уставок) X_i. В составе множества W выделяются также подмножество Q, содержащее переменные для представления состояний дискретно-событийных процессов и режимов гибридных процессов, и подмножество предикатов диапазонов от непрерывных состояний G. Предикаты могут определять состояния дискретных и режимы гибридных процессов. В результате для представления процессов имеем следующие множества переменных:

(1) $W = V \cup Q \cup G$;

(2) $X = X_i \cup X_s$,

где X_s — множество непрерывные переменные состояния.

Для формализации процессов необходимо определить функции переходов следующих типов:

- $\sigma : W \to Q \times \{False, True\}$ — функция трансформации состояний дискретно-событийных процессов и режимов гибридных процессов;
- $\delta : W \times X \to X_s$ — функция трансформации непрерывных состояний для возможных режимов гибридных процессов;
- $\gamma : X \to G \times \{False, True\}$ — зависимость значений предикатов диапазонов от непрерывных состояний процессов.

Формализация знаний о процессах сводится к заданию конкретных способов определения и вычисления, указанных выше функций перехода. Эти способы существенным образом влияют на качество формализации, которое определяется выразительностью, надежностью и удобством реализации процессов.

Функция г является логической по определению, ее реализация связана с вычислением неравенств следующего вида:

(3) $(x_{j_1} \geq (a_k + x_{j_2})) \wedge (x_{j_3} \leq (b_k + x_{j_4})) \to g_k$,

где $x_{j_1}, ..., x_{j_4} \in X, g \in G, a_k$ и b_k - границы диапазона.

Функцию перехода у задают с помощью совокупности продукционных правил вида «*Условие* $\to$ *Действие*» [2]. В качестве условия удобно использовать элементарные конъюнкции логических переменных, а в качестве действия — присвоение требуемых значений определенным дискретным состояниям и режимам процессов. Такие конъюнкции интуитивно понятным образом могут интерпретироваться как логико-динамические ситуации. Ситуацию можно определить с помощью следующих двух утверждений:

- любая логическая переменная (воздействие, состояние, режим, предикат) или её отрицание является динамической ситуацией;
- если S_i и S_j — динамические ситуации, то $S_i \wedge S_j$ также является динамической ситуацией.

С учетом сказанного функция у может быть представлена с помощью совокупности правил следующего вида:

(4) $S_j \to q'_{j_1}, ... q'_{j_i}, ..., q'_{j_m}$,

где S_j — текущая ситуация, $q'_{j_i} \in Q \times \{False, True\}$, $m = 1,...,|Q|$. Штрихи в данном случае обозначают сдвиг по времени между возникновением ситуации и изменением значений состояний процессов.

Для задания функции перехода д необходимо определить алгоритмы вычисления транзитивных отношений между непрерывными состояниями для каждого режима. Это может быть сделано на основе использования алгоритмов и процедур реализации элементарных динамических процессов, элементарных функций и арифметических операций [3]. Основными элементарными процедурами являются интегрирующие, дифференцирующие, реализующие апериодические и колебательные звенья, а также звенья чистого запаздывания

В случае свободного одномерного непрерывного процесса отношение следования или транзитивное отношение (transition relation) представляет собой бинарное отношение на множестве вещественных чисел вида $\tau(y, y')$ или $y' = \tau(y)$, где y — текущее состояние процесса, а y' — следующее состояние процесса. Транзитивное отношение ф определяется параметрами элементарного динамического звена и длительностью интервала времени Δt между y и y'. В случае вынужденного процесса оно также зависит от внешнего воздействия x. Для задания зависимости непрерывных состояний от логики развития гибридного процесса алгоритмы вычисления этих отношений включаются в исполнительные части правил, условными частями которых являются требуемые значения соответствующих режимов. В принятых обозначениях эти правила имеют вид:

(5) $S_j \rightarrow x'_k = \tau_k(x_k, x), x_k \in X_s, x \in X,$

где S_j — ситуация, определяющая режим, τ_k и x_k — соответствующее отношение и состояние, x — произвольная переменная процесса.

Таким образом, знания о процессах могут быть формализованы путем спецификации множеств логических и вещественных состояний (1, 2), и формирования совокупности трансформационных правил (3, 4, 5).

2 Использование формализованных знаний о процессах

Прежде всего, формализованные знания могут быть использованы для реализации процессов, осуществляемой с помощью интерпретатора правил. Качество формализации, в частности, определяется удобством разработки эффективного интерпретатора. Основой интерпретатора является исполняющая процедура. Рассмотренная формализация позволяет создавать достаточно эффективные исполняющие процедуры. Алгоритм такой процедуры достаточно прост. Он в бесконечном цикле последовательно сканирует списки правил (3, 4, 5). Все правила реализуются с помощью условного оператора (*if ... then ...*). Алгоритм вычисляет значение условной части правила. В случае правила (3) он присваивает найденное значение предикату из исполнительной части правила. Действия из исполнительных частей правил (4,5) выполняются, только если условная часть имеет значение *True*. В этом случае говорят, что правило срабатывает. При этом состояниям из исполнительной части правил (4) присваиваются специфицированные значения, а при срабатывании правил (5) запускаются процедуры вычисления транзитивных отношений, указанные в исполнительных частях этих правил.

В СПИИРАН разработан исследовательский прототип интерпретатора трансформационных правил [4]. Он содержит редакторы для формирования векторов состояния процессов и списков правил трансформации этих состояний. Для обработки правил (5) в интерпретаторе имеется набор процедур реализации арифметических операторов, элементарных функций и транзитивных отношений для элементарных процессов. В частности имеется процедура для реализации интеграторов, использующая метод Эйлера.

2.2 Реализация процессов, знания о которых заданны физической моделью

Методику составления трансформационных правил для физической модели рассмотрим на примере спецификации процессов, возникающих при ударном взаимодействии двух абсолютно упругих шаров. Пусть шары имеют одинаковые радиусы $R_1 = R_2 = 0{,}1$, одинаковые массы $m_1 = m_2 = 1$ и одинаковые коэффициенты упругости $k_1 = k_2 = k = 50000$. Центр тяжести первого шара находится на оси абсцисс в точке с координатой $x_1(0) = 0$ и имеет скорость $V_1(0) = 5$ в положительном направлении оси абсцисс. Центр тяжести второго шара находится в точке с абсциссой $x_2(0) = 0{,}21$ и имеет нулевую скорость $V_2(0) = 0$. Из сказанного следует, что процесс взаимодействия шаров начинается через 0,002 секунды. В результате взаимодействия возникают две силы F_1 и F_2, равные по величине и противоположные по направлению. Под действием этих сил первый шар начинает замедляться, а второй — ускоряться. Величина каждой из сил пропорциональна суммарной деформации шаров, т.е. $F_1 = -F_2 = -k \cdot ((R_1 + R_2) - (x_2 - x_1))$. Силы (F_1 и F_2) определяют ускорения шаров (a_1 и a_2), а скорости и координаты определяются интегралами от ускорений и скоростей, соответственно. Приведенное описание можно назвать физической моделью рассматриваемых процессов. На его основании нетрудно создать спецификацию процессов в виде совокупности трансформационных правил. Такая спецификация приведена на рисунке 1.

№	Переменная	Процедура	Коэффициент	Аргумент 1	Аргумент 2	Ситуация	имя параметра	значение
1	F1 сила	Пропорциональная	1.00	Const 0		d > (R1 + R2)		
2	F2 сила	Пропорциональная	-1.00	F1 сила		Ever True		
3	a1 ускорение	Деление	1.00	F1 сила	m1 масса	Ever True		
4	V1 скорость	Интеграл	1.00	a1 ускорение		Ever True		
5	X1 коорд.	Интеграл	1.00	V1 скорость		Ever True		
6	a2 ускорение	Деление	1.00	F2 сила	m2 масса	Ever True		
7	V2 скорость	Интеграл	1.00	a2 ускорение		Ever True		
8	X2 коорд.	Интеграл	1.00	V2 скорость		Ever True		
9	d расстояние	Сумма	1.00	X2 коорд.	X1 коорд.	Ever True	2-ой коэффициент	-1.00
10	R1 + R2	Сумма	1.00	R1 радиус	R2 радиус	Ever True	2-ой коэффициент	1.00
11	dX (дельта)	Сумма	1.00	R1 + R2	d расстояние	d > (R1 + R2)	2-ой коэффициент	-1.00
12	F1 сила	Пропорциональная	-50000.00	dX (дельта)		d > (R1 + R2)		

Рисунок 1 – Правила, специфицирующие процессы при ударном взаимодействии двух шаров

Правила представлены в формате редактора правил разработанного интерпретатора. Первое и второе правила определяют то, что силы равны нулю в ситуации, когда расстояние между центрами шаров превышает их сумму радиусов, т.е. предикат $d > (R_1 + R_2)$ имеет значение *True*. Третье правило вычисляет текущее значение ускорения первого шара, четвертое и пятое — его скорость и координату, соответственно. 6, 7, 8 правила делают то же самое для второго шара. Девятое правило вычисляет текущее расстояние (*d расстояние*t) между центрами масс шаров, а одиннадцатое — текущую суммарную деформацию (*dX (дельта)*). Двенадцатое правило вычисляет текущее значение силы F_1, действующей на первый шар. Коэффициент в этом правиле равен коэффициенту упругости материала шаров. В правилах использована логическая константа EverTrue = True. Сила F_2, действующая на второй шар, равна по величине и противоположна по направлению первой силе. Запуская эти правила на обработку интерпретатором, получаем процессы изменения всех переменных: координат, скоростей, ускорений и сил. На рисунке 2 приведены графики изменения скоростей шаров и возникающих сил. Как и должно быть в данном случае при взаимодействии скорость первого шара уменьшается до нуля, а скорость второго шара увеличивается до значения равного начальной скорости первого шара. Обе скорости в дальнейшем остаются постоянными. Возникающие силы равны по величине и противоположны по знаку. С полученной моделью можно проводить эксперименты,

изменяя массы шаров, скорости, коэффициент упругости. В экспериментах всегда выполняются законы сохранения количества движения и сохранения энергии.

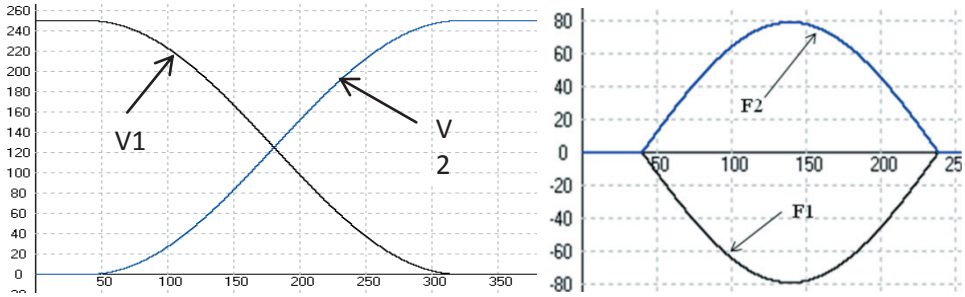


Рисунок 2 – Графики процессов изменения скоростей и сил взаимодействующих шаров

2.2 Реализация процессов, заданных обыкновенными дифференциальными уравнениями

К настоящему времени разработано и исследовано значительное количество обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих процессы в различных динамических системах, представляющих интерес для науки и техники. Компьютерная реализация этих процессов также, очевидно, может представлять интерес. Она достаточно просто может быть произведена с помощью трансформационных правил. Методику разработки таких правил рассмотрим на примере реализации процессов, специфицированных уравнением Ван-дер-Поля. Это нелинейное обыкновенное дифференциальное уравнение 2-го порядка, описывающее свободные автоколебания нелинейной колебательной системы (осциллятора Ван-дер-Поля). Оно находит применение в физике, биологии, в сейсмологии, имеет следующий вид:

$$(6) \quad \frac{d^2y}{dt^2} - \mu(1-y^2)\cdot\frac{dy}{dt} + y = 0 ,$$

где y — координата точки, зависящая от времени, μ — некий коэффициент, характеризующий нелинейность и степень затухания колебаний. Для реализации процессов, заданных с помощью дифференциального уравнения, необходимо из уравнения найти выражение для старшей производной, сформировать правила, вычисляющие текущее значение это производной, затем последовательно использовать правила, реализующие процедуру интегрирования, для вычисления текущих значений всех более низких производных и самой функции. На рисунке 3 приведены правила, позволяющие реализовать процесс, описываемый уравнением (6) при $\mu = 1$. Имена переменных в правилах совпадают с идентификаторами, использованными в уравнении.

№	Переменная	Процедура	Коэффициент	Аргумент 1	Аргумент 2
1	-y^2	Умножение	-1.00	y	y
2	(1 - y^2)	Сумма	1.00	Const 1	-y^2
3	(1 - y^2) * dy/dt	Умножение	1.00	(1 - y^2)	dy/dt
4	dy2/dt2	Сумма	1.00	(1 - y^2) * dy/dt	-y
5	dy/dt	Интеграл	1.00	dy2/dt2	
6	y	Интеграл	1.00	dy/dt	
7	-y	Пропорциональная	-1.00	y	

Рисунок 3 – Правила для реализации процессов, заданных уравнением Ван-дер-Поля

Первое правило вычисляет текущее инвертированное значение квадрата функции (основной переменной), второе и третье — формируют первый член выражения для второй производной, а четвертое полностью вычисляет это выражение. Следующее правило интегрирует

это выражение и находит значение первой производной. Шестое правило вычисляет интеграл от первой производной, то есть находит значение функции.

На рисунке 4 представлены графики процессов (функции и ее первой производной), реализованных с помощью трансформационных правил (рисунок 3) для $y(0)=2$ и нулевых начальных значений производных. Приведенные графики совпадают с численным решением уравнения Ван-дер-Поля для тех же начальных условий и того же значения параметра, полученным с помощью MathCAD и приведенным на рисунке 3 в [5].

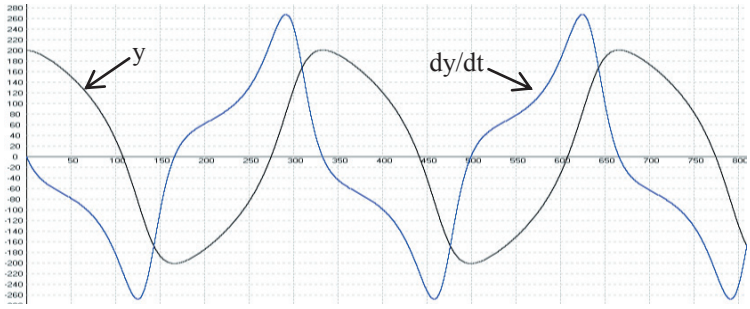


Рисунок 4 – Графики процессов, специфицированных уравнением Ван-дер-Поля.

Заключение

Описанный подход к формализации знаний о гибридных процессах был подвергнут всестороннему экспериментальному исследованию. На его основе был создан прототип компьютерной среды (EnviCon) для разработки исполняемых спецификаций взаимодействующих гибридных процессов. С помощью этой среды были разработаны модели нескольких типовых тестовых систем (стабилизация перевернутого маятника, позиционирование ролика на плоскости и др.) и модели трех больших промышленных установок [6]. Полученный опыт позволяет утверждать, что формализм обладает высокими выразительными возможностями и может быть использован для создания эффективных программных средств реализации процессов.

Благодарности

В публикации представлены результаты исследований, частично поддержанные грантом РФФИ № 12-01-00015-а.

Список литературы

[1] Walker A. Knowledge systems: Principles and Practice. // IBM Journal of Research and Development. 1986. No. 1.
[2] Brownston L., Farrell R., Kant E., Martin N. Programming expert systems in OPS5: an introduction to rule-based programming. Addison-Wesley Series in Artificial Intelligence. Addison-Wesley. 1985.
[3] Howe R. M. Analog computer fundamentals // IEEE Contr. Syst. Mag. 2005. Vol. 25, no. 3.
[4] В.М. Шпаков, Прототип среды моделирования структурированных совокупностей взаимодействующих процессов // Сборник докладов конференции “Имитационное моделирование. Теория и практика”, Санкт-Петербург, 19 – 21 октября 2005.-Т.II, сс. 292 – 295.
[5] Левицкий А.А.,Основычисленныхметодов, http://www.exponenta.ru/educat/systemat/levitsky/index.asp.
[6] Буткевич И. К., Рыдник Е. А., Шпаков В. М. Использование среды EnviCon для моделирования производства жидкого гелия // Труды СПИИРАН. СПб. Наука, 2007. Вып. 5.

Management Processes in the Society (in Social, Economical and Political systems)

Процессы управления в обществе (в социальных, экономических и политических системах)

PLAIN AND 2D APPORTIONMENTS

Mihail Konstantinov[1], Galina Pelova[1], Kostadin Yanev[2]
[1]University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy
1046 Sofia, Bulgaria
e-mails: mmk_fte@uacg.bg, galina_fte@uacg.bg
[2]Bon Marin Ltd, 3 Magnaurska shkola Str., Sofia, Bulgaria
e-mail: k.yanev@gmail.com

Keywords: *elections, plain and bi-proportional methods, comparison of electoral systems*

Abstract
Plain and bi-proportional methods for seat allocation in elections are considered. Examples from Bulgarian electoral practice during the last 24 years are given and Alabama paradoxes of higher order are defined. A comparison of electoral systems is done. A generalization of the apportionment methods used by the US Congress is also presented.

Notations

We denote by N and Q_+ the sets of natural and nonnegative rational numbers, respectively. The set of n-vectors with elements from N is denoted by N^n. The inequality $u \le v$ for $u,v \in N^n$ means that $u_k \le v_k$, where u_k are the elements of the vector u.

Voting Theory

Voting theory is not be very surprising from mathematical point of view but may have great social and political impact.

An example of the new democratic Bulgarian history are the 1990 parliamentary elections. Due to the electoral system used, a particular (and very influential) person became a member of Parliament (MP) and then a Prime Minister of the country. Under a different system this would not happen. And the history of Bulgaria would be different.

There are also many examples from the US political history which illustrate the impact of the electoral system used on the political and social life in the country.

Plain Apportionment Methods (PAM)

Let n parties $\Pi_1, \Pi_2, \ldots, \Pi_n$ be eligible to receive a total of M seats in parliamentary elections (or let there are n states which must receive a total of M seats in Congress). Denote by v_k and s_k the votes cast for and the seats allocated to party Π_k and let

$v = [v_1, v_2, \ldots, v_n]$, $s = [s_1, s_2, \ldots, s_n] \in N^n$

The plain apportionment method (PAM) is described by a function

$(M, v) \rightarrow s = f(M, v)$

where the vectors v and s must be "proportional" in a certain sense. Note that usually PAM is determined via an algorithm which includes a random choice mechanism.

Desirable Properties of PAM

Denote

$V = v_1 + v_2 + \ldots + v_n$, $\sigma = Mv/V \in Q_+$

The elements of the vector σ are the fractional seats allocated to the parties.

The following three properties are desirable for PAM:

$(v_i - v_j)(s_i - s_j) \ge 0$ (i, j = 1, 2,…, n),

$f(M, v) \le f(M + 1, v)$,

floor(σ) ≤ floor(σ) + 1,

where floor(A) is the entire part of the numerical array A (integer rounding towards 0). Similarly, ceil(A) denotes integer rounding towards infinity, while A + a is the array A with elements increased by the scalar a (these are MATLAB agreed notations).

Comments on Properties of PAM

Property 1 is obligatory for PAM but may be violated in some 2D apportionment methods

The violation of Property 2 is known as the Alabama paradox; it has been discovered and has interesting history in USA

Property 3 is the fair share, or quota rule

According to a famous result of Balinski and Yong (1981) there is no PAM that satisfies all three desirable properties described above, see e.g. [1].

The D'Hondt Method

The D'Hondt method is a member of a family of PAM acting as follows. Let

$1 = d_1 < d_2 < \ldots < d_M$

be an increasing finite sequence of rational numbers (in Voting Theory it suffices to work with rational numbers only). Define the D'Hondt matrix H of size M by n whose k-th row is v/d_k. Then first takes one seat the party corresponding to the column containing the largest element of H. The next seat goes to the party corresponding to the column containing the next largest element, etc. This method is equivalent to the Jefferson method considered below.

If there are two or more equal elements, the seat goes to the party corresponding to the column containing the element in the upper row. If there are two or more equal elements in a given row, the seat goes to the party corresponding to the most left column containing the element.

The D'Hondt method itself corresponds to the sequence $d_k = k$. It has been occasionally used in Bulgaria before 1934. It has been used again in the period 1990 – 2005 in six parliamentary elections as well as in four nationwide local elections.

The D'Hondt method is currently used in several European countries and in other countries all over the world.

D'Hondt Method and the Quota Rule

The D'Hondt method can violate (sometimes severely) the quota rule.

Theorem. *The D'Hondt method in Bulgarian parliamentary elections (240 MP, 4-percent barrier) can violate the quota rule by 5 seats.*

This result was established by Ivanov and Konstantinov in 1991 after the adoption of the present Bulgarian Constitution where the parameters of the electoral system are outlined. Fortunately, this large violation did not happen up to now (the maximum violation observed in Bulgaria has been 1).

Unsolved Problem for D'Hondt Method

Problem. *Consider the D'Hondt method for an M-seat parliament and a barrier of b percent. Give an explicit expression E(M,b) for the maximum number of seats in violating the quota rule and describe the corresponding allocations.*

We already know that

E(240,4) = 5

Hint: There must be a large party and several small parties with approximately equal votes.

The Hamilton (Hare-Niemeyer) Method.

The method has been suggested by Hamilton and approved by the USA Congress in 1791. Vetoed by President Washington – the first exercise of veto power by president of USA. Adopted by the Congress in 1852. In use through 1911 when it was replaced by the Webster method.

The method satisfies the quota rule but allows the Alabama paradox, the New party paradox (or New state paradox) and the Voter paradox (or Population paradox). Used in Bulgaria since 2007.

In Europe the method is known as the Niemeyer method with Hare quota, or Hare-Niemeyer method.

The method has interesting history in USA and Europe and acts as follows. Initially the vector s is set to floor(σ) . If $\sigma = \text{floor}(\sigma)$ then the apportionment is final. If $\sigma \neq \text{floor}(\sigma)$ (the typical case) then first gets one additional seat the party with largest remainder (the largest element of the vector σ - floor(σ)), second gets a seat the party with next largest remainder, etc. The Hamilton method satisfies the quota rule but admits paradoxes. One of them is the famous Alabama paradox. It states that if more seats are allocated then a party (or a state) can loose a seat.

Alabama Paradoxes of Higher Order.

Under the standard Alabama paradox the element-wise inequality

$F(M,v) \leq f(M + 1,v)$

is violated. Here usually exactly one party loses a seat while two parties win a seat. In this case the vector

$\delta_1(M,v) = f(M + 1,v) – f(M,v)$

has two elements equal to 1, one element equal to -1 and zero n-3 elements. But there is more.

There may be exactly $p > 1$ parties loosing a seat and $p + 1$ wining a seat. Here the vector $\delta_1(M,v)$ has $p + 1$ elements equal to 1, p elements equal to -1 and n-2p-1 zero elements.

Let $m \in N$. Suppose that the inequality

$F(M,v) \leq f(M + m,v)$

is violated so that the vector

$\delta_m(M,v) = f(M + m,v) – f(M,v)$

has $p + 1$ elements equal to 1, p elements equal to -1 and n-2p-1 zero elements. Then we have an Alabama paradox of type (m,p). We also say that the pair (M,v) is of Alabama type (m,p).

Note that the standard Alabama paradox with p parties loosing a seat and $p + 1$ parties winning a seat is now the Alabama paradox of type (1,p).

The concept of Alabama paradox may be further clarified as follows.

The pair (M,v) is said to be of maximum Alabama order m if

$\delta_j(M,v) \geq 0$ (j = 1,2,…,m-1)

but the inequality $\delta_m(M,v) \geq 0$ is violated.

Why is Alabama Paradox Avoided in USA and Neglected in Europe.

When we elect an M–member parliament in Europe on the basis of a given vote distribution v then possible Alabama paradoxes (of any attainable type and/or order) are simply invisible. Nobody considers parliaments with e.g $M + 1$ or $M – 1$ members with the same v.

The opposite is true in USA. The number of representatives in Congress of each state is important also because they participate in the Electoral Colleges in presidential elections. And it is difficult to convince people (and politicians in particular) that a larger House of Representatives may result in less congressmen from their state.

Jefferson and Adams Methods.

This first method was suggested by future president Thomas Jefferson to replace the Hamilton method. It was the first apportionment method used by the US Congress starting at 1791 through 1842 when it was replaced by the Webster method. This method is a member of family of methods described below.

The second apportionment method was suggested in 1882 by former president Adams as a remedy for Hamilton method but was never used by the US Congress. This method is also a member of family of methods described below.

Webster and Huntington-Hill Methods.

The first method is proposed by Webster in 1832. It was adopted by the Congress in 1842 and then replaced by the Hamilton method in 1852. It was again adopted in 1901 and reconfirmed in 1911. Finally, it was replaced by the Huntington-Hill method in 1941. This method is a member of a family of methods described below.

The House of Representatives uses the Huntington-Hill apportionment method to assign the number of representative seats to each state proportionally to its population since 1941. It is credited

to Huntington and Hill and is also a member of the above mentioned family of apportionment methods.

A Family of PAM Including All Previous Methods.

Let r: $Q_+ \rightarrow [0,1]$ be a given piece-wise continuous function and denote by

$\{x\} = \text{rem}(x,1) = x - \text{floor}(x)$

(rem is the MATLAB function for computing remainders) the remainder of $x \in Q_+$. Define the "rounding function"

F_r: $Q_+ \rightarrow N_0 = \{0, N\}$

By the rule

$F_r(x) = x$ if $\{x\} = 0$, $F_r(x) = \text{floor}(x)$ if $\{x\} < r(x)$, $F_r(x) = \text{ceil}(x)$ if $\{x\} \geq r(x)$

Then the previous four methods (Jefferson, Adams, Webster and Huntington-Hill) can be described as follows. Set

$r(x) = 1$

for the Jefferson method,

$r(x) = 0$

for the Adams method,

$r(x) = 0.5$

for the Webster method, and

$r(x) = (\text{floor}(x)(\text{floor}(x) + 1))^{0.5} - \text{floor}(x)$

for the Huntington-Hill method.

More generally, if E(x) is some mean value of floor(x) and floor(x) + 1, then

$r(x) = E(x) - x$

For example, in the Webster method E(x) is the arithmetic mean of floor(x) and floor(x) + 1, while in the Huntington-Hill method E(x) is the geometric mean of the integers floor(x) and floor(x) + 1.

Another (unused and hence unnamed) method is based on the harmonic mean of the integers floor(x) and floor(x) + 1. In this case

$r(x) = \text{floor}(x)/(2\,\text{floor}(x) + 1)$

Consider now the function G: $(0,\infty) \rightarrow N_0$ defined by

$G(z) = F_r(zv_1) + F_r(zv_2) + \ldots + F_r(zv_n)$

The function G is non-decreasing and piece-wise continuous. Hence the equation

$G(z) = M$

has no more than one solution $z_0 > 0$. If this solution exists, set

$s_k = F_r(z_0 v_k)$ $(k = 1,2,\ldots,n)$

If not, find z* such that

$G(z^* - 0) < 0$ and $s^* = G(z^*) > M$

Then set initially

$s_k^* = F_r(z^* v_k)$ $(k = 1,2,\ldots,n)$

After that take the extra $G(z^*) - M$ seats one by one from the parties so that the maximum price v_j/s_j of one seat is minimal (or the minimum price is maximal). Other criteria based on prices can also be used.

As an example consider the Bulgarian 2009 parliamentary elections. Six parties passed the barrier of 4% and obtained votes as follows.

Votes:

Party	П1	П2	П3	П4	П5	П6
Votes	174 582	1 678 641	610 521	395 733	748 147	285 662

In fact, the system had been mixed with 31 MP elected by a plurality system and 209 elected by the Hamilton (or Hare-Niemeyer) proportional method with 4% barrier. Below we present the results for 240 MP elected by the proportional method.

Fractional seats (Hare quotas):

Party	П1	П2	П3	П4	П5	П6
Fr. Seats	10.762	103.479	37.635	24.395	46.119	17.610

Seats:

Method\Party	П1	П2	П3	П4	П5	П6
Jefferson/D'Hondt	10	105	38	24	46	17
Hamilton	11	103	38	24	46	18
Adams	11	102	38	25	46	18
Webster	11	103	38	24	46	18
Huntington-Hill	11	103	38	24	46	18

The last table shows that there are small differences in the performance of the four apportionment methods. Moreover, two of the parties (П3 and П5) receive the same number of seats under all methods.

Disproportions and sensitivity of electoral results without geographic gerrymandering.

Geographic gerrymandering (i.e. manipulation of electoral regions) is an old way to improve the electoral result of the ruling party in elections under plurality electoral systems. Here the ruling party tries to win in small constituencies while the opposition is let to win in large constituencies. To exclude such rude manipulation we suppose that when plurality system is used the constituencies have equal number of voters.

Here the following questions arise.

1) Which is the smallest number of votes for winning the elections (resp. which is the largest number of votes for loosing the elections)?
2) Which system allows more disproportions in the allocation of seats and how to compare quantitatively the disproportions?
3) Concerning the sensitivity of electoral result one may ask the following.
4) How many seats can be changed by one single vote in a plurality and in a proportional system?
5) Which system is more sensitive and how to measure the sensitivity in a quantitative way?

Parameters of the Bulgarian electoral system.

The basic parameters of the Bulgarian electoral system are as follows.

- Size of Parliament (number of MP): M = 240
- Barrier (threshold for sending MP: b = 0.04
- Number of voters: 6 000 000
- Apportionment method used: D'Hondt (1990-2005), Hamilton (2007-)

As a rule all parties register party lists in all regions.

Comparison of proportional and plurality electoral systems

To compare the two systems suppose that there are two parties and no invalid votes. Consider first a proportional system with 4% barrier.

The following results can easily be proved.

- A party may win all 240 seats (unthinkable majority in Parliament) with 96.000% of the votes.
- A party may win 121 seats (absolute majority in Parliament) with only 50.004% of the votes.Consider next a plurality system (in one tour with relative majority) supposing that there are 240 constituencies with equal number of voters. Then the following assertions are true.
- With only 50.01% of the votes a party may win all 240 seats.
- With only 25.02% of the votes a party may win 121 seats.

As a result we see that the following assertions hold true.

- The plurality system may be about twice more "disproportional" than the proportional system even when the constituencies have equal number of voters.
- Under a plurality system one single vote may change one seat. Hence to change all 240 seats one needs to change at least 240 votes.
- Under a proportional system with barrier, one single vote may change (and even destroy) all 249 seats (this is called "Last second voter paradox")

The "Last second voter paradox" is based on the following hypothetical situation. There is one second before closing the voting day. At that moment 25 parties have exactly 4% of the valid votes each and shall eventually have either 10 or 9 MP. Then comes the mythical "Last second voter" and casts a vote for himself as an independent candidate. As a result all parties 'drop" below the barrier and there is no parliament elected. In particular all 240 seats are changed by the single vote of this powerful independent candidate.

Bi-proportional methods.

Suppose that there are m regions R_1, R_2,…,R_m and n parties Π_1,Π_2,...,Π_n and let $v_{i,j}$ be the number of votes cast for party Π_j in region R_i. The total number s_j of seats for party Π_j is determined proportionally to the number of votes v_j and the number of seats in R_i is proportional to r_i, where

$v_j = v_{1,j} + v_{2,j} + \ldots + v_{m,j}$, $r_i = r_{i,1} + r_{i,2} + \ldots + r_{i,n}$

Let $s_{i,j}$ be the number of seats assigned to part Π_j in region R_i. Then the problem is to determine these numbers so that

$s_{i,j}/v_{i,j} \approx M/V$, $V = v_1 + v_2 + \ldots + v_n$

This can be done by a family of integer bi-proportional methods based on certain optimization criteria, see e.g. [2]. They are based on remainders and prices of the fractal seats.

The political implication of this approach may be (and sometimes is) very complicated.

Conclusions

In this paper we have shown how the existing proportional methods can be derived in a unified manned using a general "rounding" function. Comparison between plurality and proportional electoral systems is done and bi-proportional algorithms used in the Bulgarian electoral system are briefly outlined.

Bibliography

[1] M. Balinski, H. Yong. *Fair Representation: Meeting the Ideal of One Man, One Vote.* Brookings Inst. Press, Washington, 2001.

[2] M. Konstantinov, K. Yanev, G. Pelova. New bi-proportional methods for the Bulgarian parliamentary elections. *Proc. Amer. Inst. Phys.* CP 1293 (2010), 243-252.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ОТВЕТСТВЕННОСТЕЙ

В.А. Виттих

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
vittikh@iccs.ru
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *персональная ответственность, объект ответственности, субъект ответственности, актор, холон*

Abstract
The problem of the distribution of the personal responsibilities of actors in complex systems is formulated, a classification of objects of responsibility is offered. The relationship of objects of responsibility, the dynamics of the distribution of responsibility and advisability of the development of the ontology of responsibilities in a complex system are noted.

Введение

В работе [1] отмечается, актуальность проблемы распределения персональных ответственностей акторов в сложных системах. Если придерживаться трактовки понятия «ответственность», предлагаемого в [2], то оно связывается с обязанностью индивидуума отвечать за свои действия и поступки, а, в свою очередь, обязанность определяется как «круг действий, возложенных на кого-нибудь и безусловных для выполнения» (например, служебная обязанность). Иными словами, речь идёт о субъекте ответственности, обязанном выполнять некоторый набор действий, в отрыве от объекта ответственности, которому адресованы эти действия. Именно такое одностороннее и размытое понимание ответственности, когда объект ответственности чётко не определён, в конечном счёте, и является причиной того негативного феномена, который именуется безответственностью. Поэтому ответственность следует трактовать как отношение субъекта и объектов ответственности.

Такая точка зрения излагается в [3], где ответственность понимается как «отношение зависимости человека от чего-то (от иного), воспринимаемого им в качестве определяющего основания для принятия решений и совершения действий, прямо или косвенно направленных на сохранение иного и содействия ему». Этот «иной» и есть объект ответственности. Поэтому распределение персональных ответственностей сводится к установлению отношений между субъектом ответственности и теми объектами, которые, по М. Хайдеггеру [4], являются предметами его «заботы».

1 Классификация объектов ответственности

Человек (субъект ответственности) живёт в пяти мирах (рис.1):

- в мире людей;
- в мире природном;
- в мире искусственном;
- в мире абстрактном;
- в мире духовных ценностей.

Соответственно, объектами его ответственности, относящимся к перечисленным мирам, могут быть, например:

- отдельный человек, группа людей, население города и т.д.;

- состояние окружающей среды в каком-либо районе;
- здания, сооружения и объекты инфраструктуры;
- законы и иные нормативно-правовые акты;
- морально-этические нормы и правила.

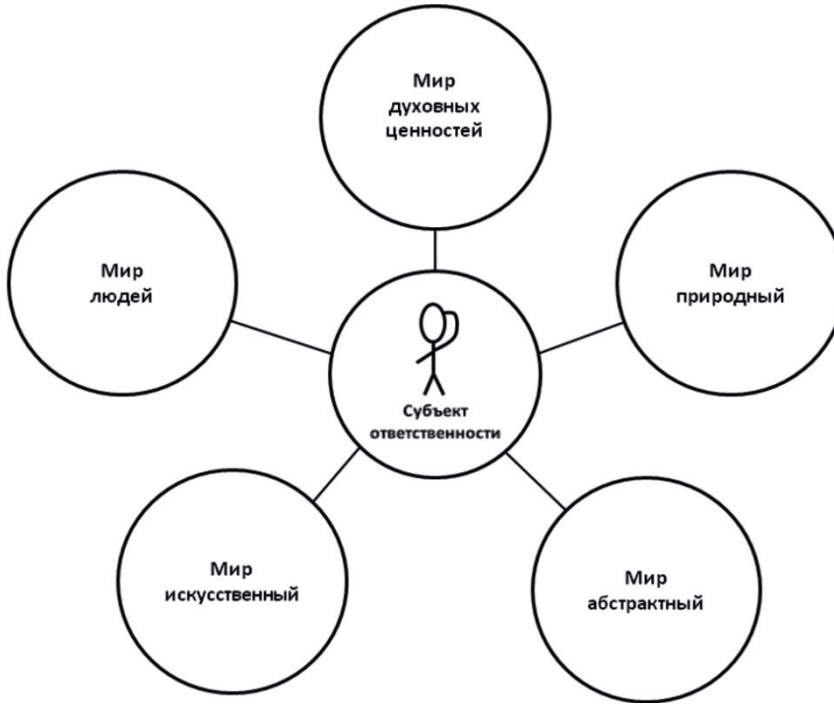


Рисунок 1 – Распределение персональных ответственностей

2 Взаимосвязь субъектов ответственности

Человек, являющийся объектом ответственности, может быть одновременно и субъектом ответственности. Так, например, пассажир авиалайнера, будучи объектом ответственности командира корабля, является субъектом ответственности по отношению к пилотам, поскольку должен соблюдать правила поведения на борту самолёта и не мешать исполнению ими служебных обязанностей. Взаимосвязь субъектов ответственности является фактором, придающим проблемный характер распределению персональных ответственностей в сложных системах.

Решение этой задачи осложняется ещё и тем, что довольно часто человек склонен переложить хотя бы часть ответственности на других людей. Как отмечается в [5], «значительная часть персонала вовсе не возражают, чтобы ими управляли авторитетные менеджеры и готовы выступать в роли неразумных детей в обмен на снижение ответственности», а «управляемые менеджерами организации, характеризуемые иерархическими бюрократизированными авторитарными структурами, словно специально построены таким образом, чтобы снять с менеджмента бремя социальной ответственности. Однако ответственность может быть только личной, и её нельзя делегировать, поэтому, когда ответственность берёт на себя организация, общество, нация, оказывается, что никто лично ни за что не отвечает».

3 Динамика распределения ответственностей

Структура сложной системы начинает формироваться акторами, каждый из которых берёт на себя ответственность за осуществление и результаты определённого вида (или, нескольких видов) деятельности. Их объединение в холон приводит к появлению нового вида деятельности, ответственность за которую несёт уже другой актор [1]. Дальнейшее развитие холонической системы по этой схеме приведёт к новому распределению ответственностей, т.е. имеет место динамика распределения ответственностей.

Один из холонов выполняет функцию центра ответственности, выступает в роли координатора, консолидирующего усилия других холонов для решения той или иной задачи (оказания услуги, производства товара и т.п.), вступая с ними в некоторую систему отношений. Совместно они оказывают консолидированную услугу как согласованную совокупность действий группы холонов, нацеленных на достижение общего, значимого для них результата [1].

Заключение

Для эффективной организации и принятия решений необходимо обеспечить доступность распределения персональных ответственностей в сложной системе широкому кругу пользователей. С этой целью целесообразно разработать «онтологию ответственностей», используя онтологический подход [6], имеющий ряд преимуществ по сравнению с известными в плане структуризации эмпирической информации и её визуализации.

Список литературы

[1] В.А. Виттих. Организация сложных систем. – Самара, Самарский научный центр РАН, 2010.
[2] С.И. Ожегов. «Словарь русского языка». – Издательство «Советская энциклопедия», М., 1973.
[3] Новая философская энциклопедия (в четырёх томах), т.3. – М., «Мысль», 2010.
[4] М. Хайдеггер. Бытие и время. – Харьков: «Фолио», 2003.
[5] К. Клок, Дж. Голдсмит. Конец менеджмента и становление организационной демократии. – СПб.: Питер, 2004.
[6] В.А. Виттих, П.В. Ситников, С.В. Смирнов. Онтологический подход к построению информационно-логических моделей в процессах управления социальными системами. – Вестник компьютерных и информационных технологий, №5, 2009, с. 45-53.

ИНТЕРСУБЪЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ОБУЧЕНИИ

В.А. Виттих, Т.В. Моисеева

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
vittikh@iccs.ru
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *интерсубъективное управление, обучение, предметно-ориентированный подход, проблемно-ориентированный подход, принятие решений, актор, консенсус*

Abstract

The article deals with the historical roots and summaries of the subject - and problem - oriented approaches to education. The necessity of developing the problem-oriented approach to instill students with the skills in formulating and solving problems in real life is confirmed. Theory of intersubjective management is proposed to use as the basis of the development of the problem - oriented education methodology.

Введение

Традиционное представление о процессах управления в обучении связывается с формированием системы органов управления, разрабатывающих нормативные документы, регулирующие деятельность образовательных учреждений, которые организуют собственно учебный процесс, обеспечивая управление персоналом, подбор контингента учащихся, составление расписаний занятий и их реализацию, а также контроль показателей, характеризующих качество обучения. Учащиеся являются объектами управления, на которых сфокусирована деятельность субъектов управления – преподавателей. Причём роль последних в процессах обучения является до сих пор предметом дискуссий, несмотря на то, что профессия учителя имеет многовековую историю. Кто-то считает, что для решения главной задачи учителя - «наполнения обучаемого знаниями» (подобно тому, как сосуд заполняется водой) - необходимо разработать совокупность приёмов (управляющих воздействий), обеспечивающих «перегрузку» в память ученика, рассматриваемого в качестве «пассивного объекта», необходимой дозы информации из учебника или от самого учителя. В отличие от такой «субъект – объектной» модели, другая точка зрения предполагает «субъект – субъектную» схему отношений, при которой взаимодействуют два активных начала – учитель и ученик, что даёт возможность чаще всего повысить качество обучения, например, увеличить скорость усвоения материала. Однако, несмотря на имеющееся принципиальное различие в методике, оба подхода призваны получить один и тот же результат – вооружить обучаемого некоторым объёмом знаний и навыков.

Таким образом, цель обучения считается, как правило, априори ясной и заданной, различаются и разрабатываются только способы её достижения, т.е. вопрос «что делать?» обычно не ставится, а ищутся ответы на вопрос «как делать?». Поэтому в статье рассмотрено смысловое содержание понятия «обучение», которое претерпевало изменения, начиная ещё со времён Античности.

1 Исторические корни предметно – и проблемно – ориентированного подхода к обучению

Платоновский Сократ связывал обучение с майевтикой – повивальным искусством: полагая, что человек является «беременным» знанием, Сократ видел свою роль в том, чтобы помочь ему «родить» мысль или мудрость, опровергая неверные толкования предмета исследования, но не давая верного толкования, поскольку слушатель Сократа и читатель Платона (обучаемый) должен был «родить» его сам. В процессе «родов» - диалогового обучения сталкивались различные точки зрения, опровергая и «взаимно очищая» друг друга, но не произнося окончательное суждение о предмете [1]. Сократ – учитель обеспечивал, таким образом, «ненавязчивое» управление процессом обучения, «подталкивая» обучаемого к постижению истины путём анализа его высказываний и постановки «направляющих» вопросов. Такая платоновская диалектика исходила из необходимости достижения диалогического взаимопонимания людей в процессе совместного обсуждения проблемы, благодаря которому через столкновение различных, зачастую противоположных, субъективных точек зрения формировалось мнение, т.е. не достоверное, а вероятно истинное, правдоподобное знание [2].

Аристотель поставил и дал ответ на вопрос о достоверном знании и методах его доказательства, к которым относятся аристотелевская аналитика, силлогистика и теория дедукции. В соответствии с законом противоречия (непротиворечия) вещь не может обладать и одновременно не обладать некоторым свойством, а суждение не может быть одновременно истинным и ложным. Тогда при наличии истинных посылок существует один правильный вывод, единственное верное решение. Система логики Аристотеля и его учение об истине стали основой классической науки, прежде всего естествознания, имеющей дело с вечными, неизменными или повторяющимися объектами природы, относительно которых субъект – исследователь может приобретать объективно - истинные знания, будучи дистанцированным от объектов познания (в таких случаях говорят, что имеет место субъект – объектная оппозиция).

Поскольку наука занималась приобретением новых знаний, обучение стали трактовать как процедуру передачи этих знаний обучаемому. И такое представление об обучении, в силу объективности научных знаний, стало доминировать в обществе. Знания оказалось возможным систематизировать, структурировать и разбить на достаточно самостоятельные «блоки знаний», которые не должны были содержать примеси человеческой субъективности. Управление учебным процессом необходимо было организовать таким образом, чтобы обучаемый достигал понимания существа материала, представляемого ему в виде текстов (в широком смысле), и запоминал требуемый объём информации о предмете (дисциплине). И такой предметно (дисциплинарно) - ориентированный подход был использован не только в преподавании классических дисциплин (физики, математики, химии и т.п.), но и был распространён на все те предметы, которые связаны с изучением человеческого общества. В результате произошла своеобразная «методологическая аберрация»: общество, являющееся продуктом сознания и воли людей, предлагалось изучать с применением «субъект-объектной оппозиции», «вынося» обучаемого из объекта и делая его сторонним наблюдателем.

В то же самое время была незаслуженно забыта платоновская диалектика – первооснова науки об управлении обществом, которая, как уже отмечалось выше, исходит из необходимости достижения диалогического взаимопонимания субъектов в процессе обсуждения некоторой проблемной ситуации, в отличие от аристотелевской аналитики, которая не нуждается ни в каком выражении согласия партнёров, озабоченных решением волнующей их проблемы [2].Таким образом, следует признать, что к Платону восходит проблемно – ориентированный подход к обучению, в то время как к Аристотелю – предметно - ориентированный. Последний, в силу его ориентации на приобретение объективно-истинного знания, всегда был в центре внимания и продолжает преимущественно использоваться и сегодня, а вот проблемно-ориентированный подход, если и применяется, то фрагментарно. Произведём краткий сравнительный анализ процессов управления в каждом из них.

2 Предметно-ориентированное обучение

Такому подходу соответствует традиционное представление о процессах управления в обучении, упомянутое во введении. Ключевую роль здесь играет «учебная дисциплина» (предмет), содержание которой обычно является результатом большой научной и учебно-методической работы. Учебная дисциплина представляет собой в достаточной степени автономную и замкнутую концептуальную систему с фиксированным набором понятий, законов, теорий, методов решения задач и иных видов знаний, что создаёт основу для её формализованного представления и определённые удобства при организации процессов управления в обучении, которое трактуется в данном случае более узко, а именно, как понимание (усвоение смысла) данной конкретной дисциплины, запоминание её основных положений и умение использовать их при решении теоретических и практических задач. Следует подчеркнуть, что при таком предметно-ориентированном обучении задачи должны быть сформулированы в замкнутой форме, т.е. из них должна быть удалена неполнота, избыточность и неоднозначность [3], поскольку в противном случае обучаемый не сможет её решить. И это обстоятельство необходимо рассмотреть более внимательно.

Дело в том, что умение решать «рафинированные» задачи в рамках той или иной дисциплины вовсе не означает, что обучаемый (школьник, студент) сможет делать то же самое в реальной жизни, поскольку «жизненные» задачи, наоборот, отличаются и неполнотой, и избыточностью, и неоднозначностью. Не случайно, поэтому, выпускники вузов, которые чаще всего используют предметно-ориентированный подход к обучению, попав на производство, оказываются не в состоянии решать возникающие перед ними задачи, обычно не соответствующие «шаблонам» вузовских учебных дисциплин. Тогда возникает необходимость продолжения обучения в стенах предприятия, что чаще всего вызывает негативную реакцию его руководителей. По этой причине и возникают проблемы с распределением молодых специалистов. Но это не единственный недостаток предметно-ориентированного обучения.

Этот подход базируется на гипотезе об однородности (гомогенности) человеческого общества: весь процесс обучения не должен зависеть от особенностей личностей ни учителя, ни ученика. Поэтому процессы управления в обучении «обезличены» и «механистичны», как это принято в «идеальной бюрократии». Регламентация процедур становится руководящим принципом, который стремится «свести на нет» проявление любого творческого начала. Здесь могло прозвучать возражение: и в школах, и в вузах есть много преподавателей, исповедующих и реализующих творческий подход к обучению. С этим нельзя не согласиться. Но делают они это вопреки «жёсткой» дисциплинарно-ориентированной системе обучения, изначально задуманной как дидактический механизм, инвариантный по отношению к личностям учителя и ученика. Иной подход заложен в проблемно-ориентированном обучении.

3 Проблемно-ориентированное обучение

Здесь в центре внимания фокусируется проблемная ситуация, поскольку человеческое бытие всегда есть бытие в некоторых ситуациях. Любой человек должен уметь осознавать себя в сложившейся ситуации, приобретать знания о текущем состоянии дел, коммуницировать с другими людьми – участниками ситуации с целью подготовки и принятия совместных решений о способе урегулирования ситуации, а также уметь оценивать возможные последствия принятых решений. Понятно, что человек должен уметь формулировать и решать проблемы, для чего, собственно, и необходимо проблемно – ориентированное обучение. При этом, конечно же, ему могут понадобиться знания, полученные при предметно-ориентированном обучении. И в этом смысле эти два подхода взаимно дополняют друг друга, хотя и с разными «весовыми коэффициентами»: если дисциплинарное обучение находится в «штатной эксплуатации», то проблемное – в процессах научного поиска и проведения педагогических экспериментов.

Наиболее распространённый приём – предложить обучаемому найти выход из предварительно описанной ситуации в условиях, когда учитель знает ответ и наводящими вопросами «подталкивает» к нему ученика, который в процессе поиска решения приобретает какие-то практические навыки. Однако это – идеализированный случай, когда задача поставлена и результат её решения известен заранее. В реальной жизни человек должен, прежде всего, осознать себя в ситуации, понять её смысл с учётом того, что в ней присутствуют и действуют другие люди, и только после этого начинать искать пути совместного урегулирования ситуации. Для этого нужно достичь взаимопонимания, создав интеграционную «платформу знаний», на базе которой все те, кто причастен к ситуации, принимали бы согласованные управленческие решения.

Иными словами, проблемно-ориентированное обучение, в конечном счёте, сводится к тому, чтобы ученики приобретали навыки и умения принимать коллегиальные решения в условиях неопределённости, когда задачи ещё не сформулированы, когда между участниками ситуации ещё не достигнуто взаимопонимание, и когда ещё не определён объём знаний, необходимый для урегулирования ситуации. С этой точки зрения в основу разработки методологии проблемно-ориентированного обучения целесообразно положить теорию интерсубъективного управления [4].

4 Теория интерсубъективного управления в обучении

Теория интерсубъективного управления опирается на понятие проблемной ситуации, смысловое содержание которой должны осознать акторы, выполняющие познавательно - деятельностные функции и участвующие в принятии решений по её урегулированию [4]. Поэтому отправной точкой, предшествующей этому осознанию, является информация, почерпнутая из реальной жизни, на основе которой ситуация может быть расценена акторами как проблемная. В учебном процессе, нацеленном на постановку и решение проблем, основные этапы которого представлены на рис. 1, роль акторов выполняют обучаемые. В качестве первого шага им должна быть представлена специальным образом подобранная "проблемообразующая" информация, знакомая учителю, выполняющему функцию координатора. По мере осознания проблемной ситуации учащиеся будут коммуницировать друг с другом, формируя интерсубъективную систему, в рамках которой они будут договариваться о приемлемом для всех способе решения проблемы (учитель при этом должен определить роль каждого ученика в сложившейся ситуации и связанную с ней систему ценностных приоритетов).

На начальной стадии процесса понимания ситуации каждый обучаемый будет опираться на имеющееся у него ее предпонимание: как нет познания без знания, так и нет понимания без предшествующего ему предпонимания. Предпонимание, выражающее предметный мир обучаемого, находящийся в его «поле зрения», по сути дела, представляет совокупность априорных персональных знаний учащегося, на основе которых он постигает смысл ситуации. Иными словами, в первую очередь актуализируются (оказываются задействованными) именно персональные знания, приобретенные обучаемым еще до появления проблемной ситуации.

Далее, для того чтобы совместными усилиями овладеть ситуацией, учащиеся должны договориться о разделяемых всеми принципах принятия решений, о некоторых общих «правилах игры». Результатами таких соглашений являются интерсубъективные знания. На основе персональных и интерсубъективных знаний, представляемых в компьютерах с помощью онтологий [5], обучаемыми совместно строится онтологическая модель ситуации (ОМС), с помощью которой они постигают смысл проблемной ситуации. Онтологии, описывающие персональные и интерсубъективные знания, отличаются от ОМС тем, что в них содержатся абстрактные понятия и отношения между ними, а в ОМС представляются конкретные объекты реального мира, относящиеся к текущей проблемной ситуации [4]. В первоначально разработанной ОМС отражается понимание проблемы обучаемыми, но между ними еще не достигнуто взаимопо-

нимание относительно устраивающего всех (т.е. соответствующего точке зрения каждого обучаемого) способа урегулирования проблемной ситуации. Тогда учащиеся начинают проводить эксперименты с ОМС, с одной стороны, отстаивая свои позиции, а с другой – учитывая интересы своих коллег и групповые ценностные ориентиры. Происходит постепенная трансформация ОМС, в результате которой разрабатывается ОМС, разделяемая всеми учащимися, в которой, наконец, и достигается их взаимопонимание. Принятие решения об урегулировании проблемной ситуации (решении проблемы), таким образом, напрямую связывается с достижением взаимопонимания обучаемых и консенсуса, который не означает, что «все – за», а означает лишь, что «никто не против».

Рисунок 1 – Этапы процесса обучения постановке и решению проблем

Рассмотрим кратко применение предлагаемого подхода к обучению постановке и решению инженерных проблем.

5 Обучение постановке и решению инженерных проблем

Сегодняшние выпускники технических вузов, обучающиеся широкому спектру общенаучных и инженерных дисциплин на основе предметно-ориентированного подхода, получив диплом, не всегда умеют применять полученные знания на практике. Они обычно не имеют навыков постановки задач и принятия решений и, попав в реальной обстановке в некоторую проблемную ситуацию, чаще всего не понимают, как найти из нее выход. Проблема интеграции выпускников технических вузов в производство связана с адаптацией бывших студентов к

реальному жизненному миру, поэтому предлагается применить интерсубъективную теорию управления обучением постановке и решению проблем, с которыми молодые специалисты могут столкнуться на предприятиях.

Для того чтобы понять, как такая схема процесса обучения может быть реализована на практике нужно дать ответы на целый ряд вопросов.

Как лучше представить информацию? Всей группе? Разделить группу студентов на несколько частей и выбрать для каждой группы своего преподавателя? По какому принципу произвести такое деление? Каков оптимальный размер группы? Как провести распределение ролей в группе (студенты сами выбирают для себя «должности», например, экономиста, программиста или аналитика, или их раздает преподаватель)? Каким должен быть интерьер помещения, в котором проходят занятия? Какое оборудование необходимо для проведения занятий?

Сегодня невозможно себе представить современные занятия без использования электронных средств и компьютерной техники. Мы думаем, что компьютерные классы, или лаборатории вычислительной техники, уже не понадобятся. Сегодня практически все студенты имеют телефон или смартфон с выходом в Интернет, Ipad и ноутбук и предпочитают пользоваться на занятиях своими устройствами. Поэтому они могут применять свою технику с привычным и удобным интерфейсом. ПК пригодятся не только для поиска информации в Интернете, но и для связи друг с другом (можно передавать найденную информацию и выстраивать ОМС, например, создав группу в Контакте или Facebook'е).

Следующий шаг - представление информации преподавателем в удобной для восприятия студентами форме. Преподаватель сталкивается с очень трудной задачей подбора и презентации информации, поскольку от того, как он это сделает, зависит весь дальнейший ход обучения. Он должен не только быть профессионально грамотным, но и разбираться в актуальных для студентов темах, говорить с ними на одном языке. В любом случае, подача исходного материала должна быть такова, чтобы учащиеся поняли, что есть некоторая проблема, требующая поиска выхода из нее.

Возможен и другой вариант. Преподаватель ведет беседу со студентами, умело направляя ее в такое русло, что кто-то из студентов вдруг осознает, что вот она проблема, требующая разрешения! Вполне возможно, что до начала занятия преподаватель и не предполагал, что студентов может заинтересовать именно эта ситуация.

Следует отметить, что этап подачи материала крайне важен, и результат во многом зависит от того, насколько преподаватель сможет заинтересовать студентов, сделать так, чтобы им захотелось искать выход из создавшейся ситуации. Возможно, проблемно-ориентированное обучение следует начинать с формулирования, анализа и поиска выхода из ситуаций, которые близки и очень важны самим студентам, приближая их со временем к более профессиональным.

В любом случае, конструирование «проблемообразующей» информации является ключевой задачей, требующей поиска ее решений. Специалисты, работающие на производстве, могут помочь с ее предоставлением, но ведь и они не владеют опытом проблемно-ориентированного обучения, а для того, чтобы получить эту информацию из реальной жизни, нужна некоторая методика, которая пока еще не разработана.

Процесс осознания ситуации занимает некоторое время, в течение которого студенты задают вопросы друг другу, преподавателю и другим компетентным лицам, ищут недостающую информацию в Интернете, справочниках, словарях и доступных литературных источниках, вспоминают, что им уже известно из разных учебных курсов (математики, программирования, социологии, маркетинга и др.). При этом из потока информации каждый извлекает интересующие его сведения, которые подвергает субъективной оценке. И тут возникает еще один вопрос, следует ли только проводить занятия в учебной аудитории или, возможно, студенты должны получать какие-то задания на дом.

На работу аудитории во время обсуждения следует обратить особое внимание. Скорее всего, студенты разделятся на несколько групп. Среди них будут: живо участвующие в обсуждении и смело выдвигающие новые предположения; «последователи», поддерживающие живо участвующих и развивающие их предположения; молчащие; саботирующие. Казалось бы, негативная роль двух последних групп очевидна. Мы привыкли применять свой педагогический талант для ее минимизации. Однако, при анализе ситуаций и постановке проблем возражающие и молчащие имеют и благоприятное влияние на обсуждение. Именно таким оппонентам стараются привести веские аргументы, объяснить свою точку зрения более обоснованно.

Поскольку в любой учебной аудитории оказываются люди с разными знаниями, культурой, психологическими особенностями, мировоззрением, они и информацию будут воспринимать по-разному. Часть аудитории может не увидеть проблемы, требующей немедленного решения, а кто-то (будущее действующее лицо проблемной ситуации – актор) живо заинтересуется происходящим. И здесь очень важна вовлеченность в ситуацию, осознание принадлежности к ней и заинтересованность акторов - учащихся, которые будут искать и принимать согласованное решение о выборе способа выхода из проблемной ситуации лоурархически (то есть по принципу «снизу вверх») [4], а не по «иерархическому» приказу преподавателя - руководителя. Может оказаться достаточно сложно заставить себя отказаться от привычного взгляда на иерархию подчинения, когда доминирующим, «правильным» взглядом является мнение руководителя, родителей, преподавателей.

Такое вовлечение студента в процесс обучения, когда он оказывается не только объектом, а его активным участником, его субъектом, должно помочь развить мыслительные, коммуникативные, творческие способности учащегося, повысить его способность к самоорганизации, сформировать умение самостоятельно находить решение не только профессиональных (в частности, инженерных) задач, но и любых других, которые жизнь ставит перед ним.

В процессе осознания студентом проблемной ситуации у него рождается свое субъективное предпонимание [4], как совокупность его собственных априорных знаний и представлений о мире, которое зависит не только от того, какими знаниями он владеет, но и от его жизненного опыта: в каких ситуациях в своей жизни он оказывался, какая атмосфера царит в его семье, каковы его религиозные воззрения, каких морально-этических норм он придерживается и т.д. Для достижения взаимопонимания студенты обмениваются друг с другом информацией, оказавшись связанными общей проблемной ситуацией. Они осознают её по-разному, что дает возможность анализировать ситуацию с разных сторон.

А дальше всем нужно договориться (и это важная коммуникативная составляющая интерсубъективной теории) и принять согласованное решение о способах регулирования проблемной ситуации. Следует обратить особое внимание на то, как студенты общаются друг с другом в ходе достижения взаимопонимания в процессе принятия решения. Сложная задача преподавателя заключается в том, чтобы организовать общение с помощью дискурса, т.е. такой формы коммуникации, в ходе которой высказывания друг друга тщательно проверяются, понимаются, уточняются, критикуются и, наконец, принимаются или отвергаются.

Для достижения консенсуса студенты разрабатывают «платформу знаний», признаваемых общезначимыми. Очень важно найти такую форму обсуждения, при которой признается равенство партнёров и запрет какого-либо их принуждения к согласию.

Для лучшего понимания ситуации на занятии строится онтологическая модель ситуации [4], дающая некоторое интегрированное представление о проблемной ситуации, выражающая разделяемое всеми учащимися и преподавателем общее понимание ситуации, что равносильно постановке задачи. Далее проводится «обыгрывание» ситуации (эксперименты с ОМС), в ходе которого каждый отстаивает свои позиции, учитывая интересы соучеников и групповые ценностные ориентиры, до тех пор, пока не «родится» некая онтологическая модель ситуации, одобряемая всеми.

Задача преподавателя - помочь принять решение по урегулированию проблемной ситуации на основе консенсуса, т.е. общего согласия учащихся по спорным вопросам, достигнутого путём переговоров благодаря сближению позиций всех участников, потому что если построенная модель не устраивает хотя бы одного из участников обсуждения, то решение не должно приниматься. Как видно из схемы (рис. 1), в этом случае происходит возврат на любой из предшествующих этапов принятия решения.

Такие итерации могут неоднократно повторяться, что будет приводить к затягиванию сроков принятия решения, и для того, чтобы они не выходили за рамки отведенного на занятии времени, преподаватель должен отслеживать скорость развития ситуации.

В результате применения теории интерсубъективного управления в обучении учащиеся приобретают опыт эффективного использования своих интеллектуальных и волевых ресурсов, находясь в проблемной ситуации и стремясь совместными усилиями найти из неё выход. В дальнейшем, находясь в реальных жизненных ситуациях они уже будут владеть навыками подготовки и принятия решений и окажутся более востребованными на рынке труда.

Заключение

Не умаляя важной роли классического предметно-ориентированного обучения, являющегося своеобразным фундаментом образования, необходимо развивать проблемно-ориентированный подход к обучению, призванный прививать учащимся навыки в постановке и решении проблем, возникающих в реальной жизни. В настоящее время учебные процессы в школах, вузах и других учебных заведениях ориентированы, в основном, на решение поставленных кем-то (не обучаемым) задач. Однако, жизненная практика такова, что человек, сталкиваясь с проблемной ситуацией, должен прежде всего овладеть ситуацией, понять ее смысл, и только после уяснения постановки задачи приступать к поиску способа урегулирования ситуации, т.е. к решению проблемы. Причем делать это он должен, как правило, не в одиночку, а коммуницируя с другими людьми, осознающими себя в той же ситуации.

Обладая интерсубъективным сознанием, человек изначально способен к диалогу, взаимным убеждениям, компромиссам и т.п., которые, в конечном счете, позволяют ему достигать взаимопонимания и консенсуса с другими людьми. Проблемно-ориентированное обучение должно развивать эти возможности человека, создавая ему необходимые условия для этого. Речь идет, прежде всего, о разработке соответствующего методического обеспечения и подготовке кадров преподавателей. Обе эти проблемы относятся к разряду чрезвычайно сложных, для их понимания и решения нужен адекватный научный фундамент.

Для его создания в статье предложено использовать теорию интерсубъективного управления, с помощью которой определены этапы процесса обучения постановке и решению проблемы, и сформулировано их основное содержание. Изложенный подход к проблемно-ориентированному обучению может быть применим не только в техническом вузе (о чем речь шла в разделе 6), но и в других учебных заведениях (школах, лицеях, колледжах и в учреждениях, занимающихся послевузовской подготовкой кадров).

Список литературы

[1] Новая философская энциклопедия (в четырёх томах). – М.: Мысль, 2010.

[2] В.А. Виттих. Платоновская диалектика как первооснова науки об управлении обществом. – Онтология проектирования, № 2, 2013, с.9 – 11.

[3] Ж.-Л. Лорьер. Системы искусственного интеллекта. – М.: Мир, 1991.

[4] В.А. Виттих. Введение в теорию интерсубъективного управления. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. - 64 с.

[5] С.В. Смирнов. Онтологии как смысловые модели. – Онтология проектирования, №2, 2013, с. 12-19.

ИГРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Б.Н. Герасимов

Международный институт рынка
443030, Самара, гул. Г. Аксакова, 21, Россия
boris0945@mail.ru
(846) 261-59-25

Ключевые слова: *игра, моделирование, процесс, сценарий, технологии*

Abstract

Problem-situational games, being one of the types of intensive technologies of teaching are gives in the work. One of the types of modeling of collective thinking activity problem-situational games being one of the types of collective thinking activity are given in the work. Aims and tasks, scenario, participants, technologies, the main kinds of results of problem-situational gaming modeling are given.

Введение

Начало XXI в. для России связаны с серьезными изменениями многих сторон жизни и деятельности людей. Идет поиск путей реформирования экономики, переоценка роли и значения предпринимательства, финансов, внешнеэкономических и социальных связей. Эти и другие инновации, сами по себе являются значительным стрессом для общества, проходzn на фоне последствий экономического кризиса.

Одним из инструментов формулирования проблем, разработки и принятия управленческих решений по их разрешению является игровое моделирование. Характерными особенностями игровых технологий, отличающихся от традиционных подходов и методов, являются:

- организационная и технологическая активизация процесса мышления;
- длительная и устойчивая деятельность участников;
- творческий характер и эмоциональная окрашенность процессов мышления и деятельности, дискуссии, индивидуальной и групповой работы;
- коллективизация процесса принятия решений;
- повышение интенсивности мышления, деятельности и коммуникаций.

Применение деловых игр (ДИ), несмотря на их эффективность при решении задач учебного, исследовательского и производственного характера, в течение XX в. не смогло преодолеть затруднения при рассмотрении сложных полипредметных проблем. Эти затруднения связаны с принципиальной невозможностью разрешения проблем развития деятельности на задачном уровне и невозможностью проблематизации как таковой. От участников игры требуется различение задач и проблем, что стимулирует формирование личных потребностей в построении понятия проблемы, приобретении способностей к депроблематизации деятельности.

В конце 70-х гг XX в. возникли организационно-деятельностные игры (ОДИ), с помощью которых ставятся и решаются крупномасшабные проблемы [2]. Возникновение и использование ОДИ обуславливается сложностью получения глубоких, содержательных результатов в процессе применения ДИ. Однако ОДИ решают, как правило, проблемы вчерашнего и сегодняшнего дня и не нацелены на решение проблем, с которыми может столкнуться организация в процессе инновационной деятельности завтра и послезавтра.

Проблемно-ситуационные игры (ПСИ) определяются как одно из средств коллективного решения большого спектра проблем, нацеленных на выход в пространство профессиональ-

ных и предметных задач, их решение, а затем сборку решения проблемы [2]. Особенностью ПСИ является учет ситуационной составляющей. Причем они ориентированы на будущее и должны учитывать динамику изменений параметров, которые могут произойти к моменту завершения инновационного процесса (получения коммерческого результата). Особо важную роль играют ПСИ в исследовании, построении и реализации инновационной деятельности.

В ПСИ решение конкретной проблемы заключается в выработке программы действий, в выборе направления движения, позволяющего выйти из затруднений. Линия развития личности присутствует обязательно, ибо без этого трудно отыскать позитивную программу и, главное, невозможно будет реализовать ее после игры, и создать коллектив, способный преодолевать серьезные затруднения в своей деятельности. Методологическое направление затруднительно реализовать даже в рамках ПСИ, так как силы игротехнического коллектива в основном направлены на содержательные цели. Однако, если в послеигровой период производится детальный анализ игрового процесса, то происходит обогащение игротехнического коллектива в методологическом отношении. Важнейшей целью ПСИ следует считать постановку и решение некоторой проблемы, которая определяется заказчиком, организаторами или идеологами игры. Кроме того, могут быть поставлены следующие цели:

учебные, т.е. освоение участниками (студентами, слушателями) новых методов и средств менеджмента, профессиональной деятельности, мышления, организации работы, принятия управленческих решений и т.д.;

исследовательские, включающие изучение состояния или уровня организации, объекта, процесса, явления и т.д. или демонстрацию их использования на конкретном материале;

методологические, ориентированные на создание новых средств и методов мышления и деятельности, а также на эксперименты по использованию различных сочетаний уже известных методов.

Игровой комплекс включает игровой коллектив (игротехническую команду и команды игроков), игротехнические методы и средства, сценарий игры, систему оценивания, объект игровой деятельности (рис. 1).

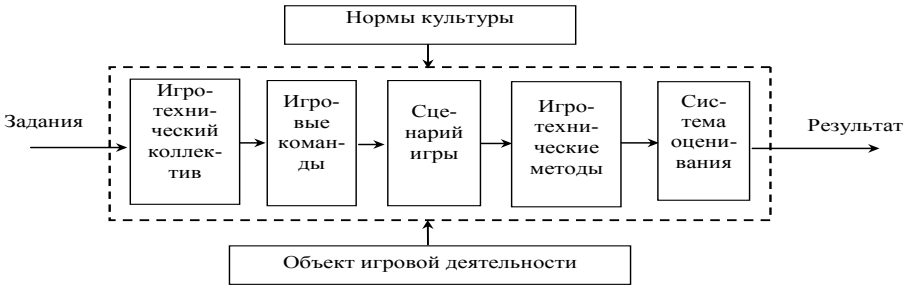


Рисунок 1. - Игровой комплекс проблемно-ситуационной игры

Команды игроков состоят собственно из участников игровой деятельности, т.е. из представителей организации, выполняющих как на работе, так и в игре примерно одни и те же функции. Игротехнический коллектив осуществляет руководство игрой и имеет в своем составе различных специалистов. Представители только одной из категорий специалистов - игротехники - входят в оба коллектива: игротехнический и команды игроков, что связано с взаимным переносом информации и доведением заданий до каждого участника игры.

Процесс *организации и проведения ПСИ* состоит из трех этапов: подготовительного (доигрового), игрового и послеигрового (аналитического).

На этапе подготовки игры игротехнический коллектив проводит первичный анализ исходной ситуации, осуществляет выбор и диагностику объектов. С учетом анализа полученных у заказчика исходных данных определяются все потенциальные субъекты, прямо или косвенно

заинтересованные в функционировании объекта, его развитии или коррекции; определяется тематика игры и формируются темы постановочных докладов по теории и практике предметных областей деятельности заказчика (студентов, слушателей) и смежных отраслей знаний. По результатам проведенной работы создается сценарий и рабочие программы ПСИ, ведется подготовка анкет участников, определяется состав команд, раздается программа, выполняется подготовка к игре (раздаточные материалы для участников, помещение, аппаратура и др.).

В процессе собственно игрового моделирования на каждом из этапов (туров) игры выполняются процедуры базовой модели деятельности, конкретный состав которых может корректироваться в соответствии со сценарием игры и реализоваться непосредственно в ходе игры либо игротехниками, либо командами в ходе самоопределения.

На послеигровом этапе выполняется аналитическая обработка результатов игры, готовится сводный отчет с приложением протокола хода обсуждения полученных результатов, формируются рабочие планы исполнителей по проекту организации совместной деятельности, разрабатываются технические задания на работы, а также на проведение игр для решения смежных проблем. Особое внимание на послеигровом этапе уделяется рефлексивному обобщению результатов для обеспечения качества и повышения эффективности применяемых игровых моделей, а также процедур обработки данных.

Процесс проведения ПСИ регламентируется *сценарием*, степень детализации которого определяется темой игры, а также характеристиками контингента участников и игротехников. В сценарии указывается содержание и формы проведения отдельных этапов игры, а детализация и выбор игротехнических средств и техник остается на усмотрение группы или игротехника. Вместе с тем, важно обеспечить механизм управления процессом коллективной мыследеятельности в ПСИ и определенный регламент работы участников, что достигается использованием обобщенной модели сценария ПСИ (рис. 2) и введением системы документирования и оценивания результатов деятельности команд участников.

Рисунок 2 - Обобщенная модель проблемно-ситуационной игры

В сценарии ПСИ, как правило, должны присутствовать как минимум три тематических тура: оценка проблемной ситуации и формирование позиций участников; формирование структуры и механизмов деятельности; формирование программы деятельности. При этом необходимо учитывать, что каждый из туров, в свою очередь, может рассматриваться как отдельная игра и, соответственно, может быть детализирован на более мелкие игровые процедуры, встраиваемые в общую модель сценария игры.

В рамках управления игровым процессом в ПСИ важную роль играет формализация процедур подготовки и принятия согласованных решений, удовлетворяющих принципу минимальной сложности. Для этого в составе игрового комплекса используется набор унифицированных процедур оценки качества принятия решений, в состав которого входят блоки:

- идентификация состояния ситуации на момент принятия решений;
- формирование множеств оценочных элементов, выбор критериев и шкал показателей;
- формирование альтернатив решений по результатам работы групп;
- формирование таблиц отношений (связей) между элементами;
- упорядочение элементов по важности, обеспеченности ресурсами, целесообразности;
- оценка критериев, ресурсов по решениям групп или участников;
- выбор решений на основе принципа минимальной сложности.

Реализация процедур оценки может выполняться как с использованием экспертных методов балльного оценивания параметров и альтернатив, так и с использованием математических методов, многокритериального выбора в условиях неопределенности.

Технология проведения игры. Последовательность проведения этапов, процедур и операций ПСИ выступает как содержательная логика движения в деятельности по решению проблем, задач, ситуаций и является основным методологическим стержнем игрового процесса. Технология используется как архитектурная оболочка применения комплекса игротехнических методов, средств и техник [1]. Важнейшими факторами в достижении целей, поставленных при обсуждении проблем или их решении, являются:

- понимание назначения каждой процедуры в сочетании с умением приспосабливать разные к ней методы;
- организационные навыки руководителей (ведущих) игры в работе с персоналом;
- умение обосновать необходимость включения технологических операций;
- компетентность в использовании операций и процедур.

Одной из целей игры является стремление найти решение, по возможности близкое к оптимальному. Так как сделать это весьма затруднительно, то важнейшее правило применения технологии игрового процесса состоит в том, что улучшение любого найденного решения всегда возможно. Поэтому, проделав часть игровой деятельности, необходимо остановиться и оценить достигнутые результаты, что позволяет расширить представления об объеме и задачах игрового моделирования.

Для организации продуктивной деятельности в ПСИ используются разнообразные средства, которые можно объединить в три класса: логические, позволяющие выйти на получение содержательных результатов для каждого в отдельности; социальные, ориентированные на интенсификацию коллективных мышления и деятельности; психологические, направленные на преодоление участниками игрового процесса своих ограничений и раскрытие своих способностей и возможностей [3].

После проведения ПСИ могут быть получены следующие результаты:

содержательные (понимание проблемы или ситуации; освоение методов представления существующей и желаемой ситуации, проблематизация затруднений; перевод проблемы в плоскость предметных или профессиональных задач; формулирование или идентификация задач, нахождение альтернатив и сравнение их между собой; осуществление выбора критериев отбора альтернатив, освоение методов разработки программ, проектов);

социальные (освоение средств организации коллективной мыследеятельности; развитие мотивации к эффективному участию каждого человека в групповой работе; умение управлять конфликтом, стрессом; умение определять и выдвигать лидеров).

психологические (понимание состояния людей в процессе профессиональной деятельности, освоение средств эффективного воздействия на людей);

педагогические (осмысление возможностей решать собственные проблемы, освоение средств мышления и деятельности, повышение восприимчивости к инновациям, разрушение стереотипов мышления, осмысление средств видения себя и других);

*методологические (*приобретение способности ориентироваться в поле имеющихся средств мышления, деятельности; приобретение способности модифицировать имеющиеся средства и создавать новые средства; освоение способности обучать применению средств).

Отметим, что получение психологических и методологических результатов является важным фактором эффективности проблемно-ситуационного игрового моделирования в целом.

Игровое моделирование наиболее успешно может применяться в инновационной деятельности. Благодаря использованию ПСИ на практике, сформировался набор универсальных технологий для поддержки инновационной деятельности организации [1]. В рыночных условиях организации все чаще сталкиваются с необходимостью максимизации прибыли как от основной, так и от инновационной деятельности, которая может быть достигнута за счет трех основных факторов: увеличения цены, снижения себестоимости, повышения объема продаж.

Например, методом дерева решений можно пользоваться в ситуациях, когда данные о результатах не влияют на все последующие решения, однако дерево решений можно построить под более сложную ситуацию, когда результаты одного решения влияют на множество других решений. Наилучшие решения принимаются коллективно после рассмотрения всех вариантов ведущими специалистами организации. Выбранные мероприятия ложатся в основу стратегии инновационной деятельности организации на ближайшую перспективу. Дерево решений по увеличению прибыли может быть рассмотрено в процессе игровой деятельности как в рамках учебного процесса, так и процессе проблемно-ситуационного исследования деятельности организации [2].

Для осмысленного и целенаправленного разрешения ситуации, проблематизации, формирования пакета решений в игровом процессе, на игре-совещании или даже на обычном совещании автором разработан метод активного коллективного тестирования (МАКТ).

Для участия в коллективной работе приглашаются ведущие специалисты, обладающие соответствующей квалификацией, компетенцией, опытом, широтой взглядов, а также не только умением отстаивать и аргументировать свои позиции и взгляды, но и навыками конструктивного и рефлексивного отношения к обсуждаемым предложениям (идеям).

Участники игры определяют перечень проблем и предложений по решению каких-либо ситуаций. Для этого вначале участники формулируют противоречия и определяют барьеры в деятельности, обозначают проблемы, исследуют предложения по их решению. При этом на всех этапах выполняется оценка предложений по показателям, представленным ниже.

В – важность проблемы для организации, т.е. степень ее влияния на эффективность деятельности организации по 10-балльной шкале.

0_____10

Такой проблемы в организации нет | Проблема очень важна и связана с потерями эффективности

М – масштаб проблемы, по шкале (0-10)

0_____10

Проблема касается незначительно деятельности организаций | Проблема касается организации в целом

С – степень сложности проблемы (0-10)

0_____10

Организация практически ничего не может сделать с проблемой | Проблема может быть решена силами самой организации

О – обеспеченность внутренними ресурсами (0-10)

0_____10

Для решения проблемы внутренних ресурсов не существует | Для решения проблемы внутренние ресурсы есть полностью

Т – тенденция развития проблемы, по шкале (+, 0, –) необходимо поставить знак

+, если в последние годы острота проблемы уменьшилась;

0, если острота проблемы осталась неизменной;

–, если острота проблемы увеличилась.

К – оценка компетентности по отношению к каждой проблеме (решению) (0-10)

0_____10

Абсолютное незнание данной проблемы или ее решения | Хорошее знакомство с этой проблемой или ее решением

В результате использования МАКТ появляются интегральные оценки значимости, сложности и обеспеченности всех предложений. Затем обсуждаются значения коэффициента весомости, одинакового или разного для всех предложений. В результате появляется оценка целесообразности реализации каждого предложения, по которым они ранжируются.

Коллективное мышление и деятельность, которые лежат в основе игровых моделей и технологий, требует такой организации процесса, при которой участники получают навыки и умения в процессе преодоления трудностей и препятствий, создаваемых новой формой постановки заданий. Ситуации, рассматриваемые в процессе игры, создают потребность в новом знании или умении, которая возникает в результате невозможности или сложности выполнения задания в условиях поиска неизвестного способа решения внутри ситуации и приводит к открытию новых возможностей для участников игры [3]. В результате проведения большинства ПСИ было достигнуто понимание того, что основные результаты заключаются не только в масштабе и уровне рассмотренных проблем и принятых решений, а в умении моделировать новые перспективные ситуации и находить средства для их реализации, что, в конечном итоге, обусловливает непрерывное развитие профессиональных и личностных качеств.

При использовании проблемно-ситуационного моделирования в решении управленческих проблем были получены содержательные социальные, психологические, педагогические и методологические результаты. Осмысление спектра возможностей позволяет выбрать направленность самого процесса моделирования и определить крут участников игрового процесса.

Технологии проблемно-ситуационного моделирования неоднократно использовались в разработке бизнес-планов и инновационных проектов студентами и слушателями ВУЗов и ИПК. Кроме того, проблемно-ситуационное моделирование неоднократно использовалось для разработки социально-экономических программ нескольких районов г. Самары, корпораций и отдельных предприятий.

Опыт применения проблемно-ситуационного моделирования и осмысление его результатов позволяет рекомендовать его как эффективное средство и кратчайший путь для формирования своих идей и предложений, разрушения сложившихся стереотипов мышления, воспри-

ятия культуры коммуникаций, конфликта, мыследеятельности в условиях дефицита времени. Погружение в процесс игрового моделирования представляет собой агностическую платформу для людей с методологическим складом ума и не успевших «запредметиться» специалистов, которые выбрали для себя предпринимательскую, управленческую или какую-либо другую полипредметную деятельность.

Список литературы

[1] Герасимов Б.Н. Теория управления: монография. – Самара: НОАНО ВПО СИБиУ, 2012. – 404 с. – Серия «Энциклопедия управленческих знаний».

[2] Герасимов Б.Н. Игровое моделирование управленческих процессов: монография. – Самара: СНЦ РАН, 2006. – 195 с.

[3] Герасимов Б.Н., Герасимов К.Б. Методология построения систем управления процессами: монография. – СПб.: СПбГИЭУ, 2012. – 218 с.

МОДЕЛИ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ В САМОРАЗВИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМАХ

Гусев В.Б.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная 65
тел (495)3348821, email: gusvbr@mail.ru.

***Ключевые слова**: воспроизводство, саморазвитие, механизмы автономного управления, непрерывные многопараметрические шкалы*

Abstract

The work presents models and methods of the formation of the mechanisms of autonomous control, evaluation and decision making in the long-term development periods of organizational systems. The mathematical settings of tasks and calculated procedures, connected with construction and use of the continuous multiparametric scales with calculation of estimations and decision making are presented. The proposed methods of obtaining the estimations of the state of the developing organizational systems, formation of the mechanisms of autonomous control represent as scientific, so also practical interest.

Введение

Поведение ряда динамических систем, таких, как социально-экономические, организационные, экологические, биологические, производственные характеризуется наличием процессов воспроизводства и саморазвития [1, 2, 3]. В состав упомянутых систем, как правило, входит внутренний контур управления. Благодаря этому в условиях изменяющейся (возможно дестабилизирующей поведение системы) внешней среды они обладают потенцией поддерживать в течение определенного времени установившийся характер функционирования. Последнее обеспечивается внутренними механизмами выбора, как управляющих воздействий, так и критериев принятия решений в соответствии с состоянием самой системы и внешней среды.

Одной из центральных задач анализа механизмов автономного управления является определение условий их применимости в соответствии с предъявляемыми требованиями и критериями.

Особый интерес представляют механизмы автономного управления, предназначенные для достижения определенной цели (оптимизации целевой функции, поддержания заданного значения контролируемого параметра). Такие механизмы будем называть целенаправленными. В частности, они могут соответствовать целям долгосрочного развития.

Для того, чтобы система могла воспроизводить условия функционирования в определенном диапазоне изменения состояний внешней среды, механизмы автономного управления требуют определенной настройки. Исследование таких механизмов целесообразно осуществлять с помощью математических моделей процессов и систем, обладающими свойствами саморазвития.

Формализация моделей автономного управления

Рассмотрим возможные формализованные подходы к анализу рассматриваемого класса систем.

Под *моделью динамической системы* будем понимать совокупность

$$< \mathbf{Y}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{X}, \mathbf{T}, \Omega >,$$

где $\mathbf{Y}$ – множество значений динамического вектора состояния системы, $\mathbf{P}$ – множество значений вектора параметров системы, $\mathbf{U}$ – множество значений векторов управления, $\mathbf{X}$ – множество значений вектора состояния внешней среды, $\mathbf{T}$ – множество значений параметра модельного времени, Ω – оператор действия системы

$$\mathbf{Z} \xrightarrow{\Omega} \mathbf{Y}.$$

Здесь $\mathbf{Z}$ – множество условий функционирования – прямое произведение множеств $\mathbf{X}, \mathbf{P}, \mathbf{U}$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{X} \otimes \mathbf{P} \otimes \mathbf{U}.$$

Под вектором состояния системы понимается векторная функция времени $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{Y}$, под вектором параметров – числовой вектор $\mathbf{p} \in \mathbf{P}$, под вектором управлений – векторная функция времени $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{U}$, под вектором состояния внешней среды – векторная функция времени $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{X}$, $t \in \mathbf{T}$.

Множества $\mathbf{Y}, \mathbf{U}, \mathbf{X}$ принадлежат соответствующим нормированным функциональным пространствам; $\mathbf{P}$ принадлежит многомерному, а $\mathbf{T}$ – одномерному Евклидову пространству.

Если отображение, задаваемое оператором Ω, является однозначным, а вектор состояния внешней среды $\mathbf{x}(t)$ представляет детерминированную зависимость от параметра времени t, такую модель будем называть *детерминированной*.

Примерами недетерминированной модели являются: модель, включающая стохастический вектор состояния внешней среды $\mathbf{x}(t)$, модель с неоднозначным оператором Ω.

Если $\mathbf{T}$ – дискретное множество, то модель будем называть *дискретной*.

Функционирование системы задает ее формализованное описание, на основании которого определяется порядок вычислений вектора состояния системы $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{Y}$ при численной реализации оператора действия Ω.

Назовем оператор Θ_ε ε*-вычислимым* относительно оператора Ω, если при $t \in \mathbf{T}$ и для заданного $\varepsilon > 0$ имеет место представление

$$\mathbf{y}_\Theta(t) = \Theta_\varepsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau), t), \tau < t,$$

где правая часть – непрерывная функция от своих аргументов и для $\mathbf{y}_\Theta(t)$ выполняется

$$\| \mathbf{y}_\Theta(t) - \mathbf{y}(t) \| < \varepsilon.$$

Назовем семейство операторов Θ_Ω, *вычислимым* относительно оператора Ω, если при $t \in \mathbf{T}$ и для любого $\varepsilon > 0$ найдется оператор $\Theta_\varepsilon \in \Theta_\Omega$, что выполняется неравенство

$$\| \Theta_\varepsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau), t) - \mathbf{y}(t) \| < \varepsilon.$$

К операторам такого семейства относятся, например, операторы, представленные задачей Коши для системы обыкновенных дифференциальных и алгебраических уравнений с начальными условиями, включенными в вектор параметров $\mathbf{p}$.

Процесс *воспроизводства* системы может характеризоваться потреблением и выпуском определенных сущностей (ресурсов), описываемых компонентами вектора состояния системы и определяющих условие не убывания ресурсов

$$\exists \varepsilon > 0,\ \forall \delta,\ 0 < \delta \le \varepsilon : \mathrm{H}(\mathbf{y}(t)) \ge \mathrm{H}(\mathbf{y}(t-\delta)),$$

где H - *оператор ресурсов*, выделяющий из компонент вектора $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{Y}$ те, которые интерпретируются как ресурсные. Множество состояний (значений вектора состояния) внешней среды $\overline{\mathrm{X}} \subseteq \mathbf{X}$, для которого выполняются условия не убывания ресурсов, будем называть *областью воспроизводства*.

Будем говорить, что управление $\mathbf{u}(t)$ является вычислимым (вычислимой функцией времени), если его можно представить как результат однозначного отображения Ψ тройки векторов $< \mathbf{y}, \mathbf{x}, \mathbf{p} >$, где функции $\mathbf{x}(\tau), \mathbf{y}(\tau)$ заданы на подмножестве $\mathbf{T}$, предшествующем t т.е.

$$\mathbf{u}(t) = \Psi(\mathbf{y}(\tau), \mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau)), \tau \le t.$$

Процедура вычисления вектора управлений $\mathbf{u}(t)$ может использовать самые различные подходы – от датчика случайных чисел до оптимизационных алгоритмов, нацеленных на поиск экстремума для *целевого* (характеристического) *функционала* $F(\mathbf{y})$.

В частности, при расчете *прогноза* эта процедура может использовать результаты расчета вектора состояния $\mathbf{y}(t_p), t_p > t$ как решения уравнения

$$\mathbf{y}(t_p) = \Theta(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau), \Psi(\mathbf{y}(\tau), \mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau))), t_p \ge \tau, \Theta \in \Theta_\Omega,$$

учитывающего в свою очередь, как наблюдаемые значения $\mathbf{x}(\tau) \in \mathbf{X}, \tau \le t$, так и прогноз вектора состояния внешней среды $\mathbf{x}(\tau) \in \mathbf{X}, \tau > t$, где t – текущее время.

Выбор (перестройка) целевого функционала $F(\mathbf{y})$ может быть представлен как действие оператора выбора Ξ над множеством функционалов $\Phi \ni F(\mathbf{y})$, зависящего от состояния внешней среды и состояния системы

$$F(\mathbf{y}) = \Xi(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t))\Phi.$$

Перестройка целевой функции обуславливается системными условиями выживания и устойчивости в изменяющихся условиях. Она может происходить при определенных ситуациях, например, когда состояние внешней среды $\mathbf{x}(t)$ претерпевает значительные изменения. Тогда функционал $F(\mathbf{y})$ заменяется функционалом $\hat{F}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$, таким, что при фиксированной зависимости $\mathbf{x}(t) = \hat{\mathbf{x}}(t)$ выполняется тождество $F(\mathbf{y}) = \hat{F}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{y})$.

Модели целеполагания

Использование целевого функционала облегчает формализацию описания системы, изучение ее свойств, получение прогнозов. Классическим примером такого подхода в классической механике является принцип Гамильтона-Остроградского [5], позволяющий свести формализацию поведения механической системы к задаче на экстремум функции Гамильтона. Построение механизмов обратной связи на основе целевых показателей в контуре управления традиционно является конструктивным приемом в управленческой практике.

Достижение системой экстремума ее целевого функционала в процессе ее функционирования можно интерпретировать как выход на равновесный режим, а процесс достижения – как переходный процесс. Состояние равновесия в системном анализе имеет много различных интерпретаций. Это: игровое равновесие взаимодействующих сторон, динамическое равновесие системы, находящейся под влиянием разнонаправленных воздействий, достижение экстрему-

ма соответствующего функционала (минимума потенциальной функции в механической системе).

При приближении саморазвивающейся системы к равновесному состоянию все ее компоненты получают сбалансированную нагрузку, а удаление от состояния равновесия связано с диспропорциями, неравномерной нагрузкой отдельных ее подсистем. Таким образом, параметры равновесия, сбалансированности системы связаны с видом целевого функционала и могут быть определены с его помощью. Но сам функционал, его вычислимая реализация определяется внутренними, фундаментальными свойствами самой системы. Так, потенциальная способность многопродуктовой экономической системы к саморазвитию определяется фундаментальным свойством технологических взаимосвязей. Реальная же способность к саморазвитию определяется к тому же степенью освоения этих технологий – сбалансированностью системы.

Определение, исследование, использование целевого функционала представляется важным этапом при формировании механизмов управления саморазвивающейся системы. Определение такого функционала (или нескольких функционалов) для реальной системы начинается с ее экспертного анализа. На этом этапе может быть сформирована экспертная оценка функционала, отражающего целевые устремления системы – в виде формализованной схемы оценивания (целенаправленной свертки оценок отдельных компонент в соответствующих шкалах оценивания). Наличие объективной (статистической) информации о системе и основанной на этой информации модели ее функционирования позволяет формировать объективные оценки ее целевых функционалов.

Взаимообусловленность механизмов управления и критериев качества функционирования системы, выражаемых в виде целевых функций, функционалов состояния, носит фундаментальный характер. Этот факт можно выразить в форме *принципа взаимообусловленности:* функционирование саморазвивающейся системы можно представить с помощью оптимизационной модели с некоторым «*характеристическим*» функционалом и наоборот, управление в саморазвивающейся системе в той или иной форме использует соответствующие критерии, целевые функции, оптимизационные постановки задач.

Под моделью *саморазвивающейся* системы будем понимать модель динамической системы воспроизводства с вычислимым управлением. Такая модель допускает возможность изменения целевого функционала $F(\mathbf{y})$ на любом этапе функционирования системы в соответствии с изменением ситуации, характеризующейся состоянием внешней среды $\mathbf{x}(t)$ и самой системы $\mathbf{y}(t)$.

Вычислимое управление $\mathbf{u}(t)$ будем называть *автономным*, если оно определяется только на основании значений состояния системы $\mathbf{y}(\tau)$, т.е. может быть представлено как результат отображения

$$\mathbf{u}(t) = \Psi^a(\mathbf{y}(\tau)), \tau \in \mathbf{T}.$$

Вычислимое управление становится автономным, когда заданы вектор параметров $\mathbf{p}$ и вектор состояния внешней среды $\mathbf{x}(\tau), \tau \in \mathbf{T}$, а отображение Ω является однозначным.

Под моделью *автономной саморазвивающейся* системы будем понимать модель динамической системы воспроизводства с автономным управлением.

$$\mathbf{y}(t) = \Theta(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau), \Psi_a(\mathbf{y}(\tau))), t > \tau, \Theta \in \Theta_\Omega.$$

Управление $\mathbf{u}(t)$ будем называть автономным с *ограниченной предысторией*, если оно зависит от состояний системы на ограниченном отрезке времени, предшествующем текущему моменту, т.е. может быть представлено как результат отображения

$$\mathbf{u}(t) = \Psi^{l}(\mathbf{y}(\tau)), \tau \in [t-\varepsilon, t], \varepsilon \geq 0$$

При $\varepsilon = 0$ мы будем иметь автономное управление *по состоянию*.

Характерное общее свойство моделей автономных саморазвивающихся систем состоит в строгой вложенности множества состояний внешней среды $\overline{\mathbf{X}} \subset \mathbf{X}$, для которого выполняются условия воспроизводства (существенной ограниченности области воспроизводства).

Принятие решений в различных сферах целевого планирования, формирования комплексных программ, разработки крупномасштабных проектов, оптимизации бюджета, индикативного планирования часто связано с необходимостью согласованно разрешать определенный набор проблемных ситуаций. Каждое решение в рамках единого хозяйственно-финансового механизма может затрагивать интересы сразу нескольких взаимодействующих сторон. Ввиду сложности и частичной недетерминированности объектов разработки и управления, в таких ситуациях используют экспертные методы принятия решений, включающие методы оценивания, моделирования, оптимизации на основе многопараметрических шкал. Эти методы позволяют учитывать несколько целевых установок одновременно, манипулируя заданным набором параметров. Распространенный подход к построению процедур принятия решений указанного рода состоит в использовании задачи ранжирования вариантов на основе численного критерия, характеризующего качество рассматриваемых объектов в зависимости от их параметров или воздействующих факторов [6]. Многопараметрические шкалы оценивания представляют частный случай такого критерия.

Дальнейшее развитие методов анализа непрерывных многопараметрических шкал заключается в применении и совершенствовании методов анализа и принятия решений при зависимостях и обратных связях [7], основанных на экспертных данных. Основные идеи такого развития заключаются в совмещении матрично-сетевых методов расчета оценок в рамках экспертных моделей зависимостей между анализируемыми факторами с аппаратом многопараметрического оценивания, а также методами оптимизации управляющих решений.

Примером такого анализа является оценка и выбор стратегии социального и экономического развития крупномасштабного субъекта экономической деятельности. Важным аспектом, анализируемым при формировании стратегии его социального и экономического развития, является учет динамики природной среды и факторов ее взаимодействия с хозяйственной деятельностью на данной территории. На этапе анализа, начальном этапе разработки стратегии, наиболее приемлемым является экспертный подход, использующий качественные и полуколичественные оценки влияния и взаимовлияния экономических, социальных, экологических факторов.

Задача анализа заключается в том, чтобы, создав шкалы оценивания факторов, влияющих на жизнедеятельность рассматриваемого субъекта, наметить рациональные шаги в области хозяйственной деятельности и природопользования. В частности, наиболее рационально распределять располагаемые ресурсы с учетом социальных, хозяйственных и экологических требований.

Будем понимать под многопараметрической шкалой оценивания функцию многих переменных *f(x)*, принимающую значения из определенного интервала $[I_0, I_1]$, интерпретируемые как оценки анализируемого объекта. Здесь x – вектор параметров оцениваемого объекта. Многопараметрические непрерывные шкалы занимают важное место при принятии решений на основе экспертных знаний.

Предлагаемые методы получения оценок состояния развивающихся организационных систем, формирования механизмов автономного управления, представляют как научный, так и практический интерес. Работа в целом представляет методы формирования механизмов автономного управления, оценивания и принятия решений на долгосрочных периодах развития организационных систем и имеет большое народнохозяйственное значение.

Построение многопараметрической шкалы оценивания методом сборки из элементарных шкал («комплексного критерия» по терминологии, применяемой в методе векторной стратификации [8]) включает два вида локальных оценок. Значения параметров объекта оцениваются с помощью *однопараметрических шкал оценивания*

$y_j = \varphi_j(x_j)$, j=1,..m,

где *m* – количество оцениваемых факторов. Затем полученные оценки агрегируются с помощью *элементарных шкал с двумя или более параметрами* (аргументами). Эти шкалы являются функциями свертки, задаваемыми на основе экспертных оценок влияния факторов нижнего уровня *i* на факторы следующего по убыванию уровня иерархии *i*-1, $i = k,\ldots,1$, где *k* – наибольший номер уровня для схемы оценивания:

$y^{i-1}{}_j = \Psi^i_j(y^i_1, y^i_2,\ldots)$.

В результате суперпозиции однопараметрических шкал и функций свертки всех вышестоящих уровней формируется *многопараметрическая шкала комплексного оценивания* как скалярная функция векторного аргумента

$x = (x_1, x_2,\ldots x_m)$,

$y^0 = f(x)$.

Численные реализации однопараметрических шкал могут задаваться с помощью таблиц или аналитически. Технологии построения бинарных и *n*-арных функций свертки могут быть различными, поскольку в случае бинарной свертки удобно использовать табличную форму функции (матрицу).

Непрерывность и кусочная гладкость многопараметрической шкалы комплексного оценивания в методе векторной стратификации обеспечивается интерполяцией внутренних шкал между узлами, задаваемыми экспертным путем [8].

В случае множественных агрегирующих связей можно пользоваться аналитическим заданием функций свертки. В частности, для линейной свертки оценок широкую известность получил метод анализа иерархий путем построения матриц парных сравнений [7].

Следует отметить, что в случае применения только линейных сверток процедуры оптимизации комплексной оценки дают малоприемлемые результаты – переброску всех ресурсов в одну вершину. Это отражает тот факт, что линейное оценивание плохо отражает свойство функций полезности – их «насыщаемость». Линейная структура свертки относится только к полностью взаимозаменяемым факторам. Если такой взаимозаменяемости факторов нет, следует применять нелинейные свертки, например, получаемые по методу векторной стратификации. Поэтому применение *n*-арных линейных сверток можно оправдать лишь недостатком экспертной информации об объекте или отсутствием необходимости в более адекватных оценках при принятии решений.

Задача максимизации комплексной оценки возникает при распределении ограниченных финансовых средств, стратегическом планировании, формировании комплексных программ, проведении конкурсов проектов и т.д.

Обозначим *F(x)* – значение оценки некоторой бинарной (в том числе корневой) вершины дерева оценок при заданном векторе значений концевых вершин $x \in \mathbf{R}^n$. Особенностью функции свертки *F(x)* является возможное наличие складок (разрывов 1-х производных по направлению), поскольку эта функция является суперпозицией результатов линейной интерполяции таблично заданных (вообще говоря, нелинейных негладких) функций 2-х переменных, задаваемых с помощью бинарных матриц и линейных функций свертки многих переменных, порождаемых методом анализа иерархий.

Приведенная ниже оптимизационная постановка задачи охватывает достаточно большой круг практически важных задач оптимизации оценки объекта. Пусть *I* – подмножество конце-

вых вершин, по которым производится оптимизация (значения остальных вершин – фиксированные), а значения компонент вектора x удовлетворяют ограничениям

$a_i \le x_i \le b_i$, iϵI,

$$\sum_{i \in Ik} x_i = S_k ,$$

определяющим допустимое множество $\mathbf{D} \subset \mathbf{R}^n$. Здесь $a \in \mathbf{R}^n$ – вектор нижних границ,

$b \in \mathbf{R}^n$ – вектор верхних границ, k – номер ограничения по частичной сумме S_k, I_k – подмножество вершин, ограниченных суммой S_k, $I_k \subset I$, подмножества I_k не пересекаются,

$S \in \mathbf{R}^K$ – вектор частичных сумм. Формулировка задачи оптимизации функции свертки оценок имеет вид

$\max F(x) \mid x \in \mathbf{D}$.

Заключение

Изложены математические постановки задач и расчетных процедур, связанных с моделированием систем автономного управления, построением и использованием непрерывных многопараметрических шкал при расчете оценок и принятии решений. Методы оценивания и принятия решений, согласования критериев находят адекватное применение в ситуации, когда в рамках единой системы планов или мероприятий необходимо решать несколько задач, формально задаваемых различными критериями. Как правило, эти задачи требуют различных конфигураций обеспечивающих средств, что порождает конфликтную ситуацию.

Основные направления исследований, связанных с проблемами автономного управления:

1) Модели целеполагания.
2) Динамические модели многоотраслевой экономической системы с автономным управлением.
3) Модели управляемого равновесия многопродуктовой экономической системы.
4) Однопродуктовые модели воспроизводства ВВП с управлением, задаваемым через сценарии.
5) Модели автономного управления саморазвивающихся систем с оптимизирующим механизмом обратной связи.
6) Методы рационального выбора и оптимизации на экспертных шкалах и сетевых структурах взаимодействия.
7) Методы реализации расчетов для многомерных динамических моделей.

Список литературы

[1] Нейман Дж. Теория самовоспроизводящихся автоматов. – М.: Мир, 1971.

[2] Разумовский С. М. Закономерности динамики биогеоценозов: Избр. труды. — М.: KMK Scientific Press, 1999.

[3] Вишневский А.Г.Воспроизводство населения и общество: История, современность, взгляд в будущее - М: Финансы и статистика. 1982.-287 с.

[4] Нейман Дж., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. – М.: Наука, 1970.

[5] Ostrogradsky M., "Mem. de 1'Acad. des Sci. de St-Petershourg", 1850, t. 8, № 3, p. 33-48

[6] Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. – М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1971.

[7] Саати Томас Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. Пер. с англ./Науч. ред. А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. Изд. 2-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009 – 360 с.

[8] Глотов В.А., Павельев В.В. Векторная стратификация. – М.: Наука, 1984.

ФОРМИРОВАНИЕ ОТНОШЕНИЙ В МАЛОЙ НАУЧНОЙ ГРУППЕ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ ЛИЧНОСТИ

Б.Г. Ильясов, И.Б. Герасимова, Л.Н. Мухамедрахимова

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Самара, ул. К.Маркса, 12, Россия
Ilyasov@tc.ugatu.ac.ru
тел: +7 (374) 273-78-35, +7 (347) 273-82-80

Ключевые слова: *малая научная группа, структура личности, когнитивная модель, система, совместимость, темперамент*

Abstract

The article considers the problem of increasing the functioning efficiency of small research groups (SRG). In order to solve this problem, cognitive dynamic model based on linear relationships of SRG is constructed. The model takes into account the psychophysiological compatibility of the members. Next by means of computer simulation the rate and sustainability of the SRG activity process are evaluated. At the same time, each person in the group is considered as a person capable of self-organization with its own temperament.

Введение

Современное научное сообщество представляет собой сложной структуру – от крупных региональных центров до первичных коллективов в составе НИИ и вузов. "Работающие в одиночку" ученые на сегодняшний день являются скорее исключением, а исследовательские проекты все чаще требуют привлечения специалистов разных дисциплин. Таким образом, субъектом научного творчества выступает не только отдельная личность ученого, но и группа в целом.

Особая роль среди научных коллективов принадлежит так называемым малым научным группам (МНГ) – основному первичному звену организации науки [1].

Среди многочисленных проблем, связанных с функционированием МНГ, отдельное место занимает задача повышения производительности МНГ при проведении групповых исследований по выполнению научных проектов. Повысить эффективность труда МНГ, уменьшить возможность ошибочных действий и конфликтных ситуаций и более четко управлять выполнением проекта позволяет учет психофизиологических особенностей при комплектовании МНГ.

Другими словами, как при формировании, так и при управлении МНГ как и любым другим видом малого коллектива необходимо учитывать такой феномен как совместимость членов группы, что подтверждается и с точки зрения социальной психологии и с позиции управления персоналом.

С точки зрения социальной психологии совместимость, порождающая в том числе структурную межличностную привлекательность (совместимость темперамента, характера и личностных качеств партнеров), отражает удовлетворенность межличностными отношениями в группе [2].

С позиции управления персоналом в условиях, требующих слаженности действий, ритма и объема труда, важна психофизиологическая совместимость работников, для которой наиболее приемлемы определенные варианты сочетаний типов нервной системы и темперамента [3].

Таким образом, с одной стороны этот вопрос кажется изученным, однако, существуют и недостатки. Во-первых, специалисты этих областей не сходятся во мнениях, например, если менеджеры по персоналу не рекомендуют сочетания холерик – флегматик, то социальные психологи такое сочетание допускают. Во-вторых, рекомендации даны только для пар типов личностей, в то время как малые коллективы чаще всего состоят из трех и более человек.

В связи с этим становится актуальным изучение совместимости членов группы на основе их психофизических характеристик. В работе для решения этой проблемы строится когнитивная линейная динамическая модель МНГ, позволяющая исследовать механизмы функционирования МНГ, совместимость различных типов личностей в ее составе, а также выявить способы повышения темпа совместной деятельности членов группы при данном составе группы.

1 Когнитивная модель структуры личности

Изучение и анализ МНГ с точки зрения совместимости членов группы предполагает рассмотрение каждого члена группы как личности и выделение ее структуры. Знание структуры личности позволяет смоделировать состояние личности, динамику процессов ее деятельности и различные виды взаимодействий внутри группы. Существует множество подходов к рассмотрению структуры личности, однако, имеющиеся модели носят вербальный общесоциальный характер, и, как правило, мало пригодны для изучения социальных процессов и явлений с участием человека.

В работе предлагается подход, согласно которому личность рассматривается как обладающая устойчивой психикой, умеющая думать и осознавать свои действия, а также реализовывать целенаправленную деятельность. Другими словами, структура личности в когнитивной модели представляется в виде системной триады, т.е. как трехэлементное связанное множество, основными концептами которой являются: интеллектуальная деятельность (ИД), организационно-трудовая деятельность (ОТД) и психофизиологическое состояние (ПС).

Также личность рассматривается как самоорганизующаяся система, в которой обеспечение самоорганизации производится с помощью механизма саморегуляции - процесса формирования психической активности и управления ею для достижения осознанно выдвинутых и принятых личностью целей деятельности. Механизм саморегуляции личности реализуется с помощью отрицательных обратных связей.

Все концепты личности взаимосвязаны и образуют единое целое. Исключение какого-либо из концептов ведет к разрушению личности как системы.

В основу исследований положено представление модели структуры личности в виде когнитивного орграфа, который также может быть выражен в виде системы линейных дифференциальных уравнений [4]:

$$(1)\quad \begin{cases} \dot{X}_1 = -a_1 X_1 + k_{12} X_2 + k_{13} X_3 + u_1; \\ \dot{X}_2 = -a_2 X_2 + k_{21} X_1 + k_{23} X_3 + u_2; \\ \dot{X}_3 = -a_3 X_3 + k_{31} X_1 + k_{32} X_2 + u_3; \end{cases}$$

где X_1, X_2, X_3 – темп изменения ПС, ИД и ОТД личности соответственно;

$\dot{X}_1, \dot{X}_2, \dot{X}_3$ - скорости изменения темпов ПС, ИД и ОТД соответственно;

a_1, a_2, a_3 – параметры, отражающие стабилизирующие факторы изменения темпа ПС, ИД и ОТД.

k_{ij} – коэффициенты взаимодействия, отражающие степень влияния j-го концепта на i-ый;

u_1, u_2, u_3 – параметры, отражающие индивидуальный вклад каждого концепта в состояние личности.

Положительность знаков коэффициентов между каждой парой концептов свидетельствует об их положительном влиянии друг на друга. Изменение числовых значений коэффициентов k_{ij}, a_i и параметров u_i приводит к формированию различных уровней состояния личности.

1.1 Анализ когнитивной модели личности на основе моделирования

Для решения вышепоставленной задачи исследования психофизиологической совместимости членов группы были проанализированы некоторые известные типы личности (классификация по темпераменту) с точки зрения выделенной структуры личности (1) методом компьютерного моделирования в MATLAB. Время, параметры взаимодействия и индивидуальных вкладов при формировании сценариев взяты безразмерными от 0 до 1 и заданы экспертным путем в соответствии с известными характеристиками типов личности [5].

Тип *IP*1. Холерик, характеризующийся высокой скоростью умственных процессов, быстротой выполнения операций и высоким темпом психических и психомоторных реакций.

Холерик – быстрый, и совершенно неуравновешенный тип личности, характеризующийся мощным процессом возбуждения и слабым торможением (u_1=2, a_1=0,6). Он быстро думает и принимает решения, он не захочет тормозиться и перепроверять свои выводы (a_3=0,8).

В работе холерик нередко амбициозный и честолюбивый, обладает высокой работоспособностью, стремится к лидерству и доминированию (u_2=1, u_3=1, k_{23}=0,4, k_{32}=0,4).

Холерик с трудом переносит снижение активности и необходимость оставаться некоторое время в покое: эмоции оказывают повышенное воздействие на ИД и ОТД (k_{21}=0,8, k_{31}=0,8).

Холерик относится к неустойчивым типам темперамента, и, действительно, при полученных значениях коэффициентов (u_1=2, u_2=1, u_3=1, a_1=0,6, a_2=1, a_3=0,8, k_{12}=0,4, k_{13}=0,4, k_{21}=0,8, k_{23}=0,4, k_{31}=0,8, k_{32}=0,4), система находится в состоянии статической неустойчивости. Однако если холерик с накоплением жизненного опыта становится более уравновешенным, т.е. a_1=0,8, a_3=1**,** и его эмоции не так сильно влияют на деятельность, т.е. коэффициенты k_{21}**,** k_{31} понизятся до 0,5, то система станет устойчивой, и темпы деятельности будут достигать высоких значений: $X_{ПС}$=25,1, $X_{ИД}$=22,5, $X_{ОТД}$=22,5.

Тип *IP*2. Флегматик, характеризующийся низкой скоростью умственных процессов, замедленностью выполнения операций и низким темпом психических и психомоторных реакций.

Флегматик внешне скуп на проявление эмоций и чувств (u_1=0,5). В работе он производителен, компенсируя свою неспешность прилежанием, упорством и настойчивостью, оставаясь при этом спокойным и уравновешенным (u_2=1, u_3=1, k_{12}=0,7).

У данного типа личности процессы торможения всегда уравновешивают процессы возбуждения (a_1=1, a_2=1, a_3=1), понижена скорость протекания психических процессов и реакции, особенно быстроты ума (k_{21}=0,3, k_{31}=0,3).

Флегматик очень устойчивый тип личности, производительный и неспешный, что достигается при полученных коэффициентах (u_1=0,5, u_2=1, u_3=1, a_1=1, a_2=1, a_3=1, k_{12}=0,7, k_{13}=0,3, k_{21}=0,3, k_{23}=0,5, k_{31}=0,3, k_{32}=0,5), характеризующих достижение низких темпов деятельности: $X_{ПС}$=6,25, $X_{ИД}$=5,74, $X_{ОТД}$=5,7.

Тип *IP*3. Сангвиник, характеризующийся высокой скоростью умственных процессов, быстротой выполнения операций и низким темпом психических и психомоторных реакций.

Сангвиник очень продуктивен в работе, когда ему интересно, приходя в сильное возбуждение от этого, если работа не интересна, он относится к ней безразлично, ему становится скучно (k_{12}=0,4, k_{13}=0,4, k_{21}=0,5, k_{31}=0,5). Это человек сильный, энергичный, с хорошим самоконтролем (a_1=1, a_2=1, a_3=1). Как правило, он деловитый, выносливый и работоспособный (u_1=1, u_2=1, u_3=1).

Сангвиник относится к устойчивым типам личности, какой и является система при полученных коэффициентах (u_1=1, u_2=1, u_3=1, a_1=1, a_2=1, a_3=1, k_{12}=0,4, k_{13}=0,4, k_{21}=0,5, k_{23}=0,5,

k_{31}=0,5, k_{32}=0,5). В работе сангвиник отмечается достаточно высокой продуктивностью: $X_{ПС}$=13,1, $X_{ИД}$=15,2, $X_{ОТД}$=15,4.

Тип *ИР4*. Меланхолик, характеризующийся низкой скоростью умственных процессов и замедленностью выполнения операций при осуществлении ИД и высоким темпом психических и психомоторных реакций.

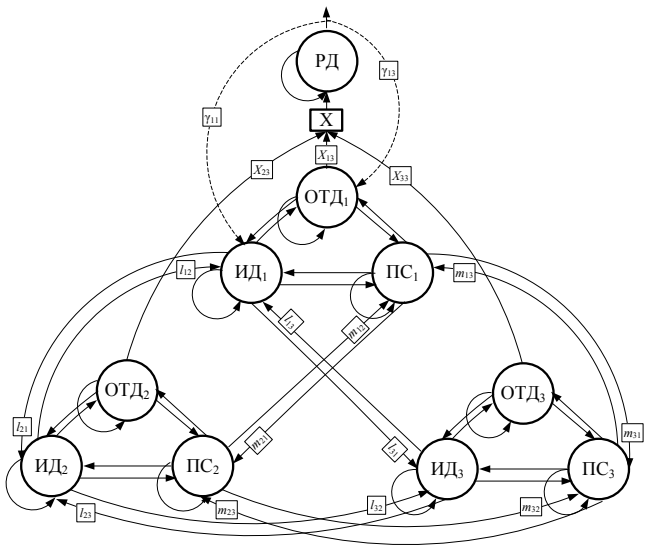
Меланхолик - человек легко ранимый, склонный к постоянному переживанию различных событий, свои астенические переживания он не может сдерживать усилием воли (a_1=0,4).

Этот тип личности имеет высокую утомляемость: перерабатывать и работать с максимальной самоотдачей не способен, характеризуется быстрым падением работоспособности (u_2=0,5, u_3=0,5, k_{12}=1, k_{13}=1). Меланхолики болезненно реагируют на разные неполадки в организации: они всегда стараются действовать точно по инструкции (k_{23}=0,7). В стрессовой ситуации меланхолик — не работник (a_2=0,4, a_3=0,4).

Меланхолик очень неустойчивый тип личности, и система при полученных параметрах становится статически неустойчивой (u_1=1, u_2=0,5, u_3=0,5, a_1=0,4, a_2=0,4, a_3=0,4, k_{12}=1, k_{13}=1, k_{21}=0,4, k_{23}=0,7, k_{31}=-0,1, k_{32}=0,4). Однако, даже имея такой темперамент, меланхолики научились себя «маскировать». «Маскировка» — это внешний контроль над своими переживаниями, т.е. увеличение коэффициентов саморегуляции до 1, тогда меланхолик достигает следующих темпов: $X_{ПС}$=6,88, $X_{ИД}$=4,33, $X_{ОТД}$=1,55.

2 Когнитивная динамическая модель малой научной группы

Рассматривается МНГ, состоящая из трех человек, находящихся на одном иерархическом уровне (занимающих одну и ту же должность или выполняющих близкие по содержанию функции) и объединенных общей целью – выполнением какого-либо научного проекта (рисунок 1).



l_{ij} – коэффициенты взаимодействия, отражающие степень влияния j-го концепта на i-ый на интеллектуальном уровне, m_{ij} - коэффициенты взаимодействия, отражающие степень влияния j-го концепта на i-ый на психофизическом уровне, γ_{11}, γ_{13} – коэффициенты, отражающие восприятие лидером темпов деятельности на интеллектуальном и организационно-трудовом уровнях

Рисунок 1 - Когнитивная модель МСГ из трех личностей

Задачей взаимной деятельности личностей является коллективное поддержание определенного темпа выполнения работ по проекту при выборе соответствующих индивидуальных темпов работ членов группы, которые они формируют самостоятельно.

Поскольку все члены МНГ находятся на одном уровне иерархии, то ни один из них не является руководителем проекта. В связи с этим, социальная власть осуществляется через лидерство одного из членов группы. В модели феномен лидерства реализуется через наличие отрицательных обратных связей, идущих от результата деятельности (РД) к лидеру группы (личность с индексом 1) к его концептам $ИД_1$ и $ОТД_1$, что означает рациональное восприятие и осознание темпов деятельности группы.

Взаимодействие между личностями осуществляется на уровне концепта ИД, поскольку осуществляется обмен информацией, идеями, осуществляется совместный интеллектуальный труд, и концепта ПС в виде линейных связей. При этом природа взаимодействия такова, что одна личность либо стимулирует (с помощью положительных обратных связей), либо тормозит (с помощью отрицательных обратных связей) деятельность других членов МНГ.

Выходной координатой функционирования МНГ является темп ее деятельности (скорости выполнения работы), полученный как интегральный (мультипликативный) эффект от объединения индивидуальных темпов ОТД личностей. От темпа трудовой деятельности неотделим такой показатель как ритм деятельности, который также оценивается в качестве выходной координаты. Заданный темп в работе повышает работоспособность, а ритм создает основу для высокой производительности и одновременно делают работу менее утомительной. Нарушение ритмичности трудового процесса отрицательно сказывается на самочувствии работающих, на результатах их труда и состоянии физиологических функций [6].

Таким образом, МНГ является сложной системой, где каждый из элементов оказывает свое влияние на РД, вносит свой вклад и находится в определенных отношениях с другими членами группы, также оказывая на них влияние.

Когнитивная динамическая модель МНГ (рисунок 1) также может быть выражена в виде системы дифференциальных уравнений в форме Коши. Эта система представляет собой 10 дифференциальных уравнений, описывающих динамику поведения всех концептов каждой личности с учетом взаимосвязи между компонентами ИД и ПС, а также с учетом вышеуказанных связей РД с лидером и лидера с двумя оставшимися членами группы по концептам ОТД.

2.1 Анализ когнитивной модели малой научной группы на основе моделирования

Из всех вариантов сочетаний темпераментов в качестве примера были выбраны одни из наиболее благоприятных: сангвиник-флегматик, сангвиник-меланхолик, меланхолик-флегматик, и таким образом составлена МНГ из трех типов личностей сангвиник-флегматик-меланхолик.

В процессе анализа производилось изменение отдельных параметров модели и оценивалось влияние этих параметров на конечный темп выполнения проекта при совместной деятельности членов МНГ, а также на его устойчивость и ритмичность.

Лидером в МНГ является сангвиник, поскольку ни меланхолик, ни флегматик не имеют склонности к лидерству и чаще всего занимают ведомые позиции; сангвиник же часто бывает неформальным лидером в группе.

На интеллектуальном уровне отношения характеризуются положительными обратными связями, предполагая, что все члены МНГ благоприятно влияют друг на друга, обмениваются идеями и сотрудничают. Отношения между меланхоликом и флегматиком средние $l_{23}=l_{32}=0{,}2$, а между сангвиником - флегматиком и сангвиником - меланхоликом они выше, поскольку лидер оказывает на своих коллег большее влияние, и они больше обмениваются идеями с лидером, чем друг с другом ($l_{21}=l_{31}=0{,}4$, $l_{12}=l_{13}=0{,}3$).

Коэффициенты взаимоотношения на уровне ПС меньше по значениям, чем коэффициенты взаимоотношений на уровне ИД, т.к. рассматриваются деловые отношения. К тому же в данном случае существуют некоторые особенности:

- меланхолик в общении характеризуется замкнутостью, необщительностью и трудностями в установлении контактов с другими людьми (m_{12}=0,1, m_{32}=0,1), но зависит от них и особенно нуждается в поддержке со стороны руководителя или лидера (m_{21}=-0,3, m_{23}=-0,1),
- флегматик не проявляет особого интереса к неформальным отношениям в компании и строит уравновешенные отношения с людьми, т.е. коэффициенты взаимоотношений на уровне ПС следующие (m_{13}=0,1, m_{23}=-0,1, m_{13}=0,2).

Таким образом, при полученных значениях коэффициентов (l12=l13=0,3, l21=l31=0,4, l23=l32=0,2, m12=m13=m32=0,1, m21=-0,3, m23=-0,1, m13=0,2) темп деятельности МНГ достигает очень высоких значений Z=129,4 при устойчивой и ритмичной работе (рисунок 2).

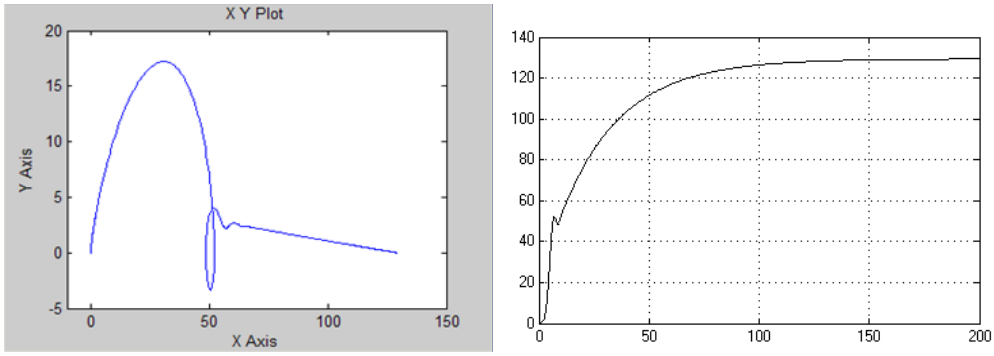


Рисунок 2 - Высокий устойчивый темп деятельности группы

Флегматик нередко бывает «человеком процесса», его нужно контролировать и стимулировать к получению конкретного результата, поэтому если увеличить давление лидера на флегматика на уровне ИД до l_{31}=0,5, то темп деятельности возрастет почти в два раза до Z=221,8.

Следует отметить, что полученные коэффициенты отражают гармоничные, благожелательные отношения поддержки и взаимопомощи в МНГ, т.е. когда меланхолик чувствует себя комфортно и способен к полноценной саморегуляции (a_1=1, a_2=1, a_3=1). В случае, если его саморегуляция ПС (a_1,) и ИД (a_2) снизится до 0,8, а его коллеги будут слишком на него давить и контролировать (m_{21}=-1, m_{23}=-1), то в работе группы наблюдается детерминированный хаос (рисунок 3).

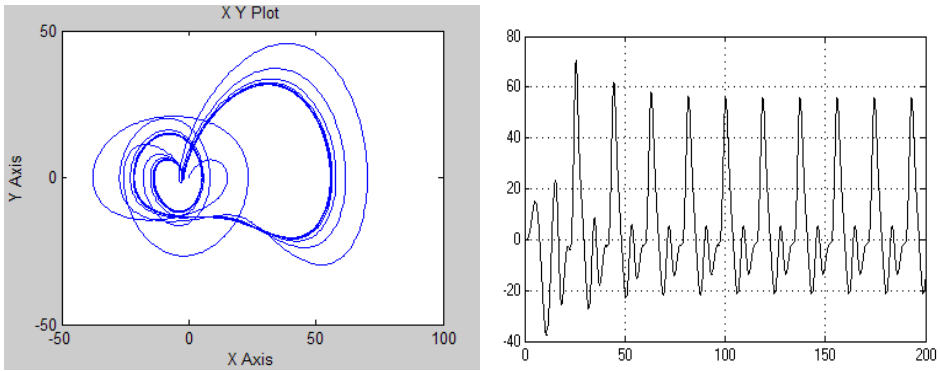


Рисунок 3 - Детерминированный хаос

Заключение

По результатам анализа и когнитивного моделирования МНГ, составленной с учетом психофизиологической совместимости ее членов, можно сделать вывод, что при гармонических, дружественных отношениях и сотрудничестве между членами группы достигается высокий устойчивый темп деятельности, превосходящий индивидуальные темпы деятельности членов МНГ (результат синергетического эффекта). Следовательно, для повышения темпов деятельности МНГ необходимо учитывать не только профессиональные качества личности и ее индивидуальные психофизиологические особенности (темперамент), но и сложившиеся отношения между членами группы.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-08-01014-а и государственного контракта в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», 2014 г.

Список литературы

[1] Аллахвердян А.Г., Мошкова Г.Ю., Юревич А.В., Ярошевский М.Г. Психология науки: Учебное пособие. - М.: Московский психолого-социальный институт: Флинта, 1998. - 312 с.
[2] Битянова М.Р. Социальная психология: учебное пособие / М.Р. Битянова. – СПб.: Питер, 2008. 368 с.
[3] Никифорова Г.С. Психология менеджмента: Учебник для вузов — 2-е изд., доп. и перераб. — СПб.: Питер, 2004. - 639 с.
[4] Ильясов Б.Г., Герасимова И.Б., Мухамедрахимова Л.Н. Когнитивная модель творческой личности //Материалы XV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (25-28 июня 2013 г., Самара, Россия). - Самара: СамНЦ РАН. 2013. - С.147-152
[5] Самоукина Н.В. Эффективная мотивация персонала при минимальных финансовых затратах. - М.: Вершин, 2006. - 224 с.
[6] Российская энциклопедия по охране труда: Т. 3: С-Я. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2007.- 400 с.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И СИСТЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЦЕССА НА МАКРОУРОВНЕ

Б.Г. Ильясов, И.В. Дегтярева, Е.А. Макарова, Т.А. Ефтонова

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия
ea-makarova@mail.ru
тел: +7 (347) 273-78-35, факс: +7 (347) 273-78-35

Ключевые слова: *макроэкономическая система, инвестиционный процесс, когнитивная модель, неравновесный режим, производственный сектор, рынок, динамическая модель*

Abstract
The methodology of investigation, system modeling dynamics of investment process at macro level in non-equilibrium market conditions is proposed. Cognitive and dynamic models of macroeconomic investment process are presented in the article.

Введение

Современное состояние российской экономики характеризуется наличием множества макроэкономических проблем, обусловленных как внешнеэкономическими, так и внутренними условиями развития [1]. Научное сообщество неоднократно обсуждало проблемы экспортно-сырьевой модели развития экономики и настоятельно рекомендует обеспечить переход на путь модернизации экономики. Экспортно-ориентированная стратегия экономического развития, в соответствии с которой значительную часть валового внутреннего продукта (ВВП) составляет чистый экспорт, в основном обеспечивающийся за счет нефтегазовой промышленности, цветной и черной металлургии, обуславливает проблему ресурсозависимости российской экономики. Это способствует замедлению экономического развития, так как ведет к истощению ресурсов страны, низкому уровню потребления, замедлению процесса накопления капитала, перераспределению инвестиций между отраслями, когда происходит вытеснение инвестиций из сектора обрабатывающей промышленности, сокращая внутреннее производство и промежуточный спрос. Все это приводит к структурной деформации экономики. Экспорт за границу сопровождается передачей сбережений внешнему миру путем накопления валютных резервов и вывоза капитала. Кроме того, российская экономика характеризуется высокой степенью износа основных фондов, и при этом, большим разрывом между сбережениями и инвестициями, что свидетельствует о несовершенстве инвестиционных механизмов.

Перечисленные проблемы российской экономической действительности обуславливают актуальность исследования инвестиционного процесса на макроэкономическом уровне, что требует исследования его в тесной взаимосвязи с воспроизводственным процессом, формирующим макроэкономический кругооборот финансовых и материальных потоков, и в аспекте поддержания желаемых воспроизводственных пропорций, характеризующих отраслевую структуру реального сектора экономики. С целью обеспечения эффективности управления инвестиционным процессом на макроуровне необходимо проведение различных политик государственного регулирования с учетом рыночных механизмов, что позволит получить мультипликативный эффект в обеспечении роста ВВП.

Несмотря на большое количество работ в исследуемом направлении, некоторые особенности управления инвестиционным процессом в динамике не находят полного отражения в разрабатываемых моделях и программных комплексах [1,2]. В частности, малоизученными

остаются проблемы анализа и интеллектуальной поддержки управления инвестиционным процессом, который рассматривается в единстве с воспроизводственным процессом многосекторной макроэкономической системы (ММЭС) и во взаимодействии с основным, системообразующим, контуром «производство-потребление» макроэкономического кругооборота финансовых потоков, а также с учетом влияния запасов секторов экономики, неравновесных рыночных условий и структурных пропорций реального сектора экономики.

Целью исследования является разработка методологии исследования и системного моделирования динамики инвестиционного процесса ММЭС в неравновесных рыночных условиях на основе когнитивных и динамических моделей с учетом потоков и запасов секторов экономики. В статье рассматриваются вопросы разработки когнитивной и динамических моделей инвестиционного процесса многосекторной макроэкономической системы с учетом и запасов основного капитала и структурных пропорций реального сектора экономики, а также обсуждаются результаты экспериментальных исследований различных сценариев управления инвестиционным процессом ММЭС.

1 Когнитивная модель формирования доходов и расходов домохозяйств в рамках воспроизводственного процесса ММЭС

Методология исследования, системного моделирования и управления инвестиционным процессом многосекторной ММЭС основана на методологии исследования и моделирования ММЭС, предложенной в работах [3-5] и предполагает применение когнитивного, динамического, структурного, функционального, процессного и сценарного подходов, интегрированных на базе системного подхода (рисунок 1).

Системный подход предполагает раскрытие сути целостности инвестиционного процесса как объекта исследования, выявление и изучение его внутренней структуры, а также связей с другими процессами ММЭС (процессами основного контура ММЭС «производство – потребление» и корректирующего контура «налоги – госзакупки»), с внешней средой и всей ММЭС в целом. Особенности интегрирующей роли системного подхода в исследовании инвестиционного процесса ММЭС заключаются в следующем.

Во-первых, это прерогатива целостности, согласно которой только после познания динамических свойств ММЭС в целом возможно исследование динамики ее составляющих частей, процессов. Это проявляется в исследовании динамики управления инвестиционным процессом ММЭС как части воспроизводственного процесса ММЭС с учетом выявленных по результатам ранее проведенных исследований динамических особенностей макроэкономического кругооборота финансовых потоков, образующих воспроизводственный процесс ММЭС [3].

Во-вторых, это последовательное выполнение нескольких способов декомпозиции ММЭС и построение различных структур ММЭС с применением вначале когнитивного, затем функционального и далее процессного подходов. Это позволяет выполнять постепенное уточнение структуры, а также выявлять особенности инвестиционного процесса ММЭС с учетом обеспечения достижения цели функционирования всей ММЭС в целом.

В-третьих, это определение такой глубины декомпозиции при построении структуры инвестиционного процесса ММЭС, которая позволяет выявить механизм влияния инвестиций на динамику роста ВВП и динамические особенности управления инвестиционным процессом ММЭС с учетом закономерностей макроэкономического кругооборота финансовых потоков.

Выполнена структуризация ММЭС, которая включает три этапа и основана на применении нескольких общенаучных подходов с учетом интегрирующей роли системного подхода.

На *первом этапе* разрабатывается когнитивная модель инвестиционного процесса ММЭС на основе применения когнитивного подхода.

Разработка когнитивной модели инвестиционного процесса ММЭС ведется на основе разработанной ранее когнитивной модели функционирования МЭС в рыночных условиях [3].

Базовыми элементами этой модели (концептами) МЭС являются макроэкономические агенты (МЭА) и макроэкономические рынки, взаимосвязанные с помощью циркулирующих между ними финансовых потоков и управляемых на основе информации о рыночных ценах, объемах запасов и поведении секторов экономики.

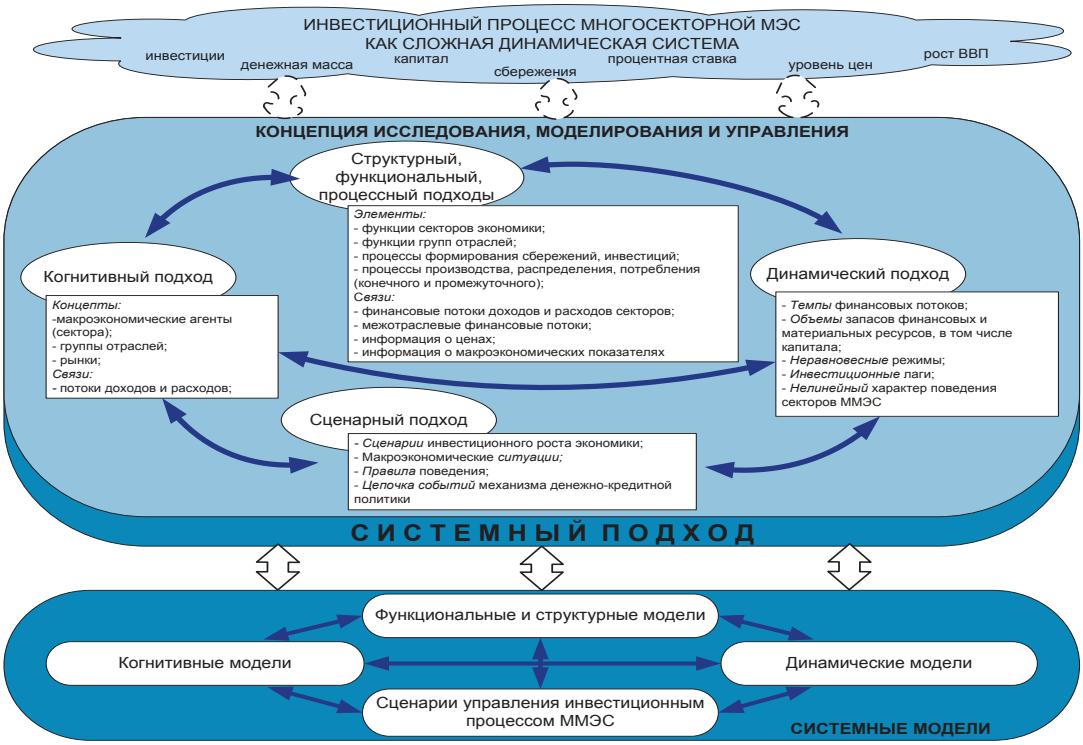


Рисунок 1 – Когнитивная модель инвестиционного процесса ММЭС

Когнитивная модель инвестиционного процесса ММЭС получена путем увеличения глубины декомпозиции за счет деления макроэкономического агента «Реальный сектор» на группы отраслей – производственные сектора с целью выделения такого производственного сектора, деятельность которого является ключевой в реализации инвестиционных вложений и обуславливает рост производства ВВП во всех секторах экономики [4].

Описание различий в деятельности производственных секторов требует учесть различия и в ситуациях на макроэкономических рынках произведенной ими продукции. Поэтому выполняется декомпозиция и макроэкономического рынка благ на макроэкономические рынки видов продукции, производимых выделенными производственными секторами.

Назначение когнитивной модели инвестиционного процесса ММЭС состоит в выявлении параллельно-последовательных цепочек в формировании инвестиционных процессов ММЭС с учетом замыкания макроэкономического кругооборота финансовых потоков и влияния накопленных запасов секторов экономики.

На *втором этапе* выполняется построение функциональных моделей поведения секторов экономики на основе функционального подхода, согласно которому определяется множество функций, выполняемых секторами ММЭС (макроэкономическими агентами) и упорядоченных в составе единого воспроизводственного процесса ММЭС. Связи представлены финансовыми и материальными потоками, регулируемыми на основе информации о состоянии секторов и ММЭС в целом.

На *третьем этапе* на основе процессного подхода определяется множество процессов, выполняемых секторами экономики при реализации выделенных функций, а также разрабатываются динамические модели процессов функционирования секторов экономики.

Применение *динамического подхода* к разработке динамических моделей инвестиционного процесса ММЭС имеет ряд важных особенностей.

Первая особенность применения динамического подхода состоит в исследовании динамически неравновесных режимов протекания инвестиционного процесса ММЭС, при этом предполагается существование динамически равновесного режима.

Динамически равновесный, или установившийся, режим соответствует такому протеканию инвестиционного процесса ММЭС, при котором процессы сбережения и инвестирования с учетом амортизационных отчислений являются сбалансированными по темпам финансовых потоков, что способствует формированию установившихся темпов расходов и доходов всех секторов ММЭС, сбалансированных в рамках всего воспроизводственного процесса.

Динамически равновесный режим инвестиционного процесса ММЭС характеризуется соблюдением основных макроэкономических тождеств, среди которых определяющим для поддержания равновесия является тождество между темпами потоков сбережений $\dot{S}$ из нераспределенной прибыли фирм, доходов населения и государства и темпами формирования валовых инвестиций $\dot{I}b : \dot{S} = \dot{I}b$ [4].

Еще одним важным балансовым соотношением, контролируемым в процессе анализа и управления инвестиционным процессом ММЭС, является определение так называемой ситуации «нулевого роста», при которой темпы формирования валовых инвестиций равны амортизации $\dot{I}b = \dot{A}m$, чистые инвестиции отсутствуют $\dot{I} = \dot{I}b - \dot{A}m = 0$. Знание о приближении к этой ситуации необходимо с точки зрения своевременного принятия решений по обеспечению устойчивого роста экономики ($\dot{I}b > \dot{A}m$ или $\dot{I}_{net} > 0$) и предотвращению перехода ММЭС в режим «падающей экономики» с отрицательными чистыми инвестициями $\dot{I}b < \dot{A}m$ ($\dot{I}_{net} < 0$).

И, наконец, третьим важным балансовым соотношением является баланс текущих темпов получения нераспределенной валовой прибыли $\dot{P}g$ и формирования валовых инвестиций $\dot{I}b$: $\dot{P}g = \dot{I}b$, анализ которого позволяет определять текущий режим функционирования сектора с позиций динамики накопления финансовых средств: либо это накопления финансовых средств, когда нераспределенная прибыль не вся расходуется на инвестиционные расходы и идет процесс ее накопления (роста запасов) для целей будущего инвестирования ($\dot{P}g > \dot{I}b$); либо это процесс превышения инвестиционных расходов над поступающими доходами (нераспределенной валовой прибылью), когда расходуются ранее накопленные запасы ($\dot{P}g < \dot{I}b$).

Динамически равновесный режим представляет собой гипотетическое состояние ММЭС, которое в действительности может возникать лишь как точка перехода при движении ММЭС на множестве неравновесных состояний вследствие действия различных факторов (мировых цен на нефть, курса доллара, инвестиционного климата). В реальности равновесное состояние ММЭС представляет собой некоторую область движения системы вокруг гипотетического состояния равновесия.

Динамически неравновесный режим соответствует процессу перехода ММЭС из одного динамически равновесного состояния, нарушенного действием различных факторов, к другому динамически равновесному состоянию [3]. Анализ динамически неравновесных инвестиционных процессов ММЭС представляет основной интерес в проводимом исследовании. Неравновесные режимы инвестиционного процесса на макроуровне сопровождаются неравновесием в темпах формирования доходов и расходов агентов (например, инвестиций или сбере-

жений), которые приводят к росту или снижению запасов агентов (например, стоимости основных фондов или резервных фондов банков), что способствует в целом либо росту экономики, либо возникновению риска экономического спада.

Для полноты анализа инвестиционного процесса ММЭС требуются и знания о динамически равновесных состояниях, которые рассматриваются, в частности, в макроэкономической модели IS-LM [3]. Теоретические знания о равновесных состояниях системы необходимы для определения тенденций движения системы, как в ретроспективе, так и в перспективе.

Вторая особенность применения динамического подхода состоит в необходимости описания неравновесных инвестиционных процессов ММЭС с помощью взаимосвязанного изменения во времени показателей потоков и запасов. В качестве показателей потоков рассматриваются темпы (скорости) формирования расходов и доходов МЭА (секторов экономики), в качестве показателей запасов рассматриваются объемы накопленных ими ресурсов [3].

Применение концепции финансовых потоков позволяет анализировать динамику движения разнонаправленных и неравномерно распределенных во времени финансовых потоков в виде темпов расходов и доходов МЭА, а также выявлять причины отклонения движения потоков от плана с целью формирования управленческих решений.

Применение концепции ограниченности запасов ресурсов является необходимым для исследования инвестиционных процессов, в том числе и на макроуровне, поскольку именно размер запасов ресурсов (материальных и финансовых) и тенденции их изменения служат основанием для принятия решений в области инвестирования. Например, стоимость основных фондов как объем запаса в виде капитала, служит важным индикатором потенциальных возможностей экономики.

Важность анализа взаимообусловленного изменения потоков и запасов в исследовании динамики инвестиционного процесса ММЭС обусловлена сущностью инвестиций как цепочки последовательно-параллельных процессов изменения во времени потоков доходов и расходов экономических агентов, способствующих либо увеличению запасов (на этапе накопления), либо их временному снижению (на этапе вложения ресурсов) для получения дохода в будущем, который в свою очередь, служит источником роста запасов и всей экономики на следующем цикле инвестиционного процесса.

В работах [3-5] предложена методология исследования динамики ММЭС, в рамках которой показано, что исследование динамики неравновесных воспроизводственных процессов ММЭС в рыночных условиях требует проведения анализа взаимосвязанного изменения во времени двух триад системных факторов. Первая триада отражает динамику поведения макроэкономического агента с учетом ограниченности их запасов и представлена взаимодействием трех факторов, инвариантных по отношению к виду МЭА: темпов потоков, объемов ограниченных запасов финансовых ресурсов и управления каждым в отдельности, влияющих на динамику всего кругооборота потоков ММЭС в целом. Вторая триада рыночных факторов предназначена для описания взаимовлияния трех факторов, инвариантных по отношению к виду макроэкономического рынка: спроса и предложения, чувствительности рыночного механизма и уровня цен как регулирующего фактора, корректирующего поведение МЭА (факторы первой триады) в виде изменения темпов расхода ресурсов.

Представленные ранее методологические положения составляют основу для проведения исследований динамики инвестиционного процесса ММЭС. Особенности взаимодействия потоков и запасов агентов с учетом рыночных факторов в инвестиционном процессе представлены в виде четырех взаимодействующих триад, полученных путем конкретизации триады потоков и запасов МЭА применительно к двум агентам – «Реальный сектор» и «Финансовые учреждения», а также конкретизации триады рыночных факторов к двум макроэкономическим рынкам – «Рынок благ» и «Рынок денег» (рисунок 2).

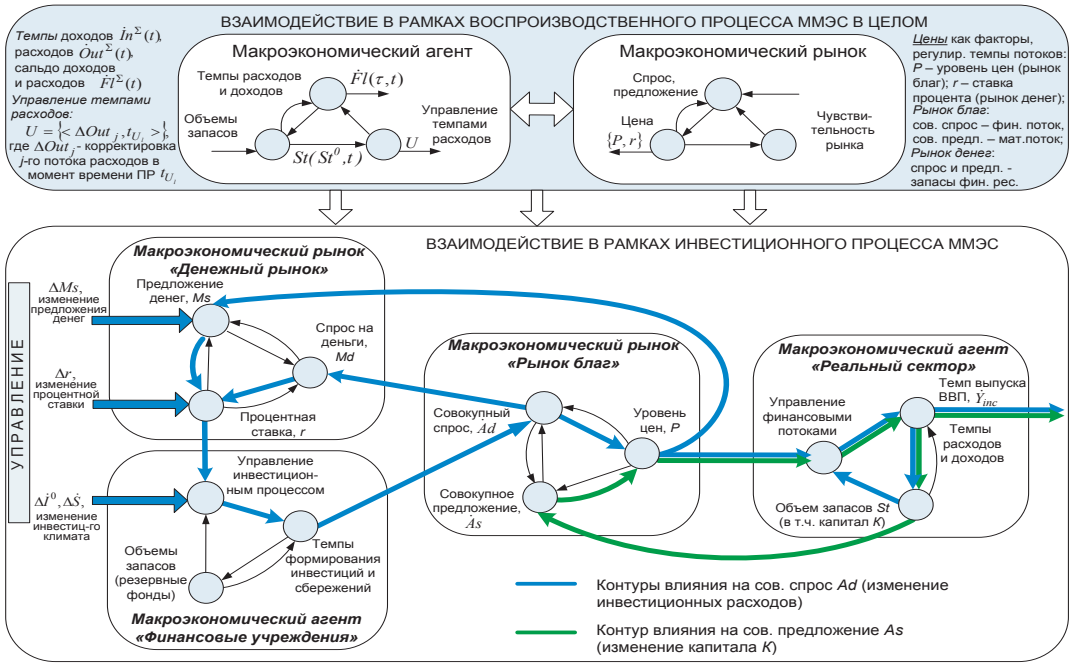


Рисунок 2 -Триады системных факторов, важных для исследования динамики инвестиционного процесса ММЭС

На схеме выделены контуры, охватывающие взаимодействие двух МЭА «Реальный сектор» и «Финансовые учреждения» с учетом регулирующего влияния макроэкономических рынков благ и денег. Действие контуров инициируется решениями, принимаемыми в области денежно-кредитной политики (изменения процентной ставки Δr и денежной массы ΔMs) или в области структурной политики (стимулирование автономных инвестиций $\Delta \dot{I}_i^0$ и сбережений $\Delta \dot{S}$). Выделены контуры, характеризующие первую волну событий в ММЭС, которая связана с изменениями совокупного спроса вследствие изменения инвестиционных расходов, регулируемого уровнем цен на рынке благ.

Эффект от инвестиционной политики, выраженный в виде изменения запаса капитала в реальном секторе экономике, наступает позже; имеет место инвестиционный лаг. Также выделен контур, действие которого обусловлено изменением запаса капитала и связано с изменением совокупного предложения, также регулируемого изменением уровня цен.

Резюмируя вышесказанное, в качестве основных особенностей описания динамики инвестиционного процесса ММЭС следует выделить, во-первых, необходимость анализа цепочек взаимообусловленных изменений во времени разнотемповых и разнонаправленных финансовых и материальных потоков и объемов запасов секторов экономики, характеризующих их потенциальные возможности; во-вторых, принятие решений на основе анализа информации об объемах ограниченных запасов секторов экономики и рыночной ситуации; в-третьих, необходимость учета таких динамических характеристик как инерционность процессов и наличие лагов, внешних и внутренних, при реализации мер государственного регулирования инвестиционного процесса.

Применение *сценарного подхода* позволяет, во-первых, выполнять построение различных сценариев управления инвестиционным процессом ММЭС; во-вторых, проводить анализ причинно-следственных цепочек событий при реализации различных вариантов управления; в-

третьих, выявлять закономерности развития неравновесных ситуаций во времени при различных вариантах государственного регулирования.

2 Когнитивная модель формирования доходов и расходов домохозяйств в рамках воспроизводственного процесса ММЭС

Цель реализации инвестиционного процесса в многосекторной макроэкономической системе состоит в обеспечении такого сбалансированного движения финансовых потоков сбережений и инвестиций и материальных потоков благ с учетом накопления запасов основного капитала, при котором обеспечивается поддержание плановых темпов роста ВВП при условии соблюдения требуемых воспроизводственных пропорций.

Когнитивная модель инвестиционного процесса ММЭС разработана на основе когнитивной модели функционирования макроэкономической системы в рыночных условиях [3] и отличается от нее расширенным составом макроэкономических агентов и макроэкономических рынков и выделенных взаимосвязей между ними.

Согласно предложенной концепции расширен состав элементов – концептов, который включает: три производственных сектора (энерго-сырьевой, фондосоздающий и потребительский), образующих реальный сектор экономики, и соответствующие им три рынка благ, выделенных по виду продукции, выпускаемой производственными секторами (рынок энерго-сырьевых товаров, рынок инвестиционных товаров и рынок потребительских товаров); а также сектор домашних хозяйств (население); сектор финансовых учреждений (банки); сектор государственных учреждений (государство) и рынок денег (рисунок 3). Взаимосвязи между секторами (макроэкономическими агентами) представлены финансовыми потоками. Входные потоки сектора (притоки) образуют его доход, а выходные потоки (оттоки) соответствуют расходам сектора.

Процесс декомпозиции реального сектора на три производственных сектора выполняется путем группировки отраслей по воспроизводственно-функциональному признаку, выделены следующие производственные сектора.

1. Энерго-сырьевой сектор включает предприятия, занимающиеся производством товаров и услуг для промежуточного потребления, то есть оборотных фондов. К нему относятся экспортно-ориентированные отрасли, поставляющие продукцию на внешний и внутренний рынок (например, добыча и переработка полезных ископаемых, химия и нефтехимия, металлургия, лесной комплекс) согласно СНС.

2. Фондосоздающий сектор включает предприятия, занимающиеся производством средств труда – инвестиционных товаров и услуг, основных фондов. К нему относятся внутренне-ориентированные отрасли машиностроения, строительство, наука.

3. Потребительский сектор включает предприятия, занимающиеся производством предметов потребления – товаров и услуг для потребления домашними хозяйствами. К нему относятся отрасли, работающие преимущественно для внутреннего рынка потребительских товаров: сельское хозяйство и рыболовство, легкая и пищевая промышленность, оптовая и розничная торговля, ЖКХ, здравоохранение, образование и оказание социальных услуг.

Описание функционирования реального сектора в виде взаимодействия нескольких (трех) производственных секторов позволяет отразить не только производство конечного продукта (ВВП), но и промежуточного продукта. Несмотря на то, что стоимость промежуточного продукта не учитывается при расчете ВВП во избежание двойного счета, поскольку полностью входит в стоимость средств труда и предметов потребления, анализ структуры промежуточного спроса и потребления признается необходимым в проводимом исследовании, поскольку межсекторные связи оказывают существенное влияние на рыночные ситуации на рынках отдельных видов продукции, и следовательно на поведение ММЭС в целом, поэтому не учитывать это было бы неверным.

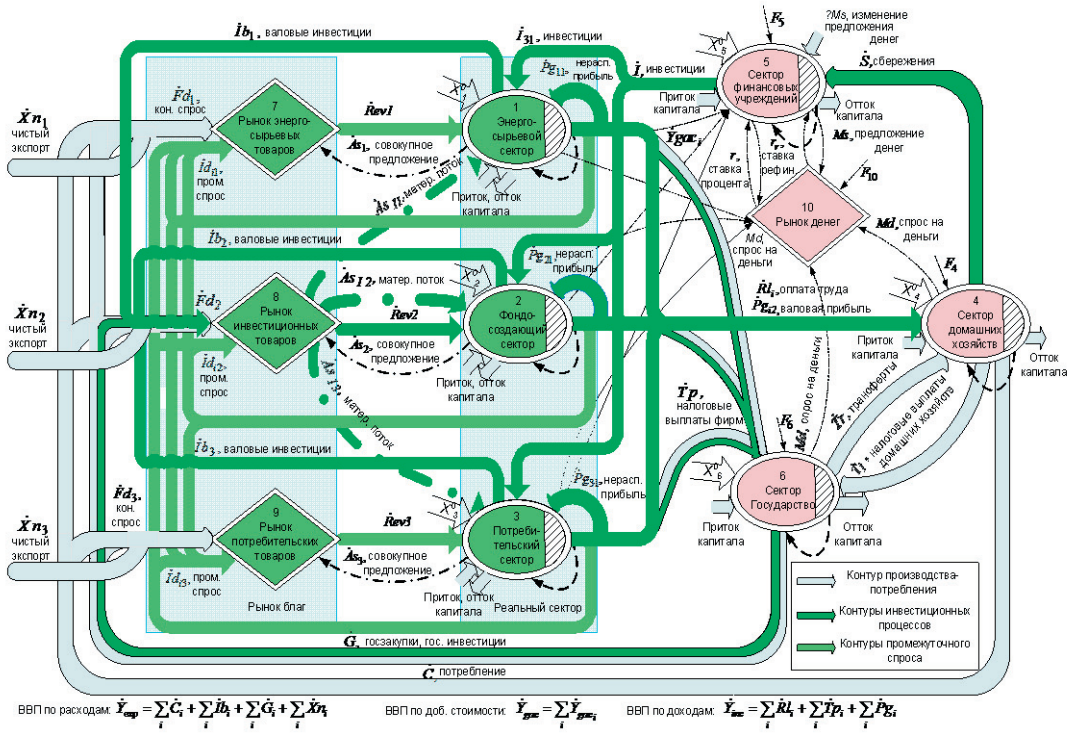


Рисунок 3 – Когнитивная модель инвестиционного процесса ММЭС

Анализ деятельности секторов в отдельности и во взаимосвязи друг с другом представляется важным с позиции выявления воспроизводственных диспропорций. Например, для экономики России анализ энерго-сырьевого сектора важен потому, что в данном секторе задействовано до трети всей рабочей силы. Кроме того, экспортно-ориентированная направленность российской экономики, делает выделение данного сектора в качестве самостоятельного в составе макроэкономической модели просто необходимым. Еще более настоятельным с позиций макроэкономического анализа и интегрального прогнозирования считается анализ функционирования инвестиционного сектора.

Сектора ММЭС (макроэкономические агенты) как элементы когнитивной модели выполняют следующие функциональные процессы:

– производственные сектора выполняют процессы производства продукции, стоимость которой составляет валовой выпуск сектора $\dot{Y}_{.i}$. Валовой выпуск $\dot{Y}_{.i}$ представлен суммой стоимости промежуточного потребления $\dot{I}c_i$ и валовой добавленной стоимости (ВДС) $\dot{Y}_{gac_i}$: $\dot{Y}_{.i} = \dot{Y}_{gac_i} + \dot{I}c_i$. Сумма ВДС трех секторов представляет собой ВВП, рассчитанный производственным методом. Производственные сектора выполняют процессы оплаты труда наемным работникам $\dot{R}l_i$, выплаты налогов $\dot{T}p_i$ и формирования валовой прибыли сектора $\dot{P}g_i$;

– сектор домохозяйств выполняет процессы потребления полученных в результате распределения доходов $\dot{C}$ и процессы сбережения $\dot{S}$ непотребленной части дохода с учетом накопленных ранее запасов, а также осуществляет выплату налогов $\dot{T}_H$;

– сектор финансовых учреждений аккумулирует финансовые средства населения $\dot{S}$, формирует запасы финансовых ресурсов в виде различных фондов и мобилизует их на инве-

стиционные цели, формируя инвестиционные вложения и предоставляя кредиты инвестиционного характера секторам производственной подсистемы $\dot{I}_i$;

– производственные сектора формируют инвестиционный спрос (инвестиционные расходы) на основе собственных и заемных инвестиционных ресурсов с учетом амортизационных отчислений. Формирование собственных средств осуществляется за счет нераспределенной валовой прибыли. Формирование заемных средств осуществляется сектором финансовых учреждений на основе сбережений сектора домохозяйств как основного их источника;

– государственный сектор выполняет процессы формирования доходов государственного бюджета на основе налоговых и неналоговых поступлений $\dot{T}p$ от реального сектора и $\dot{T}_H$ от сектора домохозяйств, а также формирования расходов $\dot{G}$ в виде государственных закупок; включающих в своем составе и инвестиционные расходы (предоставляет государственные инвестиции);

– производственные сектора формируют предложение товаров на соответствующих рынках и получают доход от реализации продукции;

– производственные сектора получают приобретенные на рынке инвестиционные товары, увеличивающие запас основных фондов секторов, вводят их в эксплуатацию в течение определенного времени и получают валовую прибыль от производства и реализации вновь произведенной продукции, которая служит источником инвестиционных ресурсов на следующем инвестиционном цикле.

Согласно предложенной в работе [3 методологии каждый макроэкономический агент (сектор) выполняет следующие процессы:

- имеет запас финансовых и материальных ресурсов, в том числе основных фондов и товарно-материальных запасов (ТМЗ) (заштрихованная область);
- планирует темпы своих расходов и их соотношения в соответствии со своими целями;
- анализирует информацию о размере текущих запасов и темпах поступающих доходов (связь условно обозначена в виде петли на концепте), а также информацию о состоянии других секторов, рыночных условиях и всей ММЭС в целом;
- принимает решения по корректировке плановых темпов расхода финансовых ресурсов на основе результатов анализа;
- выполняет управляемые функциональные процессы, соответствующие определенным видам деятельности (активности) МЭА и связанные с расходом финансовых ресурсов;
- получает финансовые ресурсы от других агентов, выполняющих свои функциональные процессы;
- получает материальные ресурсы в виде удовлетворенного спроса.

Множество элементов когнитивной модели представлено также и макроэкономическими рынками. Каждому производственному сектору соответствует рынок производимой им продукции. Необходимость декомпозиции рынка благ обусловлена следующими положениями.

Во-первых, это различие групп товаров по их роли в процессе производства и потребления. Энерго-сырьевые товары (оборотные фонды) полностью потребляются в процессе производства и в большинстве своем используются для промежуточного потребления. Инвестиционные товары (основной капитал) также используется в процессе производства, но переносят свою стоимость на продукт постепенно. Рынок основного капитала является сферой потребления инвестиций. Рынок энерго-сырьевых товаров (оборотных средств) называют рынком предметов труда, а рынок инвестиционных товаров (основного капитала) называют рынком средств труда. Эти два рынка составляют рынок средств производства. Потребительские же товары в основном используются домашними хозяйствами, которые и являются основными предъявителями спроса на рынке потребительских товаров. Потребительские товары могут быть использованы в процессе производства лишь опосредованно.

Во-вторых, это различие конъюнктуры рынков различных видов продукции, которое сказывается в первую очередь в формировании уровней цен как регуляторов рыночного спроса и предложения. Цены на потребительские и инвестиционные товары в большей степени зависят от ситуации на внутренних рынках, цена же на рынке энерго-сырьевых товаров сильно зависит от конъюнктуры мировых рынков.

В-третьих, ключевой особенностью рынка инвестиционных товаров является тот факт, что именно этот рынок аккумулирует инвестиционный спрос (капитальные вложения) со стороны всех производственных секторов и является поэтому определяющим в достижении целей инвестиционного процесса ММЭС. В межотраслевом балансе инвестиционный спрос входит в состав конечного спроса и отражается в графе «Валовое накопление основного капитала».

Рынки продукции производственных секторов в целом образуют рынок благ. Совокупный спрос $\dot{A}d_i$ на каждом рынке представлен суммой конечного спроса $\dot{F}d_i$ (потребление, инвестиции, госзакупки, чистый экспорт) и промежуточного спроса $\dot{I}d_i$: $\dot{A}d_i = \dot{F}d_i + \dot{I}d_i$.

Структура совокупного спроса существенного различается на различных рынках продукции производственных секторов. Для российской экономики сложились следующие структурные особенности рынков. Наиболее высокий промежуточный спрос предъявляется на оборотные фонды (энерго-сырьевые товары). Конечный спрос со стороны населения максимальный на рынке предметов потребления, а конечный спрос на сырье в основном представлен спросом иностранного сектора, то есть экспортом. Чистый экспорт на рынке инвестиционных товаров отрицательный, поток импорта превышает экспорт.

Расширение состава элементов–концептов когнитивной модели влечет за собой расширение и множества связей, которое включает:

- во-первых, множество связей между производственными секторами с учетом рынков их продукции в виде промежуточного потребления и промежуточного спроса, которые построены на основе методологии межотраслевого баланса и относятся к финансовым потокам;
- во-вторых, множество связей в виде компонентов совокупного спроса (инвестиционного, потребительского спроса, госзакупок и чистого экспорта) для макроэкономических рынков благ всех производственных секторов, которые относятся также к финансовым потокам;
- в-третьих, множество связей в виде материальных потоков удовлетворенного инвестиционного спроса (потоков инвестиционных товаров), представленных штрихпунктирными линиями;
- в-четвертых, множество информационных связей, регулирующих инвестиционный процесс на основе информации об объемах запасов (фондов накопления, стоимости основных фондов, государственных фондов) и рыночной ситуации (уровнях цен и процентных ставок).

Согласно определению инвестиционного процесса ММЭС на схеме выделены контуры инвестиционного процесса в рамках воспроизводственного процесса ММЭС, которые объединены в три группы.

Первая группа представлена контурами типа «сбережения-инвестиции», которые являются основными в инвестиционном процессе. Они включают:

- контуры формирования инвестиционных ресурсов на основе заемных средств $\dot{I}_i$, формируемых на основе сбережений населения $\dot{S}$ (цепочки концептов 1-4-5-1, 2-4-5-2, 3-4-5-3);
- контуры формирования инвестиционных ресурсов на основе собственных средств $\dot{P}g_{il}$ (петлевые связи концептов 1, 2 и 3);

- контуры формирования инвестиционного спроса на рынке инвестиционных товаров, которые включают контур получения дохода фондосоздающего сектора от реализации инвестиционных товаров (цепочка 2-8-2), и особенно важные контуры, материально-финансовые, которые определяют поступление основных фондов секторов и рост из запасов (цепочки 1-8-1, 2-8-2, 3-8-3).

Вторую группу представляют контуры взаимодействия производственных секторов посредством формирования промежуточного потребления и промежуточного спроса на рынках производимой продукции (рынках благ).

Третья группа представлена контурами типа «налоги–государственные инвестиции», которые предполагают стимулирование инвестиционной активности через снижение ставок налогообложения, а также формирование государственных инвестиций в составе госзакупок согласно методологии СНС (цепочки концептов 1-6-8-1, 2-6-8-2, 3-6-8-3). Контуры являются частью финансовых потоков налогов и госзакупок.

Анализ динамически равновесного режима инвестиционного процесса ММЭС требует контроля соблюдения следующих типов балансов:

– балансовых соотношений между сбережениями и инвестициями $\dot{S} = \dot{I}b_{sum}$, которые характеризуют согласованность интересов различных агентов (производственных секторов и домохозяйств), поведение которых диктуется различными факторами (процентной ставкой для реального сектора и располагаемыми доходами – для населения), что свидетельствует об особой сложности достижения сбалансированности этих потоков. Возникновение существенных отклонений в этом соотношении требует принятия мер по корректировке интересов агентов, реализующих преобразование сбережений в инвестиции;

– балансовых соотношений между темпами формирования валовых инвестиций и амортизации $\dot{I}b_i = \dot{A}m_i,\ i = \overline{1,3}$ по всем производственным секторам. Возникновение неравновесия по этому балансовому соотношению позволят диагностировать ситуации «нулевого роста» (чистые инвестиции равны нулю: $\dot{I}_{net_i} = \dot{I}b_i - \dot{A}m_i = 0$), ситуации роста экономики ($\dot{I}b_i > \dot{A}m_i$ или $\dot{I}_{net_i} > 0$) и ситуации «падающей экономики» (с отрицательными чистыми инвестициями $\dot{I}b_i < \dot{A}m_i$ или $\dot{I}_{net_i} < 0$), что необходимо для своевременного принятия решений;

– балансовых соотношений между фактическими значениями нераспределенной валовой прибыли $\dot{P}g_{i1}$ и собственных инвестиций $\dot{I}b_{ii}$: $\dot{P}g_{i1} = \dot{I}b_{ii},\ i = \overline{1,3}$. Анализ этого соотношения позволяет определить режим функционирования сектора: либо это режим расходования накопленных ранее запасов ($\dot{P}g_{i1} < \dot{I}b_{ii}$), либо режим их накопления ($\dot{P}g_{i1} > \dot{I}b_{ii}$).

Эти балансовые соотношения применяются для анализа инвестиционного процесса ММЭС, однако для полноты анализа они должны быть дополнены принятыми для ММЭС в целом балансовыми соотношениями в виде равенств расходов и доходов по каждому макроэкономическому агенту и равенств спроса и предложения на макроэкономических рынках.

Нарушения перечисленных соотношений служат индикаторами смены тенденций неравновесных инвестиционных процессов. Важным является факт, что любые неравновесия для их корректировки требуют расходования накопленных запасов ресурсов секторов экономики. Сопоставительный анализ неравновесных состояний инвестиционного процесса по возможным комбинациям видов нарушений названных трех балансовых соотношений позволяет предварительно выделить кластеры неравновесных ситуаций с целью последующей подготовки управленческих решений.

Разработанная когнитивная модель предполагает также и контроль ВВП путем расчета его тремя методами, которые разнесены по стадиям воспроизводственного процесса.

Производственный метод используется на стадии производства ВВП и предполагает расчет ВВП как суммы ВДС трех секторов: $\dot{Y}_{gac} = \sum_i \dot{Y}_{gac_i}$, $i = \overline{1,3}$, где $\dot{Y}_{gac_i} = \dot{Y}_i - \dot{I}c_i$, отсюда:

$$\dot{Y}_{gac} = \sum_i \dot{Y}_i - \sum_i \dot{I}c_i, \; i = \overline{1,3}.$$

Из валовой добавленной стоимости выплачивается оплата труда наемным работникам $\dot{R}l_i$ (заработная палата, включая премии, надбавки и прочее), чистые косвенные налоги $\dot{T}p_i$ и валовая прибыль секторов $\dot{P}g_i$ (часть ВДС, остающаяся в распоряжении производителей, после уплаты налогов и оплаты труда). Перечисленное является первичными доходами и в сумме составляет ВВП по доходам, или ВВП, рассчитанный *распределительным методом*: $\dot{Y}_{inc} = \sum_i \dot{Y}_{inc_i}$, $i = \overline{1,3}$, где $\dot{Y}_{inc_i} = \dot{R}l_i + \dot{T}p_i + \dot{P}g_i$, отсюда: $\dot{Y}_{inc} = \sum_i \dot{R}l_i + \sum_i \dot{T}p_i + \sum_i \dot{P}g$, $i = \overline{1,3}$.

Согласно *методу конечного использования*, суммируются расходы на конечное потребление товаров и услуг домашних хозяйств, государства, валовые инвестиции, чистый экспорт. ВВП рассчитывается по формуле: $\dot{Y}_{exp} = \sum_i \dot{C}_i + \sum_i \dot{I}b_i + \sum_i \dot{G}_i + \sum_i \dot{X}n_i$, $i = \overline{1,3}$.

Анализ когнитивной модели позволяет сформулировать ряд ее особенностей, важных с позиции принятия решений при управлении инвестиционным процессом ММЭС.

Во-первых, ключевым концептом, определяющим динамику и эффективность управления инвестиционным процессом ММЭС, является концепт 2 «Фондосоздающий сектор».

Во-вторых, роль инвестиционного процесса в воспроизводственном процессе ММЭС в целом состоит в обеспечении механизмов наращивания темпов выпуска ВВП и потребления населения в основном контуре «производство-потребление» за счет предварительного создания резервуаров (запасов) финансовых ресурсов и их последующего расходования в контурах инвестиционного процесса для целей накопления материальных ресурсов в виде запасов основного капитала, которые служат источником роста темпов выпуска ВВП.

В-третьих, показано, что особенность структуры финансовых потоков, которые составляют инвестиционный спрос на рынке инвестиционных товаров, обуславливает необходимость приоритетного и опережающего развития сектора, производящего эти товары (фондосоздающего сектора) как обязательного условия модернизации экономики и выхода ее на инвестиционно-ориентированный сценарий.

В-четвертых, выделение контуров в составе инвестиционного процесса позволяет выявить последовательно-параллельные пути распространения возмущений, порождающие мультипликативные эффекты; а также исследовать параллельные пути (цепочки) распространения возмущений по нескольким контурам одновременно с целью выявления кумулятивного эффекта их одновременного действия.

3 Динамические модели формирования располагаемых доходов домохозяйств

Комплекс разработанных динамических моделей инвестиционного процесса ММЭС включает в себя динамические модели энерго-сырьевого, фондосоздающего и потребительского секторов экономики и сектора финансовых учреждений. Модели взаимосвязаны в рамках макроэкономического кругооборота и содержат модели накопления и потребления основного капитала, а также модели формирования инвестиционных расходов финансовым сектором с учетом динамики уровня цен и процентной ставки.

Динамическая модель инвестиционного процесса представляет собой систему непрерывных нелинейных дифференциальных уравнений, которые описывают динамику:

- процессов попеременного накопления и расходования запасов финансовых ресурсов на основе сбережений в одних секторах и материальных ресурсов в виде основного капитала в других секторах экономики;
- процессов согласованного формирования инвестиционных расходов различными секторами в неравновесных условиях рынков благ и денег с учетом динамики изменения процентной ставки.

Для реального сектора выполнен процесс группировки отраслей по воспроизводственно-функциональному признаку в виде трех производственных секторов: К энерго-сырьевому сектору относятся экспортно-ориентированные отрасли, поставляющие продукцию на внешний и внутренний рынок: добыча и переработка полезных ископаемых, химия и нефтехимия, металлургия, лесной комплекс. К фондосоздающему сектору относятся внутренне-ориентированные отрасли машиностроения, строительство, наука. К потребительскому сектору относятся отрасли, работающие преимущественно для внутреннего рынка потребительских товаров: сельское хозяйство и рыболовство, легкая и пищевая промышленность, оптовая и розничная торговля, ЖКХ, здравоохранение, образование и оказание социальных услуг. Отметим, что отрасли инфраструктурного сектора (транспорт и связь, торговля, финансы, кредит, управление) не выделяются в отдельный сектор, а распределяются между тремя выделенными секторами, например, пассажирский транспорт и гражданская связь относятся к потребительскому сектору, тогда как грузовой транспорт и служебная связь относятся к энерго-сырьевому сектору.

Особое внимание необходимо уделить моделированию процессов взаимодействия банковского и реального секторов экономики, который реализуется через формирование разнотемповых и разнонаправленных потоков материальных благ и финансовых ресурсов, регулируемых на основе информации об уровне рыночных цен и объемах накопленных запасов ресурсов. Особенность построения модели состоит в применении агент-ориентированного подхода к описанию динамики поведения групп коммерческих банков и предприятий.

Поведение агентов «Коммерческие банки» формируется с учетом анализа структуры банковского капитала. В основу формирования правил поведения положена поточно-запасная концепция, предполагающая применение ранее разработанных моделей корректировки темпов расходования ресурсов на основе информации об объемах накопленных запасов [3,4]. Применительно к анализу структуры банковского капитала поточно-запасные модели расширены за счет увеличения количества накопителей. Их число определяется количеством элементов в структуре банковского капитал, выделенных по источникам х формирования. Анализ структуры банковского капитала и формирование рекомендаций по управлению предполагает расчет риска банковских активов для расчета нормативной достаточности капитала банка

Поведение агентов «Фирмы» определяется не только текущей рыночной ситуацией, но и влиянием структуры капитала предприятия. Основными элементами которого являются собственный и заемный капитал. Расчет коэффициентов финансовой устойчивости предприятия и формирование цены капитала позволяет провести анализ финансового риска при принятии решений агентом «Фирмы» о привлечении заемного капитала. Динамика взаимодействия агентов «Фирмы» и «Коммерческие банки» определяется результатами согласованного принятия решений о предоставлении кредитов в неопределенных рыночных условиях с учетом информации о структуре и объемах накопленного капитала банков и предприятий.

Проведены экспериментальные исследования эффективности предлагаемых интеллектуальных алгоритмов принятия решений по управлению инвестиционным процессом ММЭС по различным сценариям в соответствии с предложенной методикой проведения системных исследований и на основе разработанных динамических моделей и алгоритмов управления. Показано, что инвестиционный сектор обеспечивает больший темп роста ВВП при увеличении инвестиционных расходов при прочих равных условиях и характеризуется большим мультипликатором инвестиций, что объясняется структурой межсекторных финансовых и материальных потоков, сконцентрированных на рынке инвестиционных товаров. Показано, что сниже-

ние ставки рефинансирования на 1–2 процентных пункта позволяет повысить инвестиционные расходы производственных секторов, способствующие увеличению ВВП в 1,07–1,12 раз.

Заключение

Таким образом, предложена концепция исследования и системного моделирования инвестиционного процесса многосекторной макроэкономической системы, которая основана на когнитивном, динамическом, структурном, сценарном и других подходах, интегрированных на базе системного подхода. Интегрирующая роль системного подхода состоит в соблюдении прерогативы целостности, согласно которой только после познания динамических свойств воспроизводственного процесса всей ММЭС в целом возможно исследование динамики инвестиционного процесса как его составляющей части. Это проявляется в исследовании динамики инвестиционного процесса в единстве с воспроизводственным процессом ММЭС и во взаимодействии с основным, системообразующим контуром «производство-потребление» макроэкономического кругооборота финансовых потоков, функционирующего с учетом запасов секторов экономики.

Особенности применения когнитивного подхода состоят в проведении первоначальной структуризации инвестиционного процесса на макроуровне и выделении такого концепта – фондосоздающего сектора, деятельность которого является ключевой в реализации инвестиционных вложений и обуславливает рост выпуска ВВП в секторах экономики и всей ММЭС в целом с учетом структуры выявленных потоковых и информационных управляющих связей между концептами (секторами и макроэкономическими рынками).

Особенности применения динамического подхода состоят в исследовании динамически неравновесных режимов протекания инвестиционного процесса ММЭС с помощью цепочки последовательно-параллельных процессов изменения во времени потоков доходов и расходов макроэкономических агентов, корректируемых ценовыми механизмами макроэкономических рынков и способствующих либо увеличению запасов (на этапах формирования сбережений или накопления капитала), либо их временному снижению (на этапе вложения ресурсов) для получения дохода в будущем, который, в свою очередь, служит источником роста запасов секторов и темпов выпуска ВВП в целом на следующем цикле инвестиционного процесса.

Разработанная когнитивная модель инвестиционного процесса ММЭС позволяет:

- определить роль инвестиционного процесса в воспроизводственном процессе ММЭС в целом, которая состоит в обеспечении «подпитки» основного контура «производство-потребление» воспроизводственного процесса за счет неравномерно распределенных во времени процессов создания резервуаров (запасов) финансовых и материальных ресурсов и их расходования в контурах инвестиционного процесса;
- описать инвестиционный процесс ММЭС в виде множества взаимосвязанных контуров, объединенных в три группы: контуры «сбережения-инвестиции» как основные контуры инвестиционного процесса; контуры промежуточного потребления и спроса, отражающие особенности межсекторных связей между производственными секторами; и контуры «налоги-госзакупки», предназначенные для «демпфирования» влияния неблагоприятного инвестиционного климата на фоормирование государственных инвестиционных расходов;
- определить особенности взаимодействия названных контуров неравновесного инвестиционного процесса, которые обусловлены попеременным созданием запасов финансовых ресурсов (сбережений) в одних секторах и материальных ресурсов (основных фондов) в других секторах, а также построением такого согласованного формирования темпов их расходования различными секторами с учетом механизмов рыночного регулирования, которое обеспечивает рост темпов выпуска ВВП;
- выявить ключевую роль фондосоздающего сектора и рынка инвестиционных товаров, которая определена структурой финансовых и материальных потоковых связей между сек-

торами экономики, что обуславливает необходимость приоритетного и опережающего развития фондосоздающего сектора как необходимого условия модернизации экономики и выхода ее на инвестиционно-ориентированный сценарий;

- определить характерные для анализа динамики инвестиционного процесса на макроуровне балансовые соотношения, нарушения которых служат индикаторами смены тенденций изменения неравновесных инвестиционных процессов, что позволяет предварительно выделить кластеры неравновесных ситуаций с целью последующей подготовки управленческих решений;
- выявить сложность обеспечения в рамках инвестиционного процесса согласованного взаимодействия двух сторон, представленных секторами-агентами (или функциями одного сектора-агента), при котором поведение одних нацелено на формирование накоплений (сбережений), а поведение других – на формирование расходов (инвестиций) и регулируется различными факторами, что приводит к необходимости участия третьей стороны, представленной макроэкономическим агентом «Государственные учреждения» для реализации функций государственного регулирования инвестиционного процесса на макроуровне.

В целом, результаты экспериментальных исследований эффективности управления инвестиционным процессом ММЭС показали, что принимаемые решения позволяют обеспечить переход от динамически неравновесных неблагоприятных инвестиционных ситуаций к ситуациям, соответствующим более высокому темпу выпуска валового внутреннего продукта. Показано, что эффективность управления инвестиционным процессом ММЭС существенно зависит как от воспроизводственных пропорций ВВП, отражающих особенности ММЭС, так и от своевременности принятия управленческих решений.

Список использованных источников

[1] Прогноз и моделирование кризисов и мировой динамики / Отв. ред. А. А. Акаев, А. В. Коротаев Г. Г. Малинецкий. – М.:Издательство ЛКИ, 2010. – 352 с.

[2] Чернов В.Г. Модели поддержки принятия решений в инвестиционной деятельности на основе аппарата нечетких множеств. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 312 с.

[3] М.Б.Гузаиров, Б. Г. Ильясов, И. В. Дегтярева, Е. А. Макарова, Э. Р. Габдуллина. Системный анализ, управление и динамическое моделирование воспроизводственного процесса на макроуровне. Учебное пособие. Изд-во Машиностроение, 2013. № 1. 207 с.

[4] Интеллектуальные алгоритмы принятия решений при управлении инвестиционным процессом макроэкономической системы / Б. Г. Ильясов, И. В. Дегтярева, Е. А. Макарова, Т. А. Карташева // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 6, Т. 2. С. 116–122.

[5] Нейросетевые и нейронечеткие технологии в управлении динамикой инвестиционного процесса на макроуровне / Б. Г. Ильясов, И.В.Дегтярева, Е. А. Макарова, Т. А. Карташева // Нейрокомпьютеры. 2013. № 3. С. 53-57.

ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ И УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ЖИЗНИ

Б.Г. Ильясов, ЕА. Макарова, Е.Ш. Закиева

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К.Маркса, 12, Россия
zakievae@mail.ru
тел: +7 (347) 273-78-35, факс: +7 (347) 273-78-35

Ключевые слова: *качество жизни, иерархическая модель, когнитивная модель, интегральный показатель, компонент качества жизни, первичные потребности, вторичные потребности, обеспеченность ресурсами, механизм самоорганизации, динамика взаимодействия*

Abstract

There are considered the actual problems of life quality research. The analysis of existing approaches to the study and modeling of life quality is carried out. The hierarchical model of life quality in the form of triads and the cognitive model of the formation of life quality are developed.

Введение

С точки зрения современной науки цивилизация в настоящее время стоит перед выбором: глобальная катастрофа в случае сохранения тенденций традиционного пути развития или разработка и осуществление новой парадигмы развития, представляющей собой переход на новый уровень качества жизни. Данный кризис – очередной в ряду глобальных экологических кризисов, пережитых человечеством за период своего развития [1].

Поиск новых концепций цивилизационного развития ведется по многим направлениям: постиндустриальные и информационные модели, глобалистские мироцелостные модели, модели устойчивого развития и другие. Но все больше человечество осознает, что только качество жизни в наибольшей степени выражает целевые устремления мирового сообщества и отвечает новым требованиям цивилизационного развития.

Обращение к проблемам качества жизни особенно важно для России, которая переживает период структурной перестройки, трансформацию моделей социальной политики, поиска новых направлений, путей и механизмов социально-экономического развития.

Категория качества жизни как интегральная характеристика жизни людей раскрывает в целом критерии жизнедеятельности общества, условия жизнеобеспечения, а также и условия жизнеспособности общества как целостного социального организма. Данная категория охватывает практически все стороны жизни общества, что приводит к необходимости новой ориентации – ориентации на качество жизни. С точки зрения философии речь идет о переходе от качественной количественности, которая акцентирует внимание на многообразии качественных сторон жизни общества через их количественные характеристики, к качественной целостности, которая дает понятие о качестве взаимосвязи сторон жизни общества. Таким образом, качество жизни становится современной парадигмой цивилизационного развития.

1 Анализ существующих подходов к исследованию проблем качества жизни

Проблематика, стоящая за понятием «качество жизни», является в настоящее время объектом научных исследований во многих областях знания. В дискуссию о качестве жизни вовлечены исследовательские центры, правительственные органы, различные международные организации. Это многостороннее и комплексное понятие, т.к. включает в себя вопросы жиз-

ни, быта, мировоззрения, потребления, окружающей среды, психики, поведения, общественной и трудовой деятельности отдельной личности, социальных групп, слоев и классов.

На сегодняшний день в отечественной и зарубежной научной литературе можно найти несколько десятков определений понятия «качество жизни». Такое разнообразие точек зрения, с одной стороны, свидетельствует о большом интересе к проблеме и актуальности ее разработки, с другой – о сложности проблемы, и, как следствие, слабой разработанности методических и теоретических положений теории качества жизни.

Именно в силу своего комплексного характера понятие «качество жизни» стало предметом исследования, интерпретации и теоретических обобщений ряда гуманитарных наук: философии, экономики, экологии, социальной психологии, медицины и других. Каждая из них предлагает свою трактовку данного понятия, придавая ему специфические черты.

В рамках философского подхода качество жизни трактуется как удовлетворенность личностью уровнем реализации духовных, культурных потребностей, своей жизнедеятельностью в условиях социума. Для философского подхода характерна связь качества жизни с духовностью, нравственностью, образованностью, справедливостью и счастьем.

В рамках экономического подхода качество жизни понимается как отражение материального уровня благосостояния субъекта и как способность человека воспроизводить и увеличивать своей материальный достаток (Р. Арон, Д. Белл, Дж. Гэлбрейт, П. Дракер, Э. Тоффлер, У. Ростоу и др.). В рамках данного подхода существуют две точки зрения рассмотрения качества жизни: оптимистическая и пессимистическая.

Представители оптимистической точки зрения утверждают, что переход к обществу нового качества жизни возможен только на основе научно-технического прогресса, что существует связь между уровнем экономического развития и качеством жизни.

Представители пессимистической точки зрения считают, что экономический рост, ухудшая состояние окружающей среды, оказывает отрицательное воздействие на жизнь человека. Вследствие этого человечество должно либо замедлить, либо остановить экономический рост, сократить потребление материальных благ.

В рамках экологического подхода качество жизни понимается как создание таких условий, при которых не только не нарушается состояние окружающей среды, но и сохраняются природные ресурсы, необходимые для существования будущих поколений (Дж. Форрестер, У. Бек, Д.М. Гвишиани, В.И. Данилов-Данильян, Н.Н. Моисеев и др.). По мнению сторонников экологического подхода продолжающийся экономический рост, не согласованный с законами природы, приведет к исчерпанию ресурсной базы, разрушению природной среды и гибели человечества. Выход они видят в том, чтобы восстановить нарушенное равновесие между природой и человеком, создать возможности для удовлетворения потребностей людей, улучшить их благосостояние, снизить нагрузки на окружающую среду, сохранить ее для будущих поколений;

В рамках социально-психологического подхода качество жизни рассматривается как субъективная удовлетворенность человека своей жизнью, что выражается в его оценке уровня и степени реализации своих потребностей. В то же время представители данного подхода не отрицают значимость объективных оценок качества жизни, считая, что в исследованиях качества жизни необходимо учитывать сложный характер взаимосвязи объективных условий и их субъективную оценку, т. к. условия жизнедеятельности людей проявляются в их поведении, отражаются в сознании человека, что, в конечном счете, оказывает влияние на их оценку качества своей жизни.

В рамках медицинского подхода качество жизни понимается как сохранение и воспроизводство жизни и здоровья человека, воспроизводство человеческого рода, здорового образа жизни. К основным механизмам, способствующим этому, представители данного подхода относят пропаганду здорового образа жизни; формирование нормативно-правовой базы развития современного здравоохранения; реформирование системы первичной медицинской помощи;

широкое создание клинико-диагностических центров; реорганизацию стационарной медицинской помощи; разработку и внедрение в практику различных целевых социально-медицинских программ; развитие материально-технической базы здравоохранения; повышение качества медицинской помощи и эффективности использования ресурсов; расширение самостоятельности учреждений здравоохранения; формирование системы управления качеством медицинской помощи.

Таким образом, качество жизни – это достаточно широкое междисциплинарное понятие, не имеющее общепринятого толкования, и для его изучения типичны исследования, проводимые на стыке ряда наук. По мере развития человеческого общества отношение к этому понятию меняется. Каждое следующее поколение выдвигает свои требования к жизни и определяет критерии ее «нормальности» и «качественности» [1].

2 Иерархическая и когнитивная модели качества жизни

На сегодняшний день разработано большое количество моделей оценки качества жизни. Сущность подходов к моделированию качества жизни состоит в следующем [2]:

построение моделей как отдельных составляющих качества жизни, так и интегрального показателя в целом;

моделирование взаимосвязей качества жизни с факторами, его обусловливающими, а также анализ зависимостей между показателями качества жизни;

многокритериальная классификация объектов по уровню качества жизни;

анализ динамики изменения и прогнозирование тенденций изменения качества жизни.

В силу того, что показатель качества имеет иерархическую структуру, процесс моделирования качества жизни предполагает разработку моделей нескольких уровней [2].

Модели первого уровня представляют собой простейшие модели с ограниченным числом переменных, позволяющие получить конкретную характеристику отдельного свойства качества жизни, например, исчисление рождаемости, степени удовлетворения потребностей.

Модели второго уровня позволяют получить более обобщенную характеристику определенного аспекта качества жизни. В то же время полученные интегрированные показатели являются более условными и предполагают больший набор переменных, а также применение более сложных математических методов. Примером служат модели продолжительности жизни.

Модели третьего уровня включают еще больший набор переменных и более сложные математические методы, означают еще большую степень условности получаемого показателя, позволяют получить интегральную характеристику нескольких аспектов качества жизни. Например, показатель качества населения отражает интегральные характеристики здоровья, образования, демографических показателей и т. п. Соответственно модели третьего уровня представляют собой набор более сложных модельных конструкций. К моделям третьего уровня относится также модель исчисления индекса развития человеческого потенциала.

Модели четвертого уровня претендуют на получение наиболее интегрированных показателей, отражающих все базовые компоненты качества жизни. К моделям четвертого уровня относится модель С. Айвазяна.

В рамках проводимого исследования разработаны две модели: иерархическая модель качества жизни в виде триад и когнитивная модель формирования показателя качества жизни.

Иерархическая модель (см. рисунок 1) рассматривает понятие качества жизни с позиций системного подхода, согласно которому данное понятие может быть последовательно декомпозировано и представлено в виде триад взаимосвязанных компонентов, составляющих понятие качества жизни и расположенных на нескольких уровнях. На первом (нижнем) уровне расположена триада компонентов, характеризующих уровень жизни (благосостояние) населения: уровень доходов и расходов населения, качество питания и качество жилищных условий.

На втором уровне расположена триада компонентов, характеризующих качество населения: качество и уровень образования, качество (состояние) здоровья, качество досуга и отдыха. На третьем уровне расположена триада компонентов, характеризующих качество среды жизнедеятельности: качество окружающей среды, качество социальной сферы и качество трудовой жизни. На верхнем уровне расположен интегральный показатель качества жизни. Каждый из компонентов качества жизни, в свою очередь, может быть декомпозирован на большее количество взаимосвязанных элементов, также представленных в виде триад.

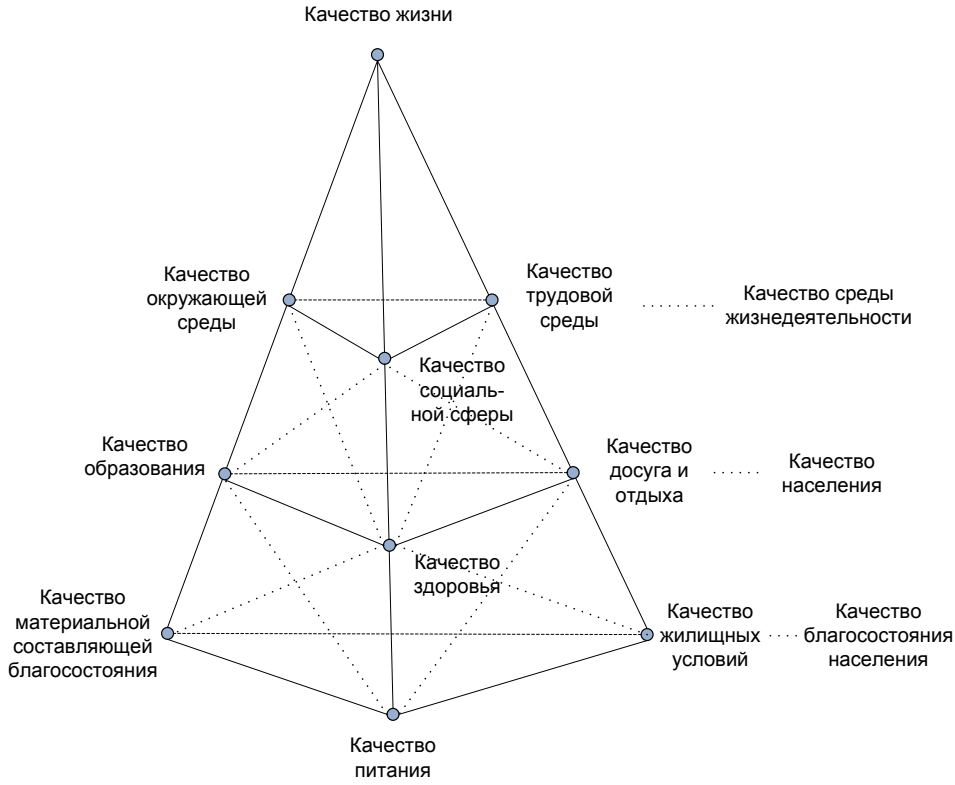


Рисунок 1 – Модель качества жизни в виде триад

Когнитивная модель (см. рисунок 2) рассматривает формирование интегрального показателя качества жизни с позиций системного подхода, в соответствии с которым в структуре данного показателя выделены три взаимосвязанных компонента: степень удовлетворения первичных потребностей человека, степень удовлетворения вторичных потребностей человека и степень обеспеченности необходимыми ресурсами для удовлетворения этих потребностей. Особенностью предлагаемой модели является то, что каждый из выделенных компонентов качества жизни и сам по себе интегральный показатель качества жизни обладают собственным механизмом самоорганизации [3].

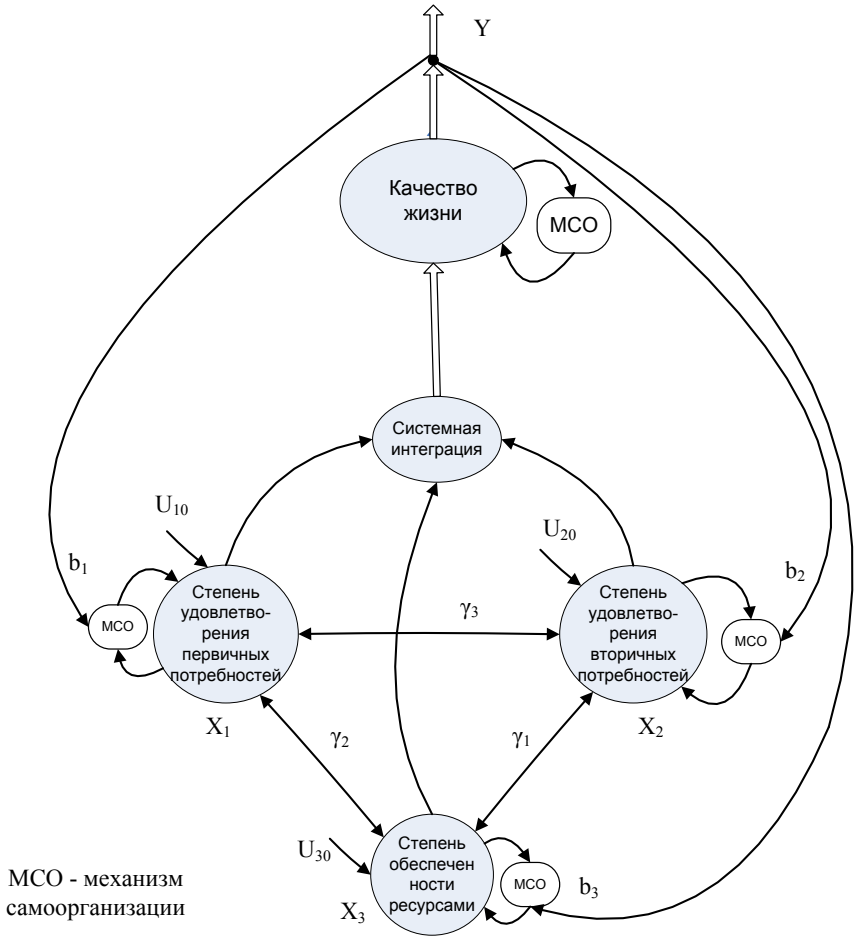


Рисунок 2 – Когнитивная модель качества жизни

Динамика взаимодействия выделенных компонентов качества жизни описывается нелинейными дифференциальными уравнениями:

$$\dot{X}_1 = a_{10}X_1 - a_{11}X_1^2 + \gamma_1 X_2 X_3 - b_1 Y + U_{10};$$

$$\dot{X}_2 = a_{20}X_2 - a_{22}X_2^2 + \gamma_2 X_1 X_3 - b_2 Y + U_{20};$$

$$\dot{X}_3 = a_{30}X_3 - a_{33}X_3^2 + \gamma_3 X_1 X_2 - b_3 Y + U_{30};$$

$$\dot{Y} = a_{40}Y - a_{44}Y^2 + X_1 X_2 X_3.$$

Рассмотрим основные параметры модели.

Переменная X_1 характеризует степень удовлетворения первичных (социально-биологических) потребностей человека, обусловленных генетически. К первичным потребностям относятся физиологические (питание, вода и т.п.) и экзистенциональные (безопасность существования, комфорт, постоянство условий жизни и т.п.) потребности.

Переменная X_2 характеризует степень удовлетворения вторичных (социально-духовных) потребностей человека, формирующихся в ходе процессов познания и деятельности. К вторичным потребностям относятся социальные (общение, привязанность, забота о дру-

гом и внимание к себе, совместная деятельность), престижные (самоуважение, уважение со стороны других, признание, достижение успеха и высокой оценки, служебный рост), духовные (познание, самоактуализация, самовыражение, самоидентификация) потребности. Приведенная классификация потребностей соответствует известной модели иерархии потребностей А. Маслоу и рассматривает ее укрупненно.

Переменная X_3 характеризует степень обеспеченности ресурсами (финансовыми, энергетическими, интеллектуальными, информационными, материально-техническими и др.), необходимыми для удовлетворения социально-биологических и социально-духовных потребностей. Другими словами, переменная X_3 отражает возможность удовлетворения потребностей исходя из реальных доходов людей, их заработной платы, покупательной способности.

Переменная *Y* характеризует качество жизни человека. Социально-экономическая категория «качество жизни» является интегральным показателем, которая характеризует степень удовлетворения физических, духовных и социальных потребностей людей в обществе, исходя из их ресурсообеспеченности, а также уровень благосостояния и благополучия и служит важным социально-экономическим критерием при выборе направлений и приоритетов экономической и социальной политик государства. В формировании переменной *Y* проявляется эффект синергии. Каждый из факторов качества жизни, как и самого процесса жизни, имеет долю в суммарном процессе, а сама жизнь не может быть явлением разрозненных процессов и явлений, проявляя синергизм совместно взаимодействующих протекающих явлений и процессов на системном уровне.

Коэффициенты обратных связей $a_{10}, a_{20}, a_{30}, a_{40}$ характеризуют положительное (стимулирующее) влияние различных факторов на удовлетворение потребностей, обеспечение ресурсами и качество жизни. Коэффициенты обратных связей $a_{11}, a_{22}, a_{33}, a_{44}$ характеризуют отрицательное (стабилизирующее) влияние различных факторов на удовлетворение потребностей, обеспечение ресурсами и качество жизни. Коэффициенты a_{i0} и a_{ii} (i=1, 2, 3, 4) отражают механизм самоорганизации каждого компонента качества жизни. Коэффициенты обратных связей b_1, b_2, b_3 характеризуют стабилизирующее влияние качества жизни на удовлетворение потребностей и обеспечение ресурсами. Коэффициенты $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$, которые могут быть как положительными, так и отрицательными, характеризуют взаимное влияние между отдельными компонентами качества жизни. Параметры U_{10}, U_{20}, U_{30} отражают вклад человека в формирование желаемых уровней потребностей и обеспеченности ресурсами.

Заключение

Разнообразие точек зрения на понятие качества жизни свидетельствует об актуальности данной проблемы, ее сложности и недостаточной проработанности. Предложенные модели могут использоваться для исследования динамики как отдельных компонентов качества жизни, так и интегрального показателя в целом при изменении условий жизни и действии внешних и внутренних факторов.

Список литературы

[1] Ковынева О.А., Герасимов Б.И. Управление качеством жизни населения: монография. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006, 88 с.

[2] Гизатуллин Х.Н., Биктимирова З.З. Модельные конструкции исследования качества жизни // Журнал экономической теории. 2006. № 1(6). С. 5-26.

[3] Гузаиров М.Б., Ильясов Б.Г., Закиева Е.Ш., Герасимова И.Б. Когнитивная модель формирования показателя качества жизни // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 2(55). С. 215−220.

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ И ОЦЕНКЕ ДОМИНИРУЮЩЕЙ МОТИВАЦИОННОЙ ТЕНДЕНЦИИ ОПЕРАТОРОВ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Г.А. Крыжановский, В.В. Купин

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации»
196210 Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38
kryzhanovskiy_ga@spbguga.ru; kupinv@mail.ru
тел: +7 (812) 704-15-85, +7 (812) 704-15-11, +7 (921) 764-01-56, факс: +7 (812) 704-15-19

Ключевые слова: *модель, ситуация, мотивационная готовность, оператор, экспертная оценка*

Abstract
This paper presents an approach for evaluation of transport system operators' dominant motivation tendency. The approach feature is the possibility to take into account real dynamic situation, job tasks and perform evaluation based on model behavioral indicators of person's concerned motivational readiness.

Введение

Любая деятельность обязательно характеризуется мотивом, смыслом того, на что она направлена. Мотивированность деятельности операторов транспортных систем (ТС) зависит от объективной и субъективной значимости решаемых ими профессиональных задач. Объективная значимость определяется конкретными условиями текущей ситуации на объекте управления (ОУ), субъективная – отношением самого оператора к профессиональной деятельности, профессиональной готовностью оператора. Можно выделить следующие компоненты профессиональной готовности оператора ТС: мотивационный, волевой и профессионально-мыслительный [1, 2].

Мотивационная готовность оператора ТС формируется в ходе профессиональной подготовки и его практической деятельности, определяет результативность его деятельности. Таким образом, знание мотивов профессиональной деятельности, уровня (типа) мотивационной готовности, которую определим как доминирующая мотивационная тенденция (ДМТ), механизмов ее формирования и динамики развития позволит повысить качество профессиональной подготовки операторов ТС.

Оценка ДМТ должна осуществляться в динамике, которую не могут обеспечить, например, способы, основанные на анкетном опросе как непосредственно субъектов наблюдения (операторов, обучаемых), так и субъектов-наблюдателей (экспертов, инструкторов). Кроме того, оценка самих результатов деятельности субъектов оценивания, мало что дает с точки зрения информации о намерениях, целях, мотивах. Поведение человека всегда имеет «полимотивированную» природу, различная поведенческая фактура субъекта может иметь схожую мотивационную направленность. Таким образом, возникает задача разработки адекватных способов оценивания мотивационной направленности – ДМТ в целях оценки деятельности (например, учебно-профессиональной) операторов ТС.

1 Общее определение ДМТ

Имея в виду имеющуюся на сегодняшний день ситуацию терминологической неоднозначности самого понятия мотивации в психологии, необходимо отметить, что нас будет инте-

ресовать выделение и описание «мотивационной» составляющей структуры деятельности активного элемента – оператора.

Часто способность человека к решению реальных задач в данной сфере деятельности в результате мобилизации и актуализации развиваемых в период обучения компетенций определяется как компетентность. Одной из составляющих компетентности можно назвать психологическую готовность человека к профессиональной деятельности, или кратко – профессиональную готовность.

В свою очередь, в структуре профессиональной готовности можно выделить следующие компоненты: мотивационный – отношение к профессиональной деятельности как к общественно значимому делу и стремление совершенствованию знаний, умений и навыков; волевой – умение действовать в соответствии с заданными требованиями; умственный – достижение высокого уровня профессионально-мыслительной способности; коммуникативный – наличие контекстного общения с различными категориями людей.

Важную роль играет мотивационный компонент, связанный с мотивами – внутренними побуждениями к активности в целях удовлетворения определенных потребностей, и с мотивацией, как совокупностью устойчивых мотивов, определяющих содержание и характер деятельности. Именно мотивация является одним из основных факторов, объясняющих поведение и деятельность человека[1-3].

Под целостной и относительно устойчивой системой психологических образований личности, актуализируемых в тех или иных обстоятельствах, регулирующих поведение и деятельность человека, понимают мотивационную готовность. Формирование мотивационной готовности является динамичным процессом, который зависит как от внутренних, так и от внешних условий. В процессе обучения, профессиональной деятельности происходит развитие и трансформация мотивационной структуры субъекта деятельности. Делая акцент на комплексном субъективном преобразовании личностью внутренних и внешних условий и факторов, в том числе социальной и профессиональной среды, в активные побудительные силы, лежащие в основе мышления, поведения, поступков, будем говорить о формировании и трансформации доминирующей мотивационной тенденции.

Подводя итог, определим ДМТ как готовность мобилизовать все имеющиеся в распоряжении внутренние и внешние средства деятельности для достижения максимального результата или сформировать требуемый набор навыков и умений для достижения максимального результата за минимальный промежуток времени.

В [4] приводится следующая модель динамики *r*-й составляющей ДМТ в виде дифференциального уравнения:

$$\frac{dM_r^{(s)}}{dt} = A_s\left[\sum_{i=1}^{n}\omega_i^{(s)}M_r^{(i)} - \omega_s M_r^{(s)}(t_k)\right] + B_s\left[M_r^{*} - M_r^{(s)}(t_k)\right] + D_s\left[M_{rs}^{(\text{И})} - M_r^{(s)}(t_k)\right],$$

где $M_r^{(s)}$ - мотивация *r*-го вида у *s*-го обучаемого; $M_r^{(i)}$ - мотивация *i*-го лица из окружения *s*-го обучаемого $(i \neq s)$; $M_r^{(s)}(t_k)$ - текущее значение мотивации в момент времени t_k периода обучения; M_r^{*} - достижимое эталонное значение мотивации для обучающегося, успешно прошедшего обучение; $M_{rs}^{\text{И}}$ - мотивация инструктора-преподавателя относительно *s*-го обучаемого по *r*-у виду мотивации; A_s, B_s, D_s - коэффициенты, характеризующие значимость влияния окружения, самомотивации, влияния инструктора; $\omega_i^{(s)}, \omega_s$ - коэффициенты влияния *i*-х лиц на *s*-го обучаемого и его самовлияние.

Знание и учет содержания, механизмов формирования и динамики развития составляющих ДМТ, необходимо в целях: повышения качества профессионального обучения операторов ТС, функционирования непрерывной системы профессиональной подготовки и повышения

квалификации соответствующего персонала ТС, обеспечения рациональной расстановки персонала, а также баланса нагрузки в человеко-машинных системах при решении реальных профессиональных задач. Далее описывается подход к экспериментальной оценке текущего уровня ДМТ.

2 Предлагаемый подход к оценке ДМТ

В основе способа лежит следующий подход к описанию мотивационной готовности в структуре профессиональной деятельности. Под профессиональной деятельностью будем понимать формирование и реализацию целенаправленных воздействий на объект такой деятельности. Описание объекта управления (ОУ) может быть дано в форме концептуально-информационной модели.

Компетентность есть актуализация компетенций, как потенциальных способностей, при решении реальных профессиональных задач. Под профессиональной задачей будем здесь понимать целостно-неразрывный логически завершенный структурно-функциональный фрагмент деятельности субъекта управления, включающий действия, контекстно определяемые текущей и целевой ситуацией на объекте управления, а также требованиями к их результату и условиям выполнения. Совокупность всех выделенных профессиональных задач формирует модель деятельности субъекта управления. Предметная область и связанные с ней профессиональные задачи составляют описание проблемной области деятельности.

Требования к условиям выполнения профессиональной задачи содержат к компетенции, профессиональной готовности субъекта управления, его внутренним средствам в терминах инженерной психологии. Совокупность таких требований составляет компетентностную модель субъекта управления [5].

Важной составляющей компетентностной модели субъекта управления являются побуждающие мотивы деятельности, мотивационная готовность – все то, что формирует ДМТ субъекта управления. Выделим эту составляющую как мотивационную модель субъекта управления – активного элемента (АЭ).

Концептуально-информационную модель ОУ, CIM_{OV}, представим как:

(1) $CIM_{\text{ОУ}} = \langle E, A_i, R_E, R_A, PI(E, A_i, R_E, R_A) \rangle$,

где E - множество элементов, A – множества атрибутов (свойств) элементов $(i = \overline{1,|E|})$, R_E – множество отношений на множестве элементов, R_A – множество отношений на множестве атрибутов элементов ($A = \prod_{i=1}^{|E|} A_i$), PI – множество информационных параметров состояния ОУ, доступных для наблюдения. Под состоянием S объекта управления будем понимать $\langle E, A_i^*, R_E^*, R_A^* \rangle$, где A_i^*, R_E^*, R_A^* – фактически присутствующие атрибуты отношения, $A_i^* \subseteq A_i, R_E^* \subseteq R_E, R_A^* \subseteq R_A$.

Исходя из цели управления Z, определяются подмножества целевых атрибутов $A_i^z \subseteq A_i$ и отношений $R_E^z \subseteq R_E, R_A^z \subseteq R_A$, подмножество целевых состояний $S_z = \langle E, A_i^z, R_E^z, R_A^z) \rangle$.

Назовем $SE_{(t_0, \Delta T)} = \langle S_{t_0}, S_{t_0 + \Delta T}, \Omega(\Delta T) \rangle$ ситуацией на ОУ в момент времени t_0, формирующейся на интервале времени $[t_0, t_0 + \Delta T]$, где $\Omega(\Delta T)$ – некоторый закон изменения компонент состояния ОУ на данном интервале (закон развития ситуации). Компоненты ситуации

на ОУ связаны следующим образом: $S_{t_0} \xrightarrow{\Omega(\Delta T)} S_{t_0+\Delta T}$. В случае транспортных систем ситуация на ОУ часто определяется как динамическая транспортная обстановка (ДТО).

Пусть в момент времени t_0 существуют такие элементы $e_i \in E$, что $\overline{A}_i^z \text{ I } A_i^* = A_i^{\Pi} \neq \varnothing$, или $\overline{R}_E^z \text{ I } R_E^* = R_E^{\Pi} \neq \varnothing$, или $\overline{R}_A^z \text{ I } R_A^* = R_A^{\Pi} \neq \varnothing$. Назовем $Pb(S_{t_0}) = \left\langle e_i, A_i^{\Pi}, R_E^{\Pi}, R_A^{\Pi} \right\rangle$ проблематикой состояния ОУ. Тогда проблематика ситуации:

(2) $Pb(SE_{(t_0,\Delta T)}) = \left\langle SE_{(t_0,\Delta T)}, Pb(S_{(t_0,\Delta T)}) \right\rangle$.

Выражение (2) отражает тот факт, что оценка ситуации и ее проблематики осуществляются на основе прогноза состояния $S_{(t_0,\Delta T)}$, т.е. с упреждением.

Принятие решений активным элементом осуществляется на основе концептуальной модели активного элемента – $CM_{\text{АЭ}}$. Она представляет собой систему навыков и представлений («образов») АЭ о реальной и прогнозируемой ДТО, посредством которых он способен генерировать описание целей, объяснять наблюдаемое состояние, предсказывать будущие состояния ДТО [5, 6]. Концептуальная модель определяется и такими субъективными элементами, как побуждающие мотивы деятельности, способность и готовность предвидения последствий развития ситуации и реализации управляющих воздействий, субъективные представления о значимости и структуре событий.

Принятие решений основывается на понимании проблематики $Pb(SE_{(t_0,\Delta T)})$ ситуации, являющейся результатом этапа формирования и поддержки оперативной концептуальной модели АЭ или ситуационной осведомленности активного элемента:

(3) $SA_{\text{АЭ}}^{t_0} = \left\langle CM_{\text{АЭ}}, PI_{\text{АЭ}}^{t_0}, Pb_{\text{АЭ}}^{t_0}(SE_{(t_0,\Delta T)}), \Omega_{A\text{Э}}^{t_0} \right\rangle$,

где $PI_{\text{АЭ}}^{t_0}$ - подмножество информационных параметров состояния S_{t_0}, выделенных и контролируемых АЭ в момент времени t_0, ($PI_{\text{АЭ}}^{t_0} \subseteq PI_{\text{ОУ}}$).

Процесс формирования и поддержания ситуационной осведомленности связан с актуализацией внутренних средств и требует высокого уровня мотивационной готовности. Этап формирования $SA_{\text{АЭ}}^{t_0}$ всегда предшествует собственно этапу принятия решения, и состоит из восприятия, осознания (понимания), прогнозирования развития ситуации $SE_{(t_0,\Delta T)}$. По мотивационным признакам, связанным с формированием ситуационной осведомленности АЭ при наличии той или иной реальной ситуации и ее проблематики, можно судить об общем актуальном уровне ДМТ АЭ.

Для профессиональных задач связанных с формированием $SA_{\text{АЭ}}^{t_0}$ можно определить потребные внутренние средства: уровни и объем знаний, навыков, умений, а также мотивационной готовности. Введем обозначения: $IR_{A\text{Э}} = \left\langle K_{A\text{Э}}, S_{A\text{Э}}, A_{A\text{Э}}, M_{A\text{Э}} \right\rangle$, где $IR_{A\text{Э}}$ – внутренние средства АЭ, $K_{A\text{Э}}, S_{A\text{Э}}, A_{A\text{Э}}, M_{A\text{Э}}$ – соответственно знания, навыки, умения и мотивационная готовность АЭ. Ситуационная осведомленность в конкретной ситуации формируется на основе информационных параметров при помощи внутренних средств АЭ:

(4) $PI(E, A_i, R_E, R_A)\big|_{t_0} \xrightarrow{IR_{\text{АЭ}}} SA_{\text{АЭ}}^{t_0}$.

Можно сказать, что $CM_{АЭ} = F_1(K_{АЭ}, S_{АЭ}, A_{АЭ})$, а $\Omega_{АЭ} = F_2(CM_{АЭ}) = F_2(F_1(K_{АЭ}, S_{АЭ}, A_{АЭ}))$. Предположим, что исследуется определенный интервал времени $(t_0, \Delta T)$, для которого можно допустить, что $K_{АЭ}, S_{АЭ}, A_{АЭ} = const$. Распишем составляющие (4) с учетом (1)-(3):

$$PI(SE_{(t_0,\Delta T)}) \xrightarrow{C_1, M_{АЭ}^{t_0}} (C_2, PI_{АЭ}^{t_0}, Pb_{АЭ}^{t_0}(SE_{(t_0,\Delta T)})),$$

где $C_1, C_2 = const$ на $(t_0, \Delta T)$.

Исходя из (4), по значениям переменных левой и правой частей выражения можно судить об уровне мотивационной готовности $M_{АЭ}^{t_0}$:

(5) $$M_{АЭ}^{t_0} = \Psi(PI(SE_{(t_0,\Delta T)}), PI_{АЭ}^{t_0}, Pb_{АЭ}^{t_0}(SE_{(t_0,\Delta T)})).$$

Выражение (5) есть экспликация ситуационно-мотивационной готовности АЭ, определяемой как готовность к формированию и поддержке ситуационной осведомленности.

3 Оценка ДМТ с использованием тренажерного комплекса

При решении задач инженерно-психологического проектирования известен подход использования, так называемых, идеализированных моделей деятельности, к которым стремится оператор в процессе самообучения [5]. Такая модель деятельности может быть заменена в определенном смысле адекватной ей объективной схемой, оптимальной в отношении полноты оперативных единиц деятельности и упорядоченности связей между ними. Такие объективные схемы выполняют функцию теоретических моделей деятельности.

Такой подход был использован для построения экспертной модели ситуационной осведомленности $MSA_{АЭ}^{t_0}$ для исследуемой ситуации $SE_{(t_0,\Delta T)}^{*}$ в целях оценки ситуационно-мотивационной готовности. Эта модель представляет собой, в определенном смысле, эталонную мотивационную готовность, которую эксперт-инструктор определяет как результат научения АЭ решению конкретных профессиональных задач.

Для выбранного класса моделируемых на диспетчерском тренажере ситуаций $SE_{(t_0,\Delta T)}^{М}$, связанных с задачей формирования последовательности прибывающих воздушных судов в районе аэродрома, были построены частные экспертные модели ситуационной мотивационной готовности MSA_i^{SE} ($i = \overline{1, N_{ex}}$, N_{ex} – количество экспертов-инструкторов). На основе применения онтологического подхода [7] удалось выделить и визуализировать общие представления экспертов о $MPI_{АЭ}^{SE}$, $MPb_{АЭ}^{SE}(SE_{(t_0,\Delta T)}^{M})$ и построить групповую модель MSA^{SE}.

С использованием техники репертуарных решеток [8, 9] далее были выявлены конструкты, на основе которых сформировано экспертное семантическое пространство восприятия поведенческих индикаторов компонент эталонной ситуационной осведомленности $MPI_{АЭ}^{t_0}$ и $MPb_{АЭ}^{t_0}(SE_{(t_0,\Delta T)}^{M})$ в конкретных моделируемых ситуациях $SE_{(t_0,\Delta T)}^{M}$.

На следующем этапе в группе из 63 студентов, обучающихся по специальности «Аэронавигационное обслуживание и использование воздушного пространства» специализации «Управление воздушным движением» экспертами-инструкторами была проведена экспертная оценка ситуационной мотивационной готовности по поведенческим индикаторам компонент фактической ситуационной осведомленности $PI_{АЭ}^{SE}, Pb_{АЭ}^{SE}(MSE_{(t_0,\Delta T)})$ согласно (5):

$$M_{АЭ}^{SE} = \Psi_1(PI(SE_{(t_0,\Delta T)}^{M}), PI_{АЭ}^{SE}, Pb_{АЭ}^{SE}(SE_{(t_0,\Delta T)}^{M})),$$

где Ψ_1 – процедура экспертной оценки.

Эта же группа студентов далее была оценена другими экспертами-инструкторами по критерию $K_M = \Psi_2(\Delta(MPI_{\text{АЭ}}^{t_0}, PI_{\text{АЭ}}^{t_0}); \Delta(MPb_{\text{АЭ}}^{t_0}(SE_{(t_0,\Delta T)}^{M}), Pb_{\text{АЭ}}^{t_0}(SE_{(t_0,\Delta T)}^{M}))$, где Δ - мера сходства модельных и наблюдаемых состояний оцениваемых АЭ.

Процедура нечеткого кластер - анализа позволила выявить три класса состояний: $M_{K_M}^{I}$ - «близкое к модельному», $M_{K_M}^{II}$ - «отличающееся от модельного», $M_{K_M}^{III}$ - «значительно отличающееся от модельного».

Далее по имеющейся выборке поведенческих признаков (индикаторов) и выделенным классам $M_{K_M}^{(I,II,III)}$ был реализован алгоритм нейро-нечеткой классификации уровня ситуационной мотивационной готовности АЭ [10, 11]. Сравнение результатов оценки ДМТ предложенным способом и полученных при помощи традиционных методов на основе анкетирования свидетельствует о высокой степени их согласованности.

Заключение

Развитие и применение предложенного способа определения ДМТ, основанного на использовании экспертной модели мотивационной готовности, может подразумевать следующие направления:

- разработка инструментальных способов оценки ДМТ на тренажере;
- разработка способов контроля когнитивных состояний операторов ТС в условиях решения реальных профессиональных задач [12];
- психометрические и практико-ориентированные экспериментальные исследования в целях создания и развития теории формирования ДМТ (с учетом и на основе ране полученных результатов [13-14 и др.]);
- создание адаптивных интеллектуальных человеко-машинных систем управления движением транспорта.

Список литературы

[1] Платонов К.К. Занимательная психология / К.К.Платонов. – М.: Молодая гвардия, 1964. – 380 с.

[2] Ломов Б.Ф. Человек и техника. Очерки инженерной психологии / Б.Ф.Ломов. – М.: Советское радио, 1966 – 464 с.

[3] Хекхаузен Х. Мотивация и деятельность / Х.Хекхаузен. — 2-е изд. — СПб.: Питер; М.: Смысл, 2003. — 860 с

[4] Крыжановский Г.А., Купин В.В. Формирование профессионально-мыслительной способности специалистов ИАТС и динамика их мотивации в процессе первоначальной профессиональной подготовки / Г.А.Крыжановский, В.В.Купин // Проблемы летной эксплуатации и безопасность полетов: Межвуз. темат. сб. науч. тр. Вып. V / Под ред. М.Ю.Смурова. / СПбГУ ГА, С.-Петербург, 2011. – С. 183-195.

[5] Галактионов А.И. Основы инженерно-психологического проектирования АСУ ТП. – М.: Энергия, 1978. – 208 с.

[6] Integrated Task and Job Analysis of Air Traffic Controllers Phase 1. Development of Methods. / EATCHIP HUM.ET1.ST01.1000-REP-03. –, Edition 1.0, 1998.

[7] Смирнов С.В. Онтологическое моделирование в ситуационном управлении / С.В.Смирнов // Онтология проектирования. – 2012. - № 2. – С.16-24.

[8] Петренко В.И. Введение в экспериментальную психосемантику / В.И.Петренко. – М.: 1983.

[9] Общая психодиагностика / Под ред. А.А.Бодалева, В.В.Столина. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987.

[10] Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети / В.В.Борисов, В.В.Круглов, А.С.Федулов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 284 с.

[11] Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В.Леоненков. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005. - 736 с.
[12] Крыжановский Г.А., Купин В.В. Теоретико-возможностная идентификация доминирующей мотивации диспетчера в целях прогноза действий по управлению воздушным движением / Г.А.Крыжановский, В.В.Купин // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XIV Междунар. конф. 19-22 июня 2012 / Под ред.: Е.А.Федосова, Н.А.Кузнецова, В.А.Виттиха. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. – С. 746-752.
[13] Иванников В.А. К сущности волевого поведения / В.А.Иванников // Психологический журнал – 1985. – т. 6, № 3. – С. 47-55.
[14] Патяева Е.Ю. Ситуативное развитие и уровни мотивации / Е.Ю.Патяева // Вестник МГУ. Психология. – 1983. - № 4. - С. 23-33.

КОММУНИКАЦИЯ И ЦЕЛЕПОЛАГАНИЕ: ПРИНЦИП AEQUITAS HERMENEUTICA

А.Ю.Нестеров

Самарский государственный аэрокосмический университет имени ак. С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)
Московское шоссе, 34, Самара, 443086 Россия
http://philosophy.ssau.ru/
phil@ssau.ru
тел. +7 (846) 2674565

Ключевые слова: *коммуникация, целеполагание, прагматика, принцип доверия*

Abstract
The paper considers the principle «aequitas hermeneutica» in communication.

Коммуникация есть обмен знаками, интерпретируемыми участниками коммуникации сообразно принятой ими рациональности и уровню осведомлённости. Форма осуществления коммуникации – язык, обычно понимаемый в качестве системы правил или кодов семантического, синтаксического и прагматического уровней, обладающих для субъекта статусом естественного (известного, не нуждающегося в переводе) или чуждого кода. Как правило, коммуникативный «обмен» осуществляется на синтаксическом уровне, интерпретанты и значения не коммуницируются прямо, подлежа принципу привилегированного доступа.

Вопрос о целеполагании в коммуникативных актах является частью программы анализа прагматического измерения семиозиса, в терминах общей семиотики заданной работами Ч.С.Пирса и Ч.У.Морриса. В феноменологии обсуждение этого вопроса начинается с работ Р.Ингардена по эстетике, в аналитической философии – с работ Д.Остина. Наиболее разработанным он выглядит в теории литературы, начиная с Б.Кристиансена, работ русского формализма и вплоть до модели В.Изера, претендующей на синтез подходов аналитического, феноменологического и общесемиотического характера. В истории герменевтики он ставится, начиная с Августина, базовые формулировки восходят к «общей герменевтике» XVIII в., во многом к работам Ф.Майера.

Под целью обычно понимается инобытие системы, некоторый отсутствующий пока в системе (новый) способ структурирования многого в отношении к единому, к идее. Применительно к акту коммуникации история филологии и философии предлагает как минимум два типа целей: первый определяет позицию субъекта как отправителя или получателя сообщения на уровне условия возможности коммуникации, второй определяет воздействие коммуникативного акта. В первом случае говорят о принципе герменевтической доверительности в рецептивной и проективной интерпретациях; во втором – о различии модальностей, о принципиальном несовпадении дескриптивных и перформативных коммуникативных актов. В представляемых рассуждениях ставится вопрос о прагматических предпосылках автокоммуникации в рамках анализа принципа доверия.

Принцип aequitas hermeneutica (принцип доверия или герменевтической доверительности) является одним из традиционных принципов экстерналистской интерпретации. Его исходные онтологические формулировки легко извлечь как из Адвайты Веданты (например, в «Йоге Васиштхи»), так и из символа пещеры Платона; в качестве требования к интерпретации текста он появляется в христианской традиции у Августина («верь, чтобы понимать»), выступая, например, у Ансельма основанием онтологического доказательства и тем самым – реалистской модели познания. Первое определение этого принципа представлено у Ф.Майера:

«Герменевтическая доверительность (aequitas hermeneutica) есть стремление толкователя считать те значения герменевтически истинными, которые наиболее соответствуют совершенствам автора знаков, пока не раскроется обратное» [11. §39f. S.17]. В технической герменевтике история этого принципа представлена сначала в виде требования понять автора так же хорошо, как он сам себя понимал (у Х.Вольфа), затем лучше, нежели он сам себя понимал (у Ф.Шляйермахера), а затем тезисом о том, что автора вообще нельзя понять, не понимая его каждый раз иначе (у Г.-Г.Гадамера). Будучи заново открытым в аналитической философии Н.Уилсоном, он широко обсуждался вот второй половине XX в.; современное определение таково: «Интерпретатор конвенционального знака должен считать истинной ту интерпретацию, которая наиболее соответствует предпосылке «совершенства» знака, настолько долго, насколько это будет возможно» [10. S.72].

Легко увидеть, что принцип герменевтической доверительности есть требование к реципиенту (толкователю, интерпретатору, слушателю, зрителю и т.д.) сообщения, реализация которого обеспечивает возможность коммуникации в виде наличия значений, соотнесённых с синтаксическими смыслами языка. В общем случае это требование «стремиться понять» (как заметил Гадамер: «кто стремится понять текст, тот готов позволить ему сначала что-то себе сказать» [9. S.273]), проективным эквивалентом которого является требование «ясности выражения» к отправителю сообщения. Прагматически здесь реализованы две интерпретанты: одна позволяет выделить коммуникативный знак как таковой на незнаковом фоне, вторая позволяет знаку быть соотнесённым с некоторым отрезком индивидуального опыта участника коммуникации.

Коммуникация успешна, если коды, используемые её субъектами, тождественны не только в синтаксическом, но и в прагматическом измерении семиозиса. Выражение и сумма навыков, обеспечивающих его возможность, – это то, что у коммуникантов должно в той или иной мере совпасть, чтобы через коммуникативный знак была задана та или иная действительность. Это рассуждение очевидно для случаев межсубъектной коммуникации, однако оно приобретает нетривиальный характер для автокоммуникации, то есть для тех случаев, когда отправитель и получатель сообщение – это один и тот же человек, а канал коммуникации включает в себя время (Ю.М. Лотман). Бытовая автокоммуникация – это дневниковые записи, заметки, этот уровень хорошо изучен литературоведами и психологами. Однако с феноменами отнюдь не бытовой автокоммуникации человек сталкивается в вопросах идеологии, мировоззрения, целеполагания, планирования будущего.

Философия языка начала XX в. показала с достаточной убедительностью, что мыслительные процессы вне синтаксиса языка не осуществимы, а если и осуществимы, то чрезвычайно громоздки (Фреге, Рассел, Виттгенштейн, Уорф), так что в пределе «человек становится разумным благодаря языку» и, соответственно, его рассудок может быть определён в терминах синтаксиса этого языка. Осознаваемые и неосознаваемые акты рефлексии необходимо опосредуются комбинацией синтаксических ресурсов тех языков, которыми владеет субъект рефлексии. Автокоммуникация поддерживает и закрепляет рассудочные структуры индивида за счёт экстериоризации синтаксиса. Поскольку язык синтаксисом не исчерпывается, постольку и автокоммуникация закрепляет не столько грамматические правила, сколько используемые рассудком и разумом интерпретанты и семантические правила.

Отметим, что с позиций общей семиотики сфера семиозиса включает не только естественные или искусственные языки, но процесс познания в целом, так что не только коммуницируемые через синтаксис рассудочные механизмы носят знаковый характер, но в том числе и прямо не коммуницируемые механизмы чувственного восприятия и рефлексии. Принцип доверия, если его формулировать для чувственного восприятия – это навык использования органов восприятия для фиксации тех или иных образов, называемых «существующей действительностью», «фактом» и т.п. Принцип доверия, сформулированный для рефлексии, подразумевает навык использования некоторых рассудочных механизмов или терминов узко опреде-

лённого языка (в качестве интерсубъективного средства коммуникации) для фиксации той или иной модели, тех или иных оснований (как правило, фиксируется сам механизм рефлексии в разнородных терминологических средах). Собственно автокоммуникация представляет интерес именно в свете ответа на вопрос, как именно задаются прагматические предпосылки в реализации принципа доверия в актах индивидуальной рефлексии.

Последняя необходимая оговорка общего характера связана с тем, что естественный язык (понимаемый только в качестве средства коммуникации) для индивида является изначально чуждым кодом (человек не рождается с грамматикой какого-то конкретного естественного языка), который каким-то образом превращается в процессе обучения в раннем детстве в систему естественных кодов, на фоне и в субстрате которой осуществляется интеллектуальное развитие человека. Каждый из нас прибегает к экзосоматической языковой системе, чтобы быть разумным. Прагматика естественного языка, отображаемая в принципе доверия, показывает, что «рассудочность» человека есть вопрос достигаемого за счёт обучения интесубъективного соглашения – это тезис конструктивизма, – где вполне закономерно поставить два существенных вопроса.

Первый вопрос основан на изоморфизме семиотических процессов и механизмов на всех уровнях, вычленяемых историей философии и науки в акте познания (кратко семиотический изоморфизм формулируется в виде тезиса: значением знака может выступать только знак другого уровня). Если прагматика коммуникативных процессов, устанавливающая правило употребления, есть результат обучения, то прагматика акта восприятия, отображаемая в биологически заданном принципе доверия, также может быть подвергнута обучению, может быть трансформирована и развита. Развитие техники (где под техникой понимается экзосоматическое проективное осуществление рассудочных и воспринимающих механизмов) пока осуществляется на основании принципа аналогии, неосознанном копировании интерпретант, присущих восприятию человека. Внимательный же анализ прагматического измерения семиозиса для процессов чувственного восприятия должен обеспечить возможность радикально иных навыков фиксации среды (понятно, что пока без возможности столь же радикально изменить способы рассудочной обработки этой фиксации), сопоставимых с появлением тех или иных органов восприятия в процессе эволюции.

Второй вопрос, исторически (Маркс, Адорно, Маркузе) формулируемый в терминах анализа мировоззрения, это вопрос об экзосоматических или социальных системах, кодифицирующих индивидуальные рефлексивные акты. Это вопрос об индивидуальном на фоне социального или о личности человека за пределами социальных кодов, формулируемый в терминах общей семиотики в виде программы анализа систем прагматических кодов чувственного восприятия, рассудка и разума с целью выявления сущности человека. Это фундаментальная философская проблема, формулируемая как требование «выйти из семиозиса» и подразумевающая масштабный анализ автокоммуникативных актов бытового, религиозного, научного и идеологического характера.

Нет парадокса в том, что онтологические модели абсолютного идеализма и материализма в равной мере рассматривают человека в виде взаимодействия суммы иерархически упорядоченных кодов, реализованных в различных субстратах, равно как и нет его в требовании эволюционного развития, выдвигаемом обеими фундаментальными доктринами. Семиотический анализ показывает, что подлинный парадокс заключается в систематическом отказе коммуникативного сообщества учитывать научные и мировоззренческие ресурсы, открывающиеся при анализе прагматического измерения семиозиса.

Принцип доверия показывает, что содержательно человек в актах как познания, так и самопознания обусловлен внешними кодами. Это тезис, сближающий традиционные религии Востока, идеалистическую философию Западной Европы дохристианского и христианского толка и современную семиотику. Воздействовать на эту систему кодов с позиций семантического или даже синтаксического правила не представляется возможным, поскольку вовлече-

ние в неё индивида осуществляется прагматически, на уровнях условий возможности познания, коммуникации и самопознания.

Насущная задача анализа прагматических кодов, уточнение его методов исторически и сейчас носит трансгуманистический или, другими словами, реалистский характер. Как в техническом, так и в мировоззренческом планах человек нуждается в новой (внечеловеческой) модели целого, в создании такой моделью среды, на фоне и в субстрате которой было бы возможно расширение технических границ познаваемого и за счёт этого – содержательных границ самопонимания.

Список литературы

[1] Дубровский, Д.И. Проблема идеального. Субъективная реальность. М., 2002.
[2] Дубровский, Д.И. Сознание, мозг, искусственный интеллект: сб. статей. М. 2007.
[3] Ицков, Д.И. Футуризм, космизм и русская экспансия http://vz.ru/opinions/2012/10/9/601701.html
[4] Манифест стратегического общественного движения «Россия 2045» http://2045.ru/manifest/
[5] Лотман, Ю.М. Внутри мыслящих миров. Человек – текст – семиосфера – история. М., 1999.
[6] Нестеров, А.Ю. Интерпретация, её стратегии и проблема недостаточной определённости значения // Вестник Томского государственного университета. Философия. Социология. Политология. Томск, 2011. №4 (16). С.38-45.
[7] Нестеров, А.Ю. Проблема и понятие знака в эпистемологии и теории коммуникации // Философия науки. 2008. 1(36). С. 3-17.
[8] Нестеров, А.Ю. Семиотическая схема познания и коммуникации. Самара, 2008.
[9] Gadamer, H.-G. Wahrheit und Methode. Tübingen, 1990.
[10] Künne, W. Verstehen und Sinn. Eine sprachanalytische Betrachtung // Bühler A. (Hrsg.) Hermeneutik. Heidelberg, 2003.
[11] Meier, G.F. Versuch einer allgemeinen Auslegungskunst. Hamburg, 1996.

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ОБУЧЕНИЯ

О.В. Павлов

Самарский государственный аэрокосмический университет
(национальный исследовательский университет)
443086, Самара, Московское шоссе, 34, Россия
pavlov@ssau.ru
тел: +7 (846) 335-64-07, факс: +7 (846) 335-64-07

Ключевые слова: *эффект обучения на производстве, динамическая оптимизация, оптимальные объёмы производства, динамическое программирование Беллмана*

Abstract
In article dynamic problems of planning of outputs taking into account learning by doing effect are considered. Considered tasks are formalized as a problem of optimum control by discrete system. Numerical solutions of the formulated tasks by means of a method of Bellman dynamic programming are received. Research of influence of parameters on optimum solutions of tasks is conducted.

Введение

Рассматриваются задачи планирования производства в длительном периоде с учетом эффекта обучения. Эффект обучения заключается в том, что при увеличении кумулятивного (суммарного) выпуска продукции фирмой происходит динамическое снижение удельных затрат [1],[2]. Под кумулятивным объёмом производства понимается количество изделий, изготовленных с начала производства продукции.

Снижение удельных затрат при увеличении суммарного объёма производства делает актуальными постановки задач динамической оптимизации объёмов производства. Постановки динамических задач сформулированы автором в [3]-[4].

1 Постановка динамических задач планирования производства с учетом эффекта обучения

Динамика производственного процесса промышленного предприятия описывается дискретным уравнением:

(1) $x_t = x_{t-1} + u_t, \ \ t = \overline{1,n}$,

где x_t – суммарный объём производства за *t-ый* временной период, t – номер временного периода, u_t – объём производства в периоде t, n – число периодов производственной деятельности предприятия.

В начальный период известно количество продукции уже произведенное предприятием:

(2) $x_0 = X_0$.

В конечный период суммарный объём произведенной продукции должен быть равен заданному:

(3) $x_n = X_0 + R$,

где R – заданное количество продукции.

На объём производства в каждом периоде t наложены следующие ограничения:

(4) $Q^{\min} \le u_t \le Q^{\max}$, $t = 1, n$,

где Q^{min} – минимальный объём производства с учётом технологических и логистических требований, Q^{max} – максимальная производственная мощность оборудования фирмы.

Затраты в периоде t определяются как произведение удельных затрат продукции c_t и объёма производства в этом периоде u_t:

(5) $C_t = c_t u_t$.

Динамика изменения удельных затрат продукции от суммарного объёма производства описывается степенной зависимостью [1]:

(6) $c_t = a x_{t-1}^{-\gamma}$

где a – затраты на производство первого изделия, γ – скорость обучения.

Кривая, построенная на основе формулы (6) называется кривой обучения.

Подставляя выражение (6) в формулу (5), получим затраты предприятия на шаге t:

$C_t = a x_{t-1}{}^{-\gamma} u_t$.

Эффект обучения, выражающийся в динамическом снижении удельных затрат вследствие увеличения суммарного объёма производства (6) приводит к постановке динамических задач планирования.

Сформулируем динамические задачи планирования производства с учётом эффекта обучения.

Задача о минимизации затрат.

Критерием принятия управленческого решения является минимизация дисконтированных суммарных затрат предприятия:

(7) $J = \sum_{t=1}^{n} \frac{a x_{t-1}{}^{-\gamma} u_t}{(1+r)^t} \to \mathbf{min}$,

где r – ставка дисконтирования.

Задача заключается в поиске оптимального управления $u_t^{opt}, t = 1, n$ удовлетворяющего ограничению (4), которое осуществляет перевод производственного процесса (1) из начального состояния (2) в конечное состояние (3) и минимизирует суммарные затраты проекта (7).

Задача о максимизации прибыли.

Для предприятия-монополиста возможна постановка задачи о максимизации дисконтированной суммарной прибыли:

(8) $\pi = \sum_{t=1}^{n} \frac{p_{t-1} u_t - a x_{t-1}^{-\gamma} u_t}{(1+r)^t}$.

Цена продукции зависит от объёма производства в соответствии с законом спроса и предложения:

(9) $p_{t-1} = b - d x_{t-1}$,

Где b, d – параметры кривой спроса и предложения.

Подставляя (9) в (8) получим выражение для целевой функции:

(10) $J = \sum_{t=1}^{n} \frac{(b - d x_{t-1}) u_t - a x_{t-1}^{-\gamma} u_t}{(1+r)^t}$.

Задача заключается в поиске оптимального управления $u_t^{opt}, t = 1, n$ удовлетворяющего ограничению (4), которое осуществляет перевод производственного процесса (1) из начально-

го состояния (2) в конечное состояние (3) и максимизирует суммарную дисконтированную прибыль предприятия (10). В данной задаче под *R* в ограничении (4) понимается суммарный спрос на продукцию.

Задача о максимизации суммарного объёма производства.

В качестве целевой функции центра рассматривается максимизация суммарного объёма производства за время осуществления проекта:

(11) $J = x_n \to \mathbf{max}$.

Суммарные затраты организации, реализующей проект ограничены имеющимся финансовым ресурсом *F:*

(12) $\sum_{t=1}^{n} \frac{a x_{t-1}^{-\gamma} u_t}{(1+r)^t} \le F$.

Задача заключается в поиске оптимального управления $u_t^{opt}, t = 1,n$ удовлетворяющего ограничению (4), которое осуществляет перевод производственного процесса (1) из начального состояния (2) с выполнением ограничения на финансовый ресурс (12) и максимизирует суммарный объём производства в конечном периоде (11).

Задача о быстродействии.

Критерием принятия решения фирмой является минимизация количества периодов реализации проекта:

(13) $J = n \to \mathbf{min}$.

Задача заключается в поиске оптимального управления $u_t^{opt}, t = 1,n$ в соответствии с ограничением (4), которое осуществляет перевод производственного процесса (1) из начального состояния (2) в конечное состояние (3) с выполнением ограничения на финансовый ресурс (12) и минимизирует количество временных периодов (11).

Сформулированные задачи являются задачами оптимального управления. Для решения задач применяется метод динамического программирования Беллмана [5],[6].

2 Решение динамической задачи минимизации затрат с учетом эффекта обучения

Для решения задачи использовались следующие данные: заданный суммарный объём производства детали «Кассета» *R*=400 деталей, количество временных периодов *n*=12, объём произведенной продукции в начальный период $x_0 = 1$ шт., минимальный объём производства $Q^{\mathbf{min}}$=10 деталей, максимальная производственная мощность оборудования $Q^{\mathbf{max}}$=50 деталей. С учетом применяемости детали в готовом изделии объём производства в каждый период должен быть кратен 10.

Математическая модель динамической задачи минимизации затрат при производстве детали «Кассета» имеет вид:

$$\begin{cases} x_t = x_{t-1} + u_t, t = 1,n, \\ x_0 = X_0, \\ x_n = X_0 + R, \\ Q^{\mathbf{min}} \le u_t \le Q^{\mathbf{max}}, \ t = 1,n, \\ J = \sum_{t=1}^{n} \frac{42{,}64 x_t^{-0{,}29} u_t}{(1+r)^t} \to \mathbf{min}. \end{cases}$$

Для решения задачи применялся метод динамического программирования Беллмана. На рисунке 1 представлено влияние скорости обучения γ на оптимальные траектории суммарного

объёма производства при постоянной ставке дисконтирования r=0 в задаче минимизации затрат.

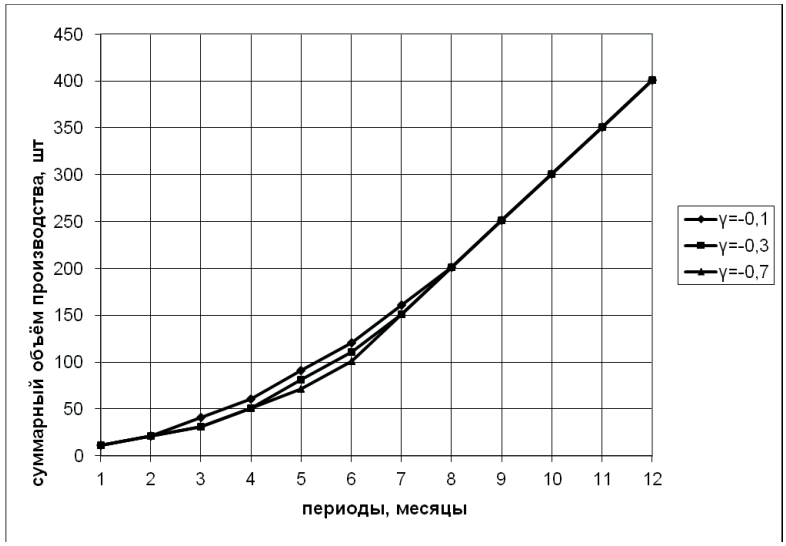


Рисунок 1 - Влияние скорости обучения на оптимальные траектории суммарного объёма производства

Из анализа рисунка 1 можно сделать вывод, что оптимальной стратегией является постепенное увеличение объёмов производства от минимально возможного до максимального. С увеличением скорости обучения γ оптимальная траектория суммарного объёма производства становится более «выпуклой».

В работе также было проведено исследование влияния параметра a (затрат на производство первой детали) на оптимальную траекторию суммарного объёма производства. Исследования показали, что затраты на производство первой детали не влияют на оптимальную траекторию суммарного объёма производства.

На рисунке 2 представлено влияние ставки дисконтирования на оптимальные траектории суммарного объёма производства при постоянной скорости обучения γ=-0,3 в задаче минимизации затрат.

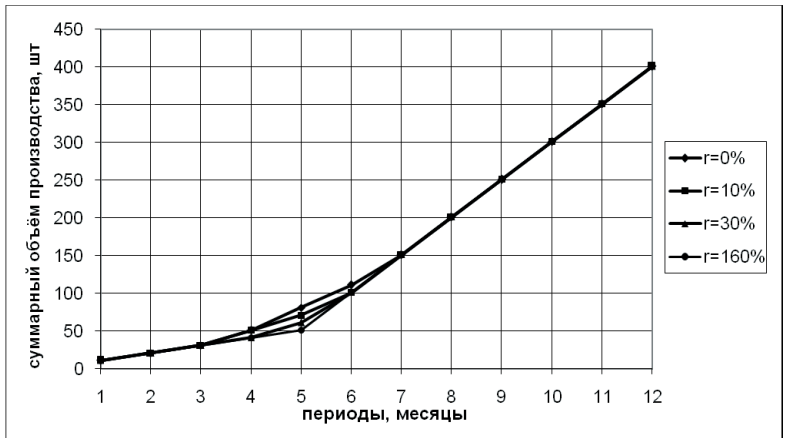


Рисунок 2 - Влияние ставки дисконтирования на оптимальные траектории суммарного объёма производства детали «Кассета»

Из анализа рисунка 2 можно сделать вывод, что с увеличением ставки дисконтирования оптимальная траектория суммарного объёма производства становится более «выпуклой». При больших значениях ставки дисконтирования ($r \geq 160\%$) оптимальное управление становится релейным, в начальных периодах объёмы производства - минимальные, в конечных периодах - максимальные.

3 Решение динамической задачи максимизации прибыли с учетом эффекта обучения

Для решения задачи использовались следующие данные: суммарный спрос на продукцию R=400 шт., количество временных периодов n=12, объём произведенной продукции в начальный период $x_0 = 1$ шт., минимальный объём производства $Q^{\min}$ =10 изделий, максимальная производственная мощность оборудования $Q^{\max}$ =50 изделий. С учетом условий поставок объём производства в каждый период должен быть кратен 10.

Математическая модель динамической задачи максимизации прибыли имеет вид:

$$\begin{cases} x_t = x_{t-1} + u_t,\ t = 1, n, \\ x_0 = X_0, \\ x_n = X_0 + R, \\ Q^{\min} \le u_t \le Q^{\max},\ t = 1, n, \\ J = \sum_{t=1}^{n} \dfrac{(10000 - 2x_{t-1})u_t - 4010{,}3x_{t-1}^{-0{,}29}u_t}{(1+r)^t} \to \max. \end{cases}$$

На рисунке 3 представлено влияние скорости обучения γ на оптимальные траектории производства продукции при постоянной ставке дисконтирования r=0 в задаче максимизации прибыли.

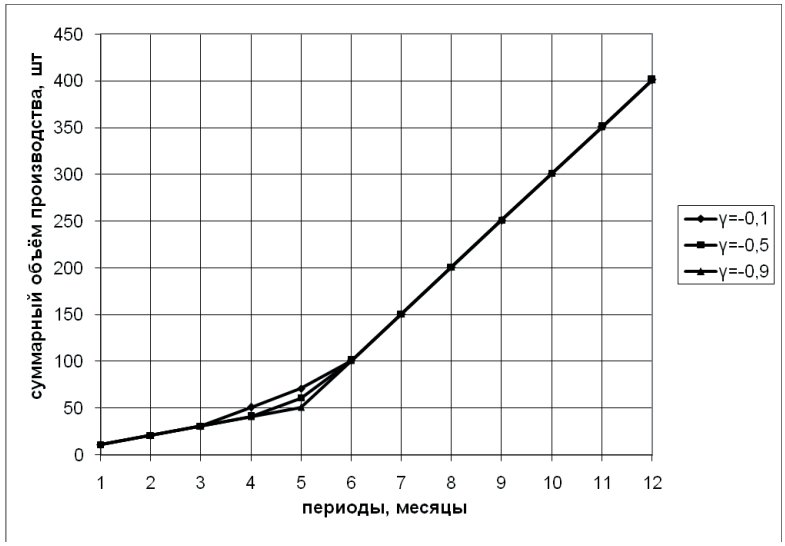


Рисунок 3 – Влияние скорости обучения на оптимальные траектории суммарного объёма производства продукции

Оптимальной стратегией является постепенное увеличение объёмов производства от минимальных в начальных периодах до максимальных в конечных периодах. С увеличением скорости обучения γ оптимальная траектория суммарного объёма производства становится более «выпуклой».

На рисунке 4 представлено влияние ставки дисконтирования на оптимальные траектории суммарного объёма производства продукции при постоянной скорости обучения γ=-0,3 в задаче максимизации прибыли.

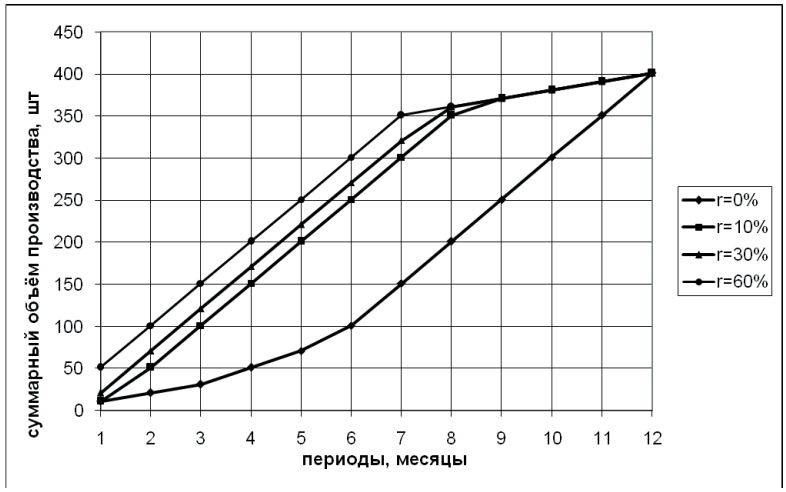


Рисунок 4 – Влияние ставки дисконтирования на оптимальные траектории суммарного объёма производства продукции

Анализируя рисунок 4 приходим к выводу, что влияние ставки дисконтирования в задаче максимизации прибыли приводит к существенному изменению оптимальных траекторий суммарных объёмов производства. Чем больше ставка дисконтирования, тем большие объёмы производства приходятся на начальные периоды и тем меньшие на конечные. При больших значениях ставки дисконтирования ($r \geq 60\%$) оптимальное управление становится релейным, в начальных периодах объёмы производства - максимальные, в конечных периодах - минимальные.

Заключение

В настоящей работе сформулированы динамические задачи планирования производства фирмы с учётом эффекта обучения. Рассматриваемые задачи формализованы как задачи оптимального управления дискретной системой. Для решения задач применялся метод динамического программирования Беллмана.

Проведено исследование влияния различных параметров на оптимальные решения для задач минимизации затрат и максимизации прибыли.

Исследование задачи минимизации затрат позволило сделать следующие выводы:

1) Оптимальной стратегией является постепенное увеличение объёмов производства от минимальных в начальных периодах до максимальных в конечных периодах.
2) С увеличением скорости обучения γ оптимальная траектория суммарного объёма производства становится более «выпуклой».
3) Затраты на производство первой детали a не влияют на оптимальную траекторию суммарного объёма производства.

4) С увеличением ставки дисконтирования оптимальная траектория суммарного объёма производства становится более «выпуклой». При больших значениях ставки дисконтирования оптимальное управление становится релейным, в начальных периодах объёмы производства - минимальные, в конечных периодах - максимальные.

В результате исследования задачи максимизации прибыли сделаны следующие выводы:

5) Оптимальной стратегией является постепенное увеличение объёмов производства от минимальных в начальных периодах до максимальных в конечных периодах.
6) С увеличением скорости обучения γ оптимальная траектория суммарного объёма производства становится более «выпуклой».
7) Влияние ставки дисконтирования существенно изменяет оптимальные траектории суммарных объёмов производства. Чем больше ставка дисконтирования, тем большие объёмы производства приходятся на начальные периоды и тем меньшие на конечные. При больших значениях ставки дисконтирования оптимальное управление становится релейным, в начальных периодах объёмы производства - максимальные, в конечных периодах - минимальные.

Список литературы

[1] Wright T.P. Factors affecting the cost of airplanes // Journal of the aeronautical sciences. 1936. Vol. 3. № 4. P.122-128.

[2] Новиков, Д.А. Модели обучения в процессе работы // Управление большими системами. 1997. № 19. С. 5-22.

[3] Павлов О.В. Динамические задачи планирования в управлении проектами // Сборник материалов конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах». СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012. с. 1055-1058.

[4] Павлов О.В. Динамические модели управления проектами // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV международной конференции (25-28 июня 2013 г., Самара, Россия). – Самара: Самарский НЦ РАН, 2013. - С. 173-178.

[5] Беллман Р. Динамическое программирование. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960.

[6] Калихман И.Л., Войтенко М.А. Динамическое программирование в примерах и задачах. – М.: Высш. школа, 1979.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ АВТОНОМНОГО ПЛАНЕТНОГО ПОСЕЛЕНИЯ (АПП) КАК СЛОЖНОЙ ТРАНСФОРМИРУЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ

А.Р. Сабилов[1], Е.Н. Тарчинская[2]

[1]Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
420111, Казань, ул. К. Маркса, 10, Россия
ump@ump.kstu-kai.ru
тел: +7 (843) 236-62-83

[2]Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20
kat-rif@inbox.ru

Ключевые слова: *Автономные планетные поселения, АПП, управление инфраструктурой АПП, системы управления*

Abstract

This report contains a description of autonomous planetary settlements' type unit's general and mathematical model. The possibility of model's application in an effort to improve settlement's autonomy level is reflected in the report.

Algorithm for adding new autonomous planetary settlement's unit provides necessary tool for analyzing the admissibility of the unit's application within the settlement.

Введение

Человечество уже давно рассматривает возможности существования в замкнутых поселениях, полностью или частично ограниченных от других. В этом одни видят технологический прогресс, освоение других планет, а для других это форма защиты от возникающих в мире катаклизмов, угрожающих всему человечеству.

Автономные планетные поселения (АПП) [1-3] представляют собой сложные системы, постоянно изменяющиеся во времени и требующие оперативного управления всеми составляющими ее элементами. В поселениях протекают множество процессов, направленных на обеспечение существования и развития поселения, в том числе обеспечение населения всеми необходимыми благами. Практически во всех процессах, направленных на создание какого-либо блага, существует необходимость применения инфраструктурных элементов, совокупность которых, в пределах поселения, называют хозяйственной инфраструктурой планетного поселения.

Управление поддержанием и развитием инфраструктуры представляет собой одну из основных граней успешно существующего и развивающегося планетного поселения. Доклад посвящен разработке математических моделей системного, взаимоувязанного развития инфраструктуры АПП. Работа выполняется в рамках исследований, проводимых на кафедре Динамики процессов и управления КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева в области управления и моделирования сложных трансформирующихся систем [4 - 10]. За основу берется модель межотраслевого баланса [11, 12], который должен сохраняться в процессе развития хозяйственной инфраструктуры.

В процессе развития поселения осуществляется переход от получения необходимых благ извне на ввод производства блага внутри поселения в процессе чего возникает необходимость ввода новых элементов хозяйственной инфраструктуры и выбытии старых из эксплуатации. Автономность планетных поселений обеспечивается производством всех используемых благ в

пределах данного поселения и уровень автономности поселения определяется отношением производимых благ внутри поселения к потребляемым.

Помимо ввода новых элементов хозяйственной инфраструктуры с целью развития поселения, так же существуют процессы обслуживания и модернизации с целью поддержания или улучшения качества производства благ, что так же потребует ввода новых элементов или выбытия старых.

В целом данная работа обеспечит необходимыми инструментами планирования и управления развитием хозяйственной инфраструктуры АПП.

1 Типовой агрегат АПП

С целью создания математической модели развития хозяйственной инфраструктуры автономного планетного поселения (далее АПП) необходимо определение элемента хозяйственной инфраструктуры и ее типизация в виде типового агрегата Автономного планетного поселения, для чего выделим основные ее компоненты и унифицируем их структуру. В основе хозяйственной инфраструктуры лежит множество процессов, производства продуктов или услуг, в ходе которых выявляется необходимость в использовании тех или иных инфраструктурных элементов. Каждый агрегат АПП представляет собой простой производственный объект [4], то есть выпускает только один вид продукции. Рассмотрим процесс производства некоторого блага, для чего используется некоторый объем ресурсов представленный на Рисунке 1.

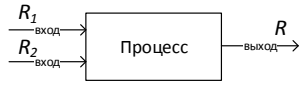


Рисунок 1 – Упрощенная модель процесса производства блага

Для обеспечения деятельностью данного процесса необходимо использование некоторых инфраструктурных элементов и человеческих ресурсов, необходимость которых определяется описанием технологии производства.

В итоге типовой агрегат АПП представляет собой модель, представленную на Рисунке 2.

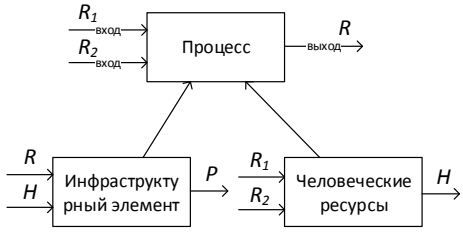


Рисунок 2 – Детализированная модель процесса производства блага

Представленную выше модель с учетом описания технологических норм потребления и выпуска примем как типовой агрегат автономного планетного поселения.

Для построения математической модели типового агрегата АПП рассмотрим агрегат в рамках которого расчет влияния используемых инфраструктурных элементов и человеческих ресурсов не учитывается. В этом случае визуально подобный агрегат представлен на Рисунке 1, где R представляет собой выпускаемый (производимый) продукт, благо, а R_1, R_2 ресурсы необходимые для его производства.

Необходимость в объеме выпускаемой процессом продукции позволяет определить объем ресурсов, необходимых для его производства, в соответствии с нормами технологического потребления. Следовательно, объем необходимых ресурсов представленного на Рисунке 1 агрегата можно рассчитать, используя следующий набор линейных уравнений:

$$R_1 = Rk_1$$
$$R_2 = Rk_2$$

Или используя общее уравнение:

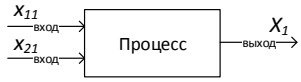
$$R_i = Rk_i$$

При выявлении строго линейной зависимости потребления ресурсов от выпускаемой продукции, то представленная выше общая формула может считаться математической моделью упрощенного типового агрегата АПП. Но подобные модели малоприменимы для использования в таких сложных системах как планетные поселения по причине того, что множество производимой продукции агрегата АПП используются в качестве ресурсов самим агрегатом, что не позволяет использовать для расчета модели приведенные выше.

В большинстве случаев рассматриваемые агрегаты АПП, в рамках которого осуществляется производство одного вида продукции, потребляют некоторый объем производимой продукции на собственные нужды в процессе производства. Это обусловлено не только существующими процессами, для осуществления деятельности которых необходима собственная продукция, но и уровнем детализации описываемых элементов хозяйственной инфраструктуры. В рамах рассматриваемого элемента хозяйственной инфраструктуры на определенном уровне абстракции выделяется один процесс производящий один вид продукции и потребляющий при этом некоторый объем собственной продукции, но если провести детальный анализ процесса, то выяснится, что рассматриваемый процесс представляет собой сложную цепочку обеспечивающих друг друга процессов, отдельно представляющих собой аналогичные по структуре агрегаты АПП, что в итоге обеспечивает производство одного вида продукции.

Данное суждение накладывает определенное требование к свойствам проектируемого типового агрегата АПП – фрактальность, а именно обеспечение подобия одного типового агрегата всему множеству агрегатов целиком.

Построим модель типового агрегата АПП при условии потребления части производимой продукции на производственные нужды, и для простоты моделирования определим, что агрегат производит всего 1 вид продукции и для этого ему необходимо 2 вида ресурсов. Представим данную модель в графическом виде на Рисунке 3, по аналогии с моделью представленной на Рисунке 1.



x11 – объем продукции используемой на нужны производства

Рисунок 3 – Упрощенная модель процесса производства

Где x11, x21 объем ресурсов необходимых для производства продукции объемом X1 и x11 объем производимой продукции используемой на нужды производства продукции X1.

Используя общее уравнение расчета необходимого объема ресурсов получим следующий набор уравнений:

$$x_{11} = X_1 k_{11}$$
$$x_{21} = X_1 k_{21}$$

Для расчета зависимых друг от друга элементов необходимо использовать балансовые модели, одним из которых является модель межотраслевого баланса Леонтьева, которую в дальнейшем мы возьмем за основу при построении модели типового агрегата АПП.

Построим межотраслевой баланс представленного нами агрегата АПП – Таблица 1 [5, 8, 13].

Так как часть объема производимой агрегатом продукции X1 применяется на собственные нужды то итоговой (конечной продукцией) будет объем равный Y1 и рассчитываемый по формуле Y1=X1-x11, где X1 обозначим валовым объемом продукции.

Таблица 1 – Модель межотраслевого баланса агрегата АПП с 1 выпускаемым продуктом

		Продукция потребляемая агрегатом		Конечная продукция	Валовая продукция
	Индексы продукции	1	2		
Продукция производимая агрегатом	1	x_{11}		Y_1	X_1
	2	x_{21}			

В межотраслевом балансе выделяют 4 части или квадранта, из которых в нашей работе мы будем использовать только 2.

Первый квадрант представляет собой объемы продукции потребляемой в качестве материальных затрат каждой из отраслей, т.е. сумма элементов *i-той* строки представляют собой промежуточный продукт *i-той* отрасли. В нашей модели первый квадрант содержит объемы потребляемых ресурсов необходимых для производства продукции агрегата.

Второй квадрант содержит конечную продукцию отраслей. Под конечной продукцией агрегата подразумевается объем производимой продукции за вычетом объема потребляемой на нужды производства самого агрегата.

Расчет валового объема продукции рассчитывается путем суммирования показателей *i-той* строки первого и второго квадрантов таблицы.

$$x_{11} + Y_1 = X_1$$

Потребляемые ресурсы x_{21} линейно зависимы по отношению к выпускаемой продукции X_1 и не используется в межотраслевом балансе.

Построим модель агрегата АПП. В соответствии с математической моделью межотраслевого баланса Леонтьева, где коэффициенты k_{ij} представляют собой коэффициенты прямых материальных затрат и показывают какое количество ресурсов *i-того* агрегата необходимо для производства одной единицы продукции j-ого агрегата.

Подставим в уравнение межотраслевого баланса значение x_{11}, получим:

$$X_1 k_{11} + Y_1 = X_1$$

Упростим уравнение:

$$Y_1 = X_1 - X_1 k_{11}$$

Вынесем X_1 за скобки:

$$Y_1 = X_1(1 - k_{11})$$

И приведем к общему виду:

$$Y = (1 - K)X$$

Использование данной модели позволяет рассчитать объем ресурсов необходимый для производства валовой продукции, включающий в себя объем продукции необходимой к потреблению, но при условии наличия в рассматриваемой модели межотраслевого баланса всего одной продукции взаимозависимой с потребляемым ресурсом.

Рассмотрим применимость данной модели к агрегату АПП состоящего из 2 агрегатов производящих по одному виду продукции и потребляемых оба вида производимой продукции в процессе производства. Графически представим данный агрегат на Рисунке 4.

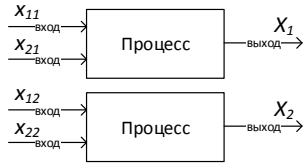


Рисунок 4 – Модель типового агрегата АПП состоящего из 2 агрегатов

По аналогии с предыдущим примером выведем уравнения расчета каждого ресурса необходимого для производства каждого из продуктов X_1, X_2.

$$\begin{cases} x_{11} = X_1 k_{11} \\ x_{21} = X_1 k_{21} \end{cases}$$

Где x11 объем продукции потребляемый на нужды производства продукции X1, а x21 объем продукции X2 потребляемый на производство продукции X1

$$\begin{cases} x_{12} = X_2 k_{12} \\ x_{22} = X_2 k_{22} \end{cases}$$

Где x22 объем продукции потребляемый на нужды производства продукции X2, а x12 объем продукции X1 потребляемый на производство продукции X2

Построим модель межотраслевого баланса Леонтьева, используя полученные уравнения – Таблица 2 [5, 8, 13].

Таблица 2 – Модель межотраслевого баланса агрегата АПП с 2 выпускаемыми продуктами

		Продукция потребляемая агрегатом		Конечная продукция	Валовая продукция
	Индексы продукции	1	2		
Продукция производимая агрегатом	1	x_{11}	x_{12}	Y_1	X_1
	2	x_{21}	x_{22}	Y_2	X_2

Общая валовая продукция, производимая j-той отраслью, рассчитываются следующими уравнениями:

$$\begin{cases} x_{11} + x_{12} + Y_1 = X_1 \\ x_{21} + x_{22} + Y_2 = X_2 \end{cases}$$

Подставим в значения производимой продукции, необходимой для производства валовой продукции, значения с коэффициентами затрат на единицу продукции.

$$\begin{cases} X_1 k_{11} + X_2 k_{12} + Y_1 = X_1 \\ X_1 k_{21} + X_2 k_{22} + Y_2 = X_2 \end{cases}$$

Упростим уравнения:

$$\begin{cases} Y_1 = X_1 - X_1 k_{11} - X_2 k_{12} \\ Y_2 = -X_1 k_{21} + X_2 - X_2 k_{22} \end{cases}$$

Вынесем X_1, X_2 за скобки:

$$\begin{cases} Y_1 = X_1(1 - k_{11}) - X_2 k_{12} \\ Y_2 = -X_1 k_{21} + X_2(1 - k_{22}) \end{cases}$$

Приведем к матричному виду:

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & 1 - k_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix}$$

Где:

$$\begin{pmatrix} 1-k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & 1-k_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{pmatrix} = (E-K)$$

В итоге выражение в матричном виде имеет вид:

$$Y = (E-K)X$$

Сравним модели полученных в результате рассмотрения двух примеров:

$Y = (1-K)X$ и $Y = (E-K)X$

Как видно из представленных примеров полученные модели идентичны, что подтверждает удовлетворение требования к свойству фрактальности модели типового агрегата.

Данная математическая модель позволяет, применяя методы и свойства аналогичные методам и свойствам математической модели межотраслевого баланса Леонтьева, осуществлять расчеты объема валовой продукции, объема необходимых для производства ресурсов, определения продуктивности агрегата АПП и решение множества аналогичных задач.

Но, рассматривая хозяйственную инфраструктуру более детально, а именно не учтенные нами в предыдущих примерах элементы типового агрегата АПП, необходимо принять увеличение потребления ресурсов при применении в рамках процесса производства инфраструктурных элементов и трудовых ресурсов.

Так как для осуществления процесса производства продукции зачастую необходимо использовать дополнительные технические средства и сооружения (здания, производственные площади, оборудование, инструменты и прочее, далее будем называть основными средствами), накладывающие определенные требования к процессу производства, а значит и к его модели.

Рассмотрим пример, в рамках которого для производства определенного типа продукции необходимо использование технического средства обладающего соответствующими производственными возможностями, что и является основным критерием использования данного технического средства.

Основным характеризующим свойством данного технического средства является количество производимой продукции заявленной в рамках моделируемого процесса производства за условную единицу времени работы данного технического средства или, другими словами, мощность технического средства (Р). Помимо мощности, заявляемой в рамках технического средства, необходимо учесть потребность в ресурсах, других основных средств и человекочасов специалистов, работающих в процессе функционирования данного технического средства. Представим структуру технического средства на Рисунке 5.

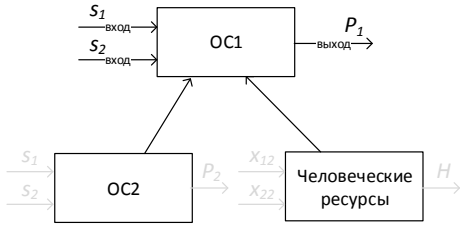


Рисунок 5 – Детализация модели Основного Средства (ОС)

Техническое средство, обеспечивающее мощностью P_1, потребляет определенный перечень ресурсов, что при использовании данного технического средства в процессе производства накладывает дополнительные затраты на процесс производства и на агрегат АПП в целом и, как следствие, должны быть учтены в модели агрегата, описанного выше.

Использование основного средства, в частном случае, технического средства может потребовать использование дополнительных основных средств (технических помещений, зданий, сооружений, инструментов) и, как следствие, обеспечит увеличение перечня и объема затрат.

Вложенность используемых основных средств определяет к модели основного средства требование к свойству агрегации характеристик (в данном случае затрат и мощности), включенных в него основных средств. В этом случае суммы затрат ОС2 представляют собой сумму соответствующих затрат основного средства всех включенных в нее элементов $s_1=s_{11}+s_{12}+ s_{13}$, $s_2=s_{21}+s_{22}+ s_{23}$, где s_1, s_2 – общие объемы затрат основных средств агрегата АПП. Мощности применяемых основных средств так же суммируются $P_1=P_{11}+P_{12}+P_{13}$, где P_1 – общая мощность основных средств.

Помимо основных средств в рамках процесса производства и в рамках используемых основных средств в процессе производства применяются человеческие ресурсы, направленные на обеспечение процесса. Результатом человеческой деятельности является время выполнения человеком работы, для упрощения применения примем за единицу измерения работы человеческого труда человеко-часы (чел/час) и обозначим через H.

Для осуществления человеческой деятельности их необходимо обеспечить необходимыми ресурсами. Данные затраты суммируются с соответствующими затратами как в рамках основных средств, так и в целом к процессу.

Объем человеческого труда суммируется в рамках агрегата АПП, в котором они используются.

В итоге модель агрегата АПП представляет собой перечень затрат, сформированных на основании затрат используемых в процессе производства, затрат потребляемых используемыми основными средствами и затрат на обеспечение агрегата человеческими ресурсами. Представим итоговую модель типового агрегата АПП на Рисунке 6.

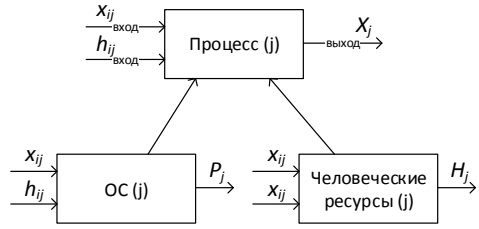


Рисунок 6 – Общий вид модели агрегата АПП

Где затраты x_{ij} с одинаковым *i-тым* порядковым номером во всех элементах агрегата АПП представляют собой аналогичное благо. А результаты деятельности каждого элемента агрегата объединяются в общую эффективность его деятельности.

В итоге ресурсы, потребляемые всеми элементами типового агрегата, суммируются и выстраиваются в виде математической модели межотраслевого баланса. На основании расчета валовой продукции производимой типовым агрегатом производятся расчеты по линейным уравнениям, количество человеческих ресурсов и количество и перечень основных средств, используемых в рамках типового агрегата АПП.

2 Добавление агрегата АПП к существующему

В процессе существования и развития планетного поселения необходимо обеспечивать увеличение уровня его автономности за счет увеличения количества производимых благ внутри поселения.

К примеру рассмотрим небольшое сельское поселение в рамках которого осуществляется производство хлеба и на производство которого потребляется ресурсы вода и мука поставляемые из внешнего мира. И в рамках развития села принято решение осуществить обеспечение водой в рамках сельского поселения. Для получения воды достаточно использование источника воды в виде ключа, но на его получение необходимо участие одного человека в день на сбор и поставку воды на пекарни. Для обеспечения жизнедеятельности человека его необходимо снабжать ежедневно определенным количеством воды и хлеба, что и формирует необходимость потребления производимой продукции на собственные нужды.

Как приведено в примере увеличение количества производимых благ потребует введение новых агрегатов, что в свою очередь потребует проведения анализа на применимость использования планируемого агрегата в пределах поселения. Анализ возможности осуществления перевода нового тип ресурса в автономное производство поселением и анализ технической возможности подобного перевода осуществляется путем определения продуктивности деятельности поселения с учетом использования нового агрегата. В данном случае применимость модели типового агрегата АПП обеспечивается возможностью анализа продуктивности применяемой в ней балансовой модели.

Рассмотрим АПП, производящее два типа блага (X_1, X_2) при производстве каждого из которых потребляется некоторый объем обоих производимых благ (x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22}), где x_{11}, x_{12} объем потребляемого блага X_1, а x_{21}, x_{22} объем потребляемого блага X_2.

В соответствии с моделью типового агрегата АПП построим перечень уравнений расчета потребления ресурсов АПП.

$$\begin{cases} x_{11} = X_1 k_{11} \\ x_{21} = X_1 k_{21} \\ x_{12} = X_2 k_{12} \\ x_{22} = X_2 k_{22} \end{cases}$$

Построим математическую модель межотраслевого баланса, по аналогии с моделью типового агрегата представленного ранее.

$$\begin{cases} x_{11} + x_{12} + Y_1 = X_1 \\ x_{21} + x_{22} + Y_2 = X_2 \end{cases}$$

Где Y_1, Y_2 конечный объем продукции необходимый к производству.

Подставим расчетные уравнения потребляемых ресурсов в представленное уравнение:

$$\begin{cases} X_1 k_{11} + X_2 k_{12} + Y_1 = X_1 \\ X_1 k_{21} + X_2 k_{22} + Y_2 = X_2 \end{cases}$$

Упростим уравнение:

$$\begin{cases} Y_1 = X_1 - X_1 k_{11} - X_2 k_{12} \\ Y_2 = -X_1 k_{21} + X_2 - X_2 k_{22} \end{cases}$$

Вынесем X_1, X_2 за скобки:

$$\begin{cases} Y_1 = X_1(1 - k_{11}) - X_2 k_{12} \\ Y_2 = -X_1 k_{21} + X_2(1 - k_{22}) \end{cases}$$

Представим данную систему уравнений в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & 1 - k_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix}$$

В итоге математическая модель межотраслевого баланса будет иметь следующий вид:

$$Y = (E - K)X$$

Далее добавим новый тип блага, планируемый к производству в данном АПП (X_3).

Для включения нового блага в текущую систему агрегата необходимо, в первую очередь, определить технологические коэффициенты потребления данного блага при производстве имеющихся и планируемых благ. Мы не рассматриваем блага и ресурсы, поставляемые для производства из внешней системы, так как они имеют линейно-зависимую структуру и ее расчеты не представляют сложности. Выделим шаг алгоритма добавления нового производственного элемента агрегата.

Шаг 1: Определение технологических коэффициентов потребления ресурсов на производство добавляемого блага.

$$\begin{cases} x_{13} = X_3 k_{13} \\ x_{23} = X_3 k_{23} \\ x_{33} = X_3 k_{33} \end{cases}$$

Где x_{ij} это перечень ресурсов необходимых для производства X_3 вида блага.

В рамках данного шага, также необходимо определить технологические коэффициенты потребления в качестве ресурса добавляемого блага при производстве уже имеющихся в АПП благ.

$$\begin{cases} x_{31} = X_1 k_{31} \\ x_{32} = X_2 k_{32} \end{cases}$$

Для включения данного блага в текущие производственные процессы планетарного поселения необходимо определить применимость производства данного блага, а именно в соответствии с возможностью анализа продуктивности межотраслевого баланса через анализ продуктивности построенной матрицы с применением обозначенных выше уравнений потребления ресурсов. Выделим следующий шаг алгоритма добавления нового производственного элемента агрегата.

Шаг 2: Построение модели межотраслевого баланса и анализ ее продуктивности.

Представим данную модель в матричном виде, а именно добавим новые объемы потребления и производства в модель межотраслевого баланса.

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & 1-k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & 1-k_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix}$$

Анализ продуктивности матрицы модели межотраслевого баланса рассчитывается в соответствии со следующими правилами:

- Матрица А продуктивна, если максимум сумм элементов ее столбцов не превосходит единицы, причем хотя бы для одного из столбцов сумма элементов строго меньше единицы. $1-k_{11}+k_{21}+k_{31}<1$, $k_{12}+1-k_{22}+k_{32}<1$, $k_{13}+k_{23}+1-k_{33}<1$
- Для того чтобы обеспечить положительный конечный выпуск по всем отраслям необходимо и достаточно, чтобы выполнялось одно из перечисленных ниже условий:
- Определитель матрицы $(E - A)$ не равен нулю, т.е. матрица $(E- A)$ имеет обратную матрицу $(E - A)^{-1}$.
- Наибольшее по модулю собственное значение матрицы A, т.е. решение уравнения $|\lambda E - A| = 0$ строго меньше единицы.
- Все главные миноры матрицы $(E - A)$ порядка от 1 до n, положительны.

Производимые расчеты позволяют на этапе планирования обеспечить принятие решения по применимости производства того или иного блага в рамках существующей АПП. И как результат применения произведенных расчетов продуктивности построенной матрицы выделим следующий шаг алгоритма добавления нового производственного элемента агрегата.

Шаг 3: Принятие решения о применимости добавления нового агрегата АПП.

Заключение

В рамках данной работы отмечу применимость описанной модели при прогнозировании применимости использования того или иного агрегата или его элемента, в частном случае получение воды с использованием человеческого ресурса.

Применение данной модели обеспечит сбалансированное существование и развитие планетных поселений с полным или частичным переводом их в автономное функционирование. А также, дальнейшее развитие возможностей применения данной модели обеспечит необходимыми инструментами экономического планирования и прогнозирования.

Список литературы

[1] Автономное планетное поселение. Виртуальная лаборатория. http://ru.vlab.wikia.com/wiki/Автономное_планетное_поселение

[2] Митин, Н. А., Мушаилов, Б.Р., Сайфуллин, Н.Ф., Сиразетдинов, Р.Т. Тезисы на междун. конгресс «Астероидно-кометная опасность-2009». СПб. 2009.

[3] Сиразетдинов Р.Т., Тарчинская Е.Н., Сайфуллин Н.Ф. Проблемы моделирования развития хозяйственной инфраструктуры автономных планетных поселений. Современные технологии и материалы ключевое звено в возрождении отечественного авиастроения: Сборник докладов международной научно-практической конференции. Т. II. Казань, 10-11 августа 2010 года. – Казань: Изд-во «Вертолет», 2010. – С. 626-634.

[4] Сиразетдинов,Т.К. Динамическое моделирование экономических объектов. Фэн. Казань. 1996. 224 с.

[5] Сиразетдинов Р.Т. Математическое моделирование развития системы однотипных объектов с учетом интенсивности их эксплуатации (На примере самолетно-вертолетного парка). - Изв. ВУЗов. Сер. "Авиационная техника". Казань, 1994, N 1, с.63-68.

[6] Сиразетдинов Т.К., Васильев С.Н., Сиразетдинов Р.Т. Моделирование экономико-экологических процессов. - Экология Республики Татарстан: проблемы и решения, Казань - 1997 //ПАНОРАМА-ФОРУМ, 1997, №14 –Специальный выпуск, с.37-44.

[7] Т.К. Сиразетдинов, В.В. Родионов, Р.Т. Сиразетдинов Динамическое моделирование экономики региона. Казань 2005. 319 с.

[8] СИРАЗЕТДИНОВ Р.Т., БРАЖКИНА А.А. Универсальная структурная модель типового экономического кластера - Управление большими системами / Сборник трудов. Выпуск 29: М.: ИПУ РАН, 2010. С.152-166.

[9] Сабирзянова Л.Т., Сиразетдинов Р.Т. Обеспечение устойчивого развития регионального кластера на основе динамического моделирования. Современные технологии и материалы ключевое звено в возрождении отечественного авиастроения: Сборник докладов международной научно-практической конференции. Т. II. Казань, 10-11 августа 2010 года. – Казань: Изд-во «Вертолет», 2010. – С. 587-593.

[10] Сиразетдинов Р.Т. Бакаев А.В., Шигапов З.Г. Динамическое моделирование нематериальных активов предприятия. Журнал «Вестник КГТУ им. А.Н.Туполева» (№ 3, 2013). с.191-196.

[11] Ультриванов, И.П. Математические модели и методы исследования экономических систем: Учебное пособие для студентов экономического факультета. Казань: Изд-во Казан.гос.техн.ун-та. 2006. 155 с.

[12] В.Л. Тарасов Экономико-математические методы моделирования: Учебное пособие для студентов сокращенных форм обучения специальностей «Финансы и кредит» и Бухгалтерский учет, анализ и аудит» Нижний Новгород 2003. 64 с.

[13] Е.Б. Бурмистрова, С.Г. Лобанов, Линейная алгебра с элементами аналитической геометрии, Издательский дом ГУ ВШЭ Москва 2007. 220 с.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С.Ф. Сергеев

ГНЦ РФ ЦНИИ робототехники и технической кибернетики
194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, 21, Россия

ssfpost@mail.ru
тел: +8 (911) 995-09-29

Ключевые слова: *инженерная психология, конвергенция, неклассическая и постнеклассическая наука, теория и методология науки, техногенный мир, человеческий фактор, эргономика, этапы развития*

Abstract

In present article we analyze methodological and theoretical basis of human-factor disciplines in cases of globalization and technological environment evolution. We show the necessity of changing in conceptual basis in human factor disciplines and introduce some new categories, invoke the processes of self-organizing in complex information and communication environments. We highlight the areas of relevance of classical, non-classical and post-non-classical engineering psychology and ergonomics.

Введение

В самом общем философском смысле методология определяет методы и принципы познания. Под методом понимается форма практического и теоретического освоения действительности, исходящего из закономерностей движения изучаемого объекта [1]. Методология определяет генеральный путь и прогноз развития дисциплины, на ближайшее и отдаленное будущее. Она включает позиции связанные с назначением, направлением и содержанием исследований. Разработка методологии позволяет определить объект и предмет, цель и методы их изучения, выявить задачи, обосновать принципы раскрытия закономерностей в исследуемой области, установить процедуры исследования, характер и место данного знания в общей системе наук. Метод определяет теоретическую компоненту знания и ее реализацию на практике в виде методик и инструментов исследования.

Истоки методологии кроются в господствующем научно-философском базисе и достигнутом уровне развития науки и технологии. Они не могут быть произвольно изменены и дополнены. Вместе с тем важно правильно выбрать соответствующие методологические основания и понятийный строй развиваемого научного направления. Это способствует рациональному распределению и интеграции сил и ресурсов исследователей, препятствует потере времени на реализацию ошибочных и тупиковых ветвей.

Необходимо правильно определить возможности господствующей методологии, ее сильные и слабые стороны в отношении изучаемой проблемы и вовремя уловить момент, перехода к новым методологическим формам и основаниям. Это достаточно сложная проблема научно-психологического плана. Она связана главным образом с инерцией человеческого мышления и невозможностью для большей части ученых отказаться от действующих в их дисциплинах догм и парадигм научного знания.

Догматическая компонента знания, отражая логику и идеологию дисциплины, создает междисциплинарные границы и способствует сохранению полученного знания, но вместе с тем, препятствует получению нового знания. Ее влияние может быть ослаблено только в про-

цессе научной рефлексии и методологического анализа направлений развития, проблемного и понятийного полей рассматриваемой дисциплины.

Проблема человеческого фактора при проектировании эргатических систем носит междисциплинарный характер и решается на стыке технических и гуманитарных наук, образуя смешение понятийных областей инженерного и психологического знания. Отметим, что в настоящее время наблюдается интенсивное развитие данных дисциплин, переход к новым формам теории и практики, что создает известные трудности в технологической области и образовании.

Можно выделить три этапа развития дисциплин человеческого фактора: классический, неклассический и постнеклассический и дать содержательные интерпретации свойств соответствующих им понятийных областей. На каждом этапе происходит смена методологических оснований и связанных с ними границ и определений понятий, используемых в тезаурусе дисциплин. Изменяется состав научно-методического и технологического инструментария, используемого при решении практических задач. Можно говорить о существовании трех версий рассматриваемых дисциплин в виде классической, неклассической и постнеклассической формы. Каждая из версий позволяет эффективно решать только определенные классы практических и научно-теоретических задач, и поэтому выбор методологической схемы исследования становится важным элементом инструментария специалиста по человеческому фактору.

1 Эволюция понятийного строя дисциплин человеческого фактора

Дать определение научной дисциплине значит определить ее границы или найти пределы, в рамках которых она не теряет специфики присущих ей предмета, объекта и методов. Решение этой задачи дает возможность оценить текущее состояние и тенденции развития исследуемой области знания, сформировать ее научную и технологическую среды, организовать селекцию и подготовку научных и инженерных кадров.

Попытки дать точные и окончательные определения дисциплинам человеческого фактора, постоянно терпят неудачу. Это связано с чрезвычайно высокой динамикой изменения дисциплинарных границ данных областей и постоянной сменой или пересмотром их предметно-понятийных областей. Можно выделить две базовые дисциплины эргономику и инженерную психологию, которые содержат выдержанные временем способы интеграции гуманитарного и инженерного знания. Однако и они находятся в постоянном изменении и развитии. Появляются новые ветви прикладных наук о человеческом факторе, являющиеся модификациями и научными редакциями эргономики и инженерной психологии. В литературе приведено более 90 определений дисциплин, решающих проблемы человеческого фактора при проектировании техники. Из них наиболее популярными являются: *human factors, human engineering, human factors engineering, ergonomics, applied ergonomics, human performance engineering, engineering psychology, industrial ergonomics, anthropotechnics, applied experimental psychology, biotechnology, psychotechnology, human-factors psychology, biomechanics.*

В последнее десятилетие наблюдается рост выделение и специализация направлений, связанных с решением проблемы массового пользователя и компьютерных интерфейсов: *HCI – Human-Computer Interaction, HIS – Human-System Interaction, IU – Informatics Usability, CHI – Computer-Human Interaction, Emotional design* и т. д.

Несмотря на различия, существующие между определениями различных авторов, можно выделить следующие общие в большинстве определений дисциплин человеческого фактора аспекты:

- использование научных данных о человеке и человеческом;
- междисциплинарное происхождение этих данных;
- междисциплинарный характер дисциплин;

- рекомендации, предложенные в этих дисциплинах, применяются в технических устройствах, для организации труда и обучения;
- отношения, полученные при исследовании человеческих факторов, используются при проектировании машин, артефактов, потребительских качеств различной продукции: оборудования длительного пользования, информационных систем, предупреждений и знаков, документов, компьютерных интерфейсов и дисплеев, задач организация труда, инструкций и процедур;
- изучение перспектив использования технических устройств неквалифицированными пользователями и обычным населением;
- изучаются работники, их возможности и ограничения;
- машины и окружающая среда настраиваются под человека, а не наоборот;
- рассматриваются возможности, характеристики, навыки и ограничения пользователей;
- цели безопасности, комфорта и благополучия.

Рассматриваемые нами инженерно-гуманитарные науки являются научными дисциплинами с динамичной границей интересов, образующейся в силу междисциплинарной конвергенции базовых естественных и гуманитарных наук, определяющих предмет и объект изучения.

Категориальный состав конкретной научной и практической дисциплины образуется совокупностью предельно общих понятий, возникших в результате абстрагирования и синтеза наиболее существенных связей и отношений объективной действительности и познания. Каждое научное направление вырабатывает и использует набор собственных категорий, составляющих ее категориальный аппарат.

К базовым категориям большинства дисциплин человеческого фактора и в частности инженерной психологии и эргономики относятся категории: «среда», «оператор», «деятельность», «информация», «концептуальная модель», «знание», «система человек-машина» в их традиционном понимании. Все они применяются при решении задач инженерно-психологического плана и включены в теоретический и методический базис рассматриваемой научной области.

Можно выделить ряд ограничений, присущих классическим вариантам данных категорий, и определить особенности их современных интерпретаций, с учетом расширений и дополнений.

Классические инженерная психология и эргономика были построены в первой половине XXI века на материалистических, в значительной мере инженерных системно-деятельностных и информационных представлениях о взаимодействиях человека и техники.

2 Системно-деятельностный подход в дисциплинах по учету человеческого фактора

Методология системного подхода рассматривалась как основа любой формы научной деятельности [2]. Системные идеи получили свое выражение и воплощение и в некоторых классических психологических концепциях, часто использовавшихся в инженерной психологии: культурно-исторической концепции психики Л.С. Выготского, «генетической эпистемологии» Ж. Пиаже, «физиологии активности» Н.А. Бернштейна, деятельностном подходе (М.Я. Басов, С.Л. Рубинштейн, А.Н. Леонтьев и др.).

Системный подход в инженерной психологии понимался в значительной мере как простое физическое объединение человека с управляемой машиной и средой, в которой человек играл определенную роль, отведенную ему проектировщиками в процессе распределения функций [3]. Одним словом, классическая инженерная психология шла по пути создания все новых и новых способов расчленения и анализа объектов исследования в рамках изучаемой системы «человек-машина», используя методы естественных наук и классической психологии.

Вопросы синтеза человеко-машинных систем решались в основном эмпирическим путем и сводились обычно к задачам инженерно-психологического проектирования, которые плохо решались инженерными психологами в силу их низкой технической компетентности.

Системные представления в методологическом базисе инженерной психологии были представлены концепцией деятельности, объединяющей все формы преобразования человеком действительности. Однако практическое применение данной концепции по отношению к человеку, как открытой системе, порождает ряд проблем. Происходит выделение человека из мира его жизнедеятельности, нарушаются цепи взаимодействий человека с профессиональной средой, разрушается целостное единство, включающее человека в мире и среде его опыта. В результате теряются эмерджентные свойства системы. Добавим к этому, что явления субъективного мира, сознания исключительно сложны, и деятельностный подход пока не может претендовать на то, что все они легко объяснимы с его точки зрения.

Отметим и существующую научную критику деятельностного подхода:

- он в значительной мере идеологизирован и носит на себе отпечаток марксистско-ленинской идеологии;
- содержит выраженную технократическую установку и естественнонаучную позицию (человек рассматривается как автомат, лишенный свободы выбора);
- в нем отсутствует психологическое содержание;
- деятельность в версиях практических реализациях деятельностного подхода часто синонимична поведению.

Правда, в настоящее время делаются попытки переосмысления теории деятельности с учетом достигнутого уровня современного научного и философского знания. Например, В.А. Лекторский считает, что еще не все возможности деятельного подхода исчерпаны и возможно его возрождение в рамках неклассической науки [4].

3 Информация и знание в междисциплинарном синтезе

К базовым в эргономике и инженерной психологии относятся и категории «информация» и «знание» отражающие кибернетический подход популярный в инженерной практике и когнитивной науке. Будучи прогрессивной на первых этапах развития инженерной психологии, кибернетическая метафора работы когнитивной сферы человека в настоящее время вступила в противоречие с полученными во многих науках о человеке данными. Она не объясняет деятельность человека в условиях неопределенности, феномены обучения, развития личности профессионала, «инсайда», группового коммуникационного поведения и т. д.

Классическая инженерная психология, рассматривающая оператора как элемент системы «человек-машина», сталкивается с проблемами оценки пропускной способности анализаторных и сенсомоторных систем человека и определения скорости его реакции на те, или иные виды стимулов. Оказывается, что человек, как информационная система, работает плохо. У него низкая скорость обработки и передачи информации. Он обладает памятью ограниченного объема, часто ошибается, не эффективен при работе с быстротекущими и очень медленными процессами, плохо работает в условиях информационных перегрузок и стресса [5]. Словом, это плохой элемент системы и от него нужно избавляться. Что и делается в практике проектирования за счет повышения степени автоматизации технического звена СЧМ, «рационализации распределения функций», введения систем резервирования и дублирования и т. д.

«Сильные стороны» оператора, рассматриваемые в основанной на информационном подходе парадигме когнитивизма, также мало что дают практику, кроме констатации факта, что человек хорошо решает задачи, требующие индукции, эффективен при распознавании образов, может принимать своевременные и качественные решения.

Неудачи при применении категории «информация» в инженерной психологии связаны с тем, что в системе «человек – машина» искусственно объединены два принципиально разных

класса систем – технических и биологических. Первая из них может быть описана в терминах приема, передачи, сохранения и преобразования информации, а вторая – только в терминах различений и работы с индивидуальным опытом (знаниями). Это два разных типа систем – система открытая техническая и замкнутая биологическая. Первая функционирует в логике алгоритма управления, вторая – в логике аутопоэтического самовоспроизводства и обеспечения жизнедеятельности организма [6]. Классическая инженерная психология не делает различий между данными системами, оперируя только с их поведенческими, наблюдаемыми характеристиками, что выражается в терминах свойств человека-оператора, влияющих на эффективность системы «человек-машина». Попытка «учета свойств» человека, включенного в техническую систему, приводит к их поиску и оценке. Однако в процессе поиска меняются свойства системы «человек – машина» в целом, и процедура оценки становится не валидной. Человек является системой, свойства которой определяются наблюдателем, а не зафиксированы в структурной форме. Возникают трудности в интеграции человека и машины, организации эффективного взаимодействия систем.

Не выдерживает критики и применение в классическом инженерно-психологическом проектировании концепта «знание» в качестве синонима термину «информация», хотя это принципиально разные понятия. В результате становится возможной передача знаний от одного носителя к другому. Знание рассматривается как независимая от своего источника и носителя сущность. Однако изучение живых биологических систем, к которым относится и человек, показывает, что знание в них не эквивалентно информации. Оно, в отличие от информации, не может быть отделено от своего носителя. Знание не обладает дискретной материальной формой, к нему не применимы операции аналогичные операциям с физическими, материальными объектами, оно связано с работой механизма понимания, носит черты социального конструкта, отражающего интерпретации, порождаемые и разделяемые членами общества [7].

Чтобы избежать негативных последствий классического варианта инженерно-психологического проектирования необходимо поставить вопрос о проектировании среды деятельности человека, а не деятельности самой по себе как некоторого процесса активного преобразования мира. По мнению финского ученого Тимо Ярвилехто «разделение мира на физический и психический миры, отделение человека от среды его жизнедеятельности неверны, так как это единая система» [8].

4 Предпосылки к появлению неклассической и постнеклассической инженерной психологии и эргономики

Приведенная выше критика методологических оснований классической инженерной психологии связана с появлением новых объектов эргономики и инженерной психологии, которые требуют соответствующих подходов для решения возникающих проблем. Это, прежде всего, развитие глобальных сетевых информационно-управляющих и коммуникационных технологий и технических сред с искусственным интеллектом («разумная среда»). Заметим, что происходит также изменение содержания и характера труда, работающих с техникой и технологией специалистов, которые все более становятся пользователями, а не операторами.

Изменения в методологическом базисе наук о человеке, наблюдающиеся в последнее десятилетие, связаны с развитием синергетических представлений и появлением неклассических моделей самоорганизации сложных систем (В.И. Аршинов, В.Г. Буданов, Ф. Варела, Е.Н. Князева, С.П. Курдюмов, У. Матурана, А.Р. Пригожин, Хайнц фон Фёрстер, Г. Хакен и др.). Возникающий переход от парадигмы классической системно-ориентированной инженерной психологии к неклассической средоориентированной инженерной психологии требует рассмотрения понятия «среда» как психологического объекта.

Можно дать определение неклассической инженерной психологии и рассмотреть в его контексте новые интерпретации базовых понятий инженерно-психологического проектирова-

ния. *Инженерная психология* – это научно-практическая и проектная дисциплина, изучающая профессиональную жизнедеятельность человека в эрготехнических средах, обеспечивающая проектирование эффективных и безопасных профессиональных эрготехнических сред и систем.

Такое определение требует введения категории «среда» в состав общепсихологических категорий и выделение ее психологической и инженерно-психологической специфики.

Представленная субъекту среда есть субъективный конструкт, с которым он имеет дело, воспринимая его как объективную реальность. Человек, включенный во взаимодействие с технической системой, не контактирует непосредственно с нею, а имеет дело с особой психологической сущностью – *субъективной средой*. Это понятие отличается от используемого в классической инженерной психологии понятия «концептуальная модель», которое является вторичным интерпретационным представлением.

Понятие «среда», является новым для инженерной психологии, и необходимость его введения обусловлена качественно новыми свойствами, возникающими при погружении оператора в техническую среду. Исчезает понятие алгоритма деятельности, которое являлось базовым для традиционных систем «человек – машина» являющихся основными объектами классической инженерной психологии. Человек действует в среде, используя множественные возможности, предлагаемые средой. В процессе решения поставленной задачи формируется динамическая сеть отношений человека-пользователя с технической средой эргатической системы, обеспечивающая эффективность профессиональной деятельности.

Система «человек – машина» порождает техническую среду, деятельность в которой приводит к профессиональному результату – получению продукта. Поэтому нельзя говорить о деятельности вне среды, в которой она осуществляется. Среда в современной трактовке – это не только условия деятельности, но и психологический феномен, порождаемый в ответ на требования физической и социальной реальностей.

Применение в неклассической инженерной психологии понятия «человек – машина» при проектировании сложных технических систем, в которых человек не является звеном, непосредственно взаимодействующим с технической частью системы, нецелесообразно. Классическое понимание отношений человека с техникой в виде системы «человек-машина» не объясняет сетевых взаимодействий с техническими средами, возникающих и реализуемых человеком в процессе достижения результата.

Развитие техники и технологии, их непрерывное функциональное и качественное усложнение, миниатюризация компонентной и элементной базы, переход к нано-технологиям, создание систем с запрограммированными и адаптивными свойствами, обладающих искусственным интеллектом или реализующих нетривиальные ответы на входные сигналы, приводят к новому пониманию технических систем. Они рассматриваются как системы, порождающие сложноорганизованные технические среды. Включение в технические среды человека-оператора приводит к появлению в его психике особого образования в виде эрготехнической среды.

Примерами эрготехнических сред являются среды, возникающие при работе операторов с интерфейсами, содержащими системы виртуальной реальности. В них оператор погружается в искусственный мир, жизнедеятельность в котором ведет к решению профессиональной задачи.

Проектирование деятельности человека меняет свое содержание: с проектирования техники и проектирования деятельности человека-оператора в системе «человек – машина» на проектирование истории человека, действующего в эрготехнической среде, порождаемой в человеке технической системой. Можно говорить о появлении в инженерной психологии нового класса задач – *нарративной линии развития* операторско-пользовательской деятельности, которую можно отнести к постнеклассической инженерной психологии, так как в данном случае речь идет об эволюционирующих самоорганизующихся системах.

Технические среды современных эргатических систем приобретают по отношению к оператору ряд свойств, обусловленных сложностью возникающих систем и их самоорганизующимся характером:

- они становятся все более недоступными пониманию операторов/пользователей, работающих в них;
- многие возможности систем никогда не будут использованы, потому что о них ничего не известно ни операторам, ни разработчикам;
- в них заложены ошибки, ведущие к сбоям деятельности, которые никогда не будут найдены.
- Наблюдаются изменения в операторе и операторской деятельности:
- в концептуальной модели, формируемой в операторе, исчезают признаки точного знания;
- оператор управляет не параметрами системы, а ее поведением;
- оператор персонифицирует машину, придает отношениям с нею личностный характер;
- классическое обучение неспособно дать оператору требуемого для управления системой знания [9].

Появляющиеся вследствие этого задачи требуют использования новых методологических схем, в которых точное знание комбинируется с элементами практического и технологического опыта исследователей, работающих в разных междисциплинарных областях.

Заключение

Развитие техники и технологий в рамках эволюционирующей глобальной техногенной среды ведет к появлению новых дисциплин человеческого фактора и к ревизии понятийного и методологического строя эргономики и инженерной психологии, составляющих их базовое конвергентное ядро.

Технологическая революция, связанная с НБИКС-конвергенцией [10] ведет к изменениям методологического базиса дисциплин человеческого фактора. Следует ожидать появления новых научных направлений по изучению человека, действующего в технических средах. Это *наноэргономика*, *когнитивная эргономика*, *инфопсихология*, *когнитивная инженерная психология*, *биоэргономика* и другие конвергентные дисциплины. Возможны и другие объединения областей знаний, усиливающие возможности науки по изучению и использованию знаний о человеке, действующем в искусственных техногенных средах.

Автор надеется, что настоящая статья послужит началом к обсуждению проблемы включения человека в сложные техногенные среды в условиях глобализации и тотальной интеграции человека с миром техники и технологии.

Благодарности

Выражаю признательность, сотрудникам Института проблем управления сложными системами РАН профессорам Смирнову Сергею Викторовичу и Виттиху Владимиру Андреевичу за предоставленную возможность выступить по настоящей проблеме, а также сотруднику ИПУ РАН, профессору Филимонову Николаю Борисовичу, давшему ценные замечания и рекомендации по усовершенствованию данной статьи.

Список литературы

[1] Философская энциклопедия. Том 3. – М.: Советская энциклопедия, 1964.
[2] [Блауберг И.В., Юдин Э.Г. Становление и сущность системного подхода. – М.: Наука, 1973.
[3] Ломов Б.Ф. Человек и техника. – М.: Советское Радио, 1964.
[4] Лекторский В.А. Наследие деятельностного подхода и современность // Восток: альманах. – 2006. – № 3(39). – Режим доступа: http://www.situation.ru/app/j_art_1126.htm.
[5] Сергеев С.Ф. Курс лекций по инженерной психологии и эргономике. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2008.
[6] Матурана У. Биология познания // Язык и интеллект. Сб. / Пер. с англ. и нем. / Сост. и вступ. ст. В.В. Петрова. – М.: Издательская группа Прогресс, 1996.
[7] Сергеев С.Ф. Концепт знание в парадигме конструктивизма // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 12. 2008. Вып. 3. – С. 418–427.
[8] Jarvilehto T. The theory of the organism-environment system: 1. Description of the theory Text. // Integrative Physiological and Behavioral Science, № 33, 1998. – P. 317–330.
[9] Сергеев С.Ф. Обучающие и профессиональные иммерсивные среды. – М.: Народное образование, 2009.
[10] Roco Mihail C. and Bainbridge, William Sims. Converging technologies for improving human performance: nanotechnology, biotechnology, information technology and cognitive science. Washington, D.C.: National Science Foundation, June, 2002.

ОБЛАЧНЫЙ СЕРВИС ПРОГНОЗНОЙ АНАЛИТИКИ В УПРАВЛЕНИИ ИННОВАЦИОННЫМ РАЗВИТИЕМ

И.А. Степановская

Институт проблем управления РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65, Россия
irstepan@ipu.ru
тел: +7 (495) 334-91-69, факс: +7 (495) 334-93-40

Ключевые слова: *долгосрочное прогнозирование, крупномасштабные системы, облачный сервис, интерсубъективное управление, фрактально-ориентированная информационная технология*

Abstract
The integrated procedure of prediction, planning and valuation of technological realizability of programs of creation of new hi-tech production is offered.

Введение

В условиях глобальной экономики и международного разделения труда технологическое лидерство, основанное на результатах научно-технического развития (НТР), понимается как залог национальной безопасности. В связи с этим академической, вузовской и отраслевой науке формируются новые кадры high-tech-специалистов, в сферу деятельности которых входит проведение прогнозных исследований по схеме «долгосрочный прогноз НТР – программа развития high-tech-продукции –инновационный проект». В то же время технологические подходы к работе high-tech-специалистов практически не сформированы. Это определяет значительную актуальность проблемы разработки облачной технологии прогнозной аналитики для управления инновационным развитием крупномасштабных систем (КМС).

Цель исследования заключается в разработке электронной системы сервисных услуг, позволяющей систематизировать научно-технические фундаментальные достижения, формировать модели конкурентоспособной high-tech-продукции (технической, информационной или управленческой направленности), анализировать соответствующий рост продуктово-экономического потенциала производственных структур (объектного, территориального, отраслевого, межотраслевого и международного уровня) и прогнозировать влияние НТР на рост технологических потенциалов разных стран.

В соответствии с этой целью в работе поставлены и решены следующие задачи:

- разработка информационной технологии управления данными о развивающихся процессах, адекватной для приложений прогнозной аналитики развития, включая эволюционное моделирование, мониторинг, ситуационный анализ, прогнозирование и целеполагание;
- разработка унифицированных сервисов прогнозной аналитики развивающихся систем;
- разработка портальной технологии инновационного аудита.

1 Актуальные проблемы разработки прогнозной аналитики в управлении развитием крупномасштабных систем

Согласно классическому определению, прогнозная аналитика в разных областях управленческой деятельности рассматривается как процесс анализа статистических и фактических данных для создания прогнозной модели, представляющей возможные последствия влияния различных факторов на исход определенных действий [1]. Применение прогнозной аналитики

положительно повлияет на принятие оперативных решений, на формирование требований к стратегиям управления, на повышение общей эффективности управления. В разных приложениях (страховании, кредитовании, управлении рисками предприятий, в энергетике и топливной промышленности и др.) сложились свои технологии, продукты и решения [2], гибко учитывающие специфику прикладных областей.

В настоящее время актуальной областью разработки концептуальной модели прогнозной аналитики становится среднесрочное и долгосрочное прогнозирование влияния факторов на развитие крупномасштабных систем (КМС) национального уровня, к категории которых относятся отрасли, регионы, инфраструктурные объекты (транспорт, энергетика, связь и др.). Особенности новой постановки задач прогнозирования заключаются в переходе от слабо связанных задач управления развитием различных подсистем и индивидуальных объектов на каком-либо этапе их жизненного цикла к задаче электронного прогнозирования факторов влияния на «развивающуюся систему развивающихся систем» в рамках единой электронной системы прогнозной аналитики (ЕЭСПА), построенной на мощных и гибких облачных SMART-технологиях (CloudBuilding) и типовых онтологических моделях.

При построении онтологий целесообразно рассматривать КМС с обобщенных позиций производителя некоторого сектора товарной продукции и/или услуг. В таком случае к числу базовых факторов, определяющих ход развития КМС в долгосрочной перспективе, относятся оценки динамики технологического, финансово-экономического, инфраструктурного, трудового, рыночного и других видов потенциала. Объективности ради оценки указанных факторов разделяются на абсолютные, сравнительные и сопоставительные, определяющие относительные позиции управляемой КМС в масштабах отечественной и глобальной экономики и международного разделения труда.

Если до середины XX века решающую роль в развитии национальных КМС играли внутригосударственные факторы, то во второй половине XX - начале XXI века важнейшими факторами влияния становятся факторы конкуренции. В развитии КМС разных стран наблюдаются такие тенденции, как увеличивающийся разрыв между государствами-лидерами и другими развивающимися странами; ускоренное моральное устаревание создаваемой техники и технологий; резкое увеличение объемов и темпов разработки высокотехнологичной продукции и средств ее производства; интенсификация внешне-экономических связей в производстве высокотехнологичной продукции, определяющая снижение ее себестоимости.

Анализ показывает наличие большого количества открытых интернет-источников данных для ЕЭСПА, предоставляющих фактическую статистику о соотношении потенциалов КМС разных стран, а также объемов средств, вкладываемых в развитие. Безусловно такая статистика крайне важна для демонстрации динамики разрыва показателей между странами-лидерами и другими странами, которая для каждой страны дает определенные ориентиры в развитии национальных КМС. Однако в современную эпоху ускоренного технологического прогресса превосходство по статистическим показателям имеет большой риск «обнуления» ноу-хау технологиями, выводящими в лидеры конкурирующие страны.

Согласно [4] секретом ноу-хау признаются сведения любого характера (производственные, технические, экономические, организационные и другие), в том числе о результатах интеллектуальной деятельности в научно-технической сфере, а также сведения о способах осуществления профессиональной деятельности, которые имеют действительную или потенциальную коммерческую ценность в силу неизвестности их третьим лицам, к которым у третьих лиц нет свободного доступа на законном основании и в отношении которых обладателем таких сведений введен режим коммерческой тайны.

Ключевые факторы ноу-хау для КМС разделяются на технические, экономические, управленческие, правовые, а также на технологические, определяемые как композиции факторов перечисленных категорий. Будем различать также технологические ноу-хау, касающиеся

производства средств производства и непосредственно производства. Общепринятые базовые принципы категоризации факторов определяются следующим образом.

1) Технические (конструкторские, технологические, математические, производственные и др.) – сведения, содержащиеся в неопубликованных заявках на выдачу патента; научных отчетах; конструкторских чертежах; лабораторных макетах объектов новой техники; методиках расчетов, проведения экспериментов; протоколах испытаний; перечнях проведенных научно-исследовательских работ; статистических расчетах; рецептурах и данных о составе и характеристиках материалов; спецификации; инструкциях по применению технических средств, технологий; документации к компьютерным программам, в том числе руководстве пользователя и т.п.
2) Экономические (финансовые, коммерческие, рекламные, сбытовые) – сведения, связанные, как правило, с определенными знаниями конъюнктуры рынка, опытом ведения коммерческих операций, сведениями о наиболее выгодных формах использования денежных средств, операциях с ценными бумагами, структурами цен на производимые товары и т.п. Источниками такой информации являются: договоры с контрагентами; картотеки клиентов и поставщиков; данные финансово-бухгалтерской отчетности (баланс); данные об экономической стороне организации производства; схемы финансовых операций; информация о рынках сбыта; сведения о тактике выхода на рынок; сведения о размерах скидок, об условиях платежей, ценах; данные по методам рекламы; методики обучения персонала; бизнес-планы инвестиционных и коммерческих проектов; аналитические прогнозные отчеты по развитию бизнеса и т.п.
3) Управленческие – сведения о структуре и методах управления, позволяющих наладить эффективное взаимодействие различных производственных и управленческих структур организации, в решении кадровых вопросов. Управленческое «ноу-хау» представляют схемы управления производством, картотеки штатных сотрудников, сведения о наличии свободных мест, заработной плате, соотношении штатных сотрудников и совместителей.
4) Правовые – сведения, связанные с применением организационно-правовых форм предпринимательской деятельности, налогами, кадрами и т.д.

На практике разработка технологий ноу-хау строится по схеме организации инновационного процесса, имеющего коммерческую ценность в силу неизвестности иным лицам в отношении которой введен режим коммерческой тайны.

В настоящее время опубликовано значительное количество работ, посвященных инновационному развитию. Однако остается открытым целый ряд вопросов, возникающих при разработке ЕЭСПА и связанных с формальным представлением и алгоритмизацией комплексного факторного анализа по ключевым для технологий ноу-хау направлениям. Предлагаемые подходы к решению этой проблемы рассмотрены далее в разделах 2-3.

2 Методологические принципы организационно-информационного обеспечения электронной прогнозно-аналитической деятельности в управлении инновационным развитием

Предлагаемая концепция ЕЭСПА описывается комплексом ключевых положений, представленных на рисунке 1 и вытекающих из фундаментальных особенностей КМС как объекта прогнозной аналитики инновационного развития.

Основополагающим решением является ориентация на модель интерсубъективного управления и прогнозирования в среднесрочной и долгосрочной перспективе [3], позволяющая приобщить к принятию решений специалистов научных, государственных, производственных, военных, финансовых и других структур, занимающихся как аналитической, так практической деятельностью управления развитием КМС по разным категориям инновационной деятельности. Поскольку ни один из участников не претендует на полностью объектив-

ный адекватный анализ и принятие решений, следует признать, что интерсубъективность в большей степени отвечает потребностям системного подхода к аналитико-управленческому процессу, способствующему поиску и согласованию компромиссных решений, учету взаимодополняющих множеств значимых интересов, мотивов и потребностей в комплексных технологиях ноу-хау.

Рисунок 1 – Ключевые принципы формализации ЕЭСПА

Все другие концептуальные положения представляют собой регламенты и требования к программному обеспечению интерсубъективной деятельности.

Первый среди них - ориентация на мощную и гибкую геопортальную среду, удовлетворяющую принципиально важным для интерсубъективного прогнозирования и управления требованиям:

- предоставление единого картографического-временного пространства для накопления и интеграции сверхбольших объемов фактической и аналитической информации в контексте комплексных ретроспективных, ситуационных, прогнозных исследований проблем развития КМС;
- поддержка стратегии прогнозного анализа единой «развивающейся системы развивающихся систем», заменяющей стратегию фрагментарного анализа и планирования развития КМС;
- доступ к внешним информационным web-ресурсам для проведения сравнительного и сопоставительного анализа развития аналогических КМС в разрезе разных стран и регионов;
- поддержка технологий полимасштабного анализа и сетевого экспертного управления;
- поддержка web-коммутационных технологий анкетирования web-клиентов, в том числе для организации сбора документальной оперативной информации о текущем состоянии КМС, для проведения полного цикла форсайтных работ (планирование и утверждение тематики, анкетный опрос, обработка и утвеерждение результатов, формирование плана реализации, контроль результатов) и др.

Второй принцип организации ЕЭСПА - облачный сервис (Cloud Building), опирающийся на онтологическую модель развивающейся КМС и обеспечивающий стандартизацию и унификацию интерсубъективной деятельности. Данный принцип поддерживает перспективное «технологическое прогнозирование», проводимое с использованием современных техниче-

ских средств центров обработки данных и обеспечивающих масштабные исследования с привлечением большого количества специалистов.

Третий принцип - интеграция облачных сервисов по принципам контроллинга развития КМС, поддерживающего все этапы полного цикла прогнозной аналитики развития крупномасштабных систем, реализуемого в режиме SMART самоорганизации и само-обследования. Как показано на рисунке 2, контроллинг базируется на электронной системе многоагентного встроенного консолидированного мониторинга (ВКМ).

Рисунок 2 – Этапы цикла SMART-контроллинга

Ситуационное моделирование предполагает построение и уточнение прогностической модели стратегического развития объектов КМС, обеспечивающей формализацию задач оценки влияния факторов на развитие, облегчающую оценку качества ее решения.

Прогнозирование и целеполагание выполняются на основе проведения сравнительной, сопоставительной, относительной оценки динамики развития объектов КМС на фоне аналогичных КМС других стран, выбора стратегии развития (эволюционной, догоняющей, лидирующей) и установки прогностических оценок для объектов стратегического управления. Верификация прогностических оценок осуществляется экспертами путем опровержения критических замечаний оппонентов, сопоставления прогнозов, разработанных другими методами, сопоставления с прогнозами развития объектов КМС других стран и др.

Под *оценкой реализуемости* понимается проведение исследование принципиальной возможности реализации прогноза развития КМС с заданными показателями достижения результатов в заданные сроки на определенных предприятиях при предполагаемых (известных) типе, специализации и кластерной кооперации производства, а также с приемлемым бизнес планом бюджетных затрат и инвестиционных вложений.

Контроль и управление факторами рисков развитию, а также регулирование факторов развития осуществляется с помощью системы экспертного SWOT-наблюдения, выполняющего функции системы раннего оповещения и быстрого реагирования на возникающие тренды, риски, события, явления и процессы.

На обобщенном уровне SMART-контроллинг обеспечивает построение масштабируемых моделей трендов и рисков развития и соответствующих многоуровневых систем поддержки безопасности развития и комплексного мега планирования и разработки проектов долгосрочного развития.

Четвертый принцип организации ЕЭСПА – это акцент на синергетику как явлении изменения состояния и последующего хода развития КМС за счет, которое зависит от эффективного управления факторами влияния на разработку технологий, ноу хау. Данный принцип должен учитывать, контролировать и управлять процессом соразмерного развития факторов влияния и снижать риски запаздывания, объективно нарушающие условия возникновения ожидаемых синергетических эффектов роста потенциала КМС. Следует отметить, что концеп-

туально управление рисками эксплуатации КМС и рисками развития КМС существенно отличаются друг от друга. Главное отличие состоит в классификации рисков. Риски эксплуатации и факторы снижения этих рисков довольно статичны. Риск эксплуатации принципиально не может перейти в разряд факторов поддержки эксплуатации. Прямо противоположные принципы факторного анализа характерны для конкурентной среды «развивающейся системы развивающихся систем». Произвольный фактор, являющийся фактором роста для одной системы, является фактором риска роста для систем-конкурентов. По мере развития системы факторы ее роста и риска могут менять силу воздействия (например, влияние факторов роста может расти, а влияние факторов риска - ослабевать). По мере развития системы могут меняться ее интересы и поведение, что не исключает возможности ее партнерства с бывшими конкурентами, а следовательно перехода бывших факторов риска в разряд факторов роста. В связи со сказанным для эффективного управления рисками развития необходима организация мониторинга прорывных технологий стран лидеров, представляющих угрозу обнуления потенциала КМС для каждой развивающейся страны. Такой мониторинг будет служить информатором реального времени для системы раннего обнаружения угроз, требующих разработки и планирования симметричных решений ноу-хау.

С целью эффективной реализации системы быстрого реагирования на возникающие угрозы целесообразно поддерживать реестр паспортов известных прорывных технологий и систему разработки проектов симметричных технологий (в том числе с привлечением покупных изделий на мировом рынке) с оценкой временных границ и ожидаемых затрат ресурсов на их реализацию.

Пятый принцип состоит в ориентации на перспективные технологические платформы, определяющие будущий перспективный облик КМС. Показательными примерами служат технологии кибер-физических систем, экологического развития и др. Кибер-физические системы (Cyber Physical Systems – CPS), представляют собой электронно-механические, гидравлические, биологические и т.д. системы с вычислительной составляющей, которых независимо от масштаба (включая нано- и крупномасштабные инженерные объекты) предполагают одновременное проектирование объекта и системы управления в едином комплексе в рамках интегрированных инструментальных средств. Как отмечено в [5], CPS относятся к новейшему поколению интеллектуальной встраиваемой техники, функционирующей как реактивные системы реального времени:

- реагирование на состояние внешней среды;
- обеспечение постоянного цикла взаимодействия со средой;
- выполнение бесконечного целевого алгоритма;
- учет внешних временных ограничений (реальное время).

Возможна реализация CPS по технологии «система на кристалле». При этом CPS - это низкая стоимость производства; низкое энергопотребление; проектирование в сжатые сроки, программирование в рамках модели «с учетом вычислительных ресурсов».

Подкласс систем CPS-RFID позволяет перейти от автоматического управления централизованной системой к автоматическому управлению сопровождения самих изделий, в том числе, к само-оптимизации, само-диагностике, управлению своим производством. Перечисленные особенности позволяют использовать системы CPS-RFID как унифицированный образец перспективных инновационных изделий и технологий любой отраслевой и межотраслевой принадлежности.

Шестой принцип состоит в использовании унифицированной фрактально-ориентированной информационной технологии (ФОИТ). Под ФОИТ здесь понимается классическая объектно-ориентированная технология, элементарным объектом которой является «фрактал», т.е. элемент, снабженный определенным механизмом развития, рассчитанным на некоторый срок, модель жизненного цикла и на набор условий и ресурсов, необходимых и достаточных для развития.

К типовым форматам данных, поддерживаемым ФОИТ, относятся следующие:

- объектно-ориентированные макромодели «развивающейся системы развивающихся систем», способные к конфигурированию в интересах представления динамики развития объектов, явлений, событий, ситуаций, рисков в составе управляемой КМС;
- модели системных и локальных взаимозависимостей, взаимовлияния, циклов обратных связей, противоречий между развивающимися процессами, позволяющие анализировать стратегии снижения рисков и формировать библиотеки перспективных практик прогнозирования;
- модели формирования синергетических (когерентных резонансных) эффектов роста потенциала КМС, позволяющие выявлять условия и временные границы достижения и/или потери их устойчивости;
- модели многосвязных рисков и оппозиционно-партнерских отношений между развивающимися элементами, блоками и подсистемами произвольной природы (объектами, явлениями, рисками, процессами, ситуациями, событиями, планами, программами, сообщениями и др.).

ФОИТ используется для управления «большими данными», в том числе информационной инфраструктурой геопортала.

Преимущество ФОИТ заключается в том, что она расширяет известные технологии каталогизированного хранения и индексированного поиска в массивах «больших данных», позволяет ввести в модель «системы координат» для измерения динамики уровня влияния факторов на уровень и направление ожидаемых синергетических эффектов, сравнивать результативность стратегий управления различными процессами роста и развития.

Принципиальное свойство ФОИТ, существенно повышающее эффективность интерсубъективной прогнозной аналитики развития КМС, состоит в использовании стандартного графического способа формального описания анализируемой динамики объектов и систем. Это свойство обеспечивает интероперабельность независимо разрабатываемых приложений прогнозной аналитики и поддерживает создание комплексных приложений электронной прогнозной аналитики.

3 Структура облачного сервиса электронной прогнозной аналитики

В обобщенном виде предлагаемая структура облачного сервиса электронной прогнозной аналитики развития КМС представлена на рисунке 3.

Она базируется на ФОИТ управления данными и включает сервис формирования интегрированных информационных ресурсов для электронного фактографического прогнозного анализа и сервис реализации прогнозного анализа с помощью интегрированных информационно-аналитических и экспертных систем

Подготовка информационных ресурсов осуществляется на основе услуг управления метаданными (создание индексной модели, классификаторов, справочников, библиотек, графовых ФОИТ-моделей развивающихся систем) и услуг формирования виртуальных хранилищ разнообразной фактологической информации о контролируемых развивающихся объектах и процессах, привлекаемой из внешних web-источников и специально организованных систем мониторинга, форсайт-исследований, анализа документальной информации. Специальный набор сервисов (доступа к геопорталу, сервисов документооборота и поддержки деловых процессов) предназначен для организации интерсубъективного взаимодействия. Непосредственный прогнозный анализ осуществляется с помощью сервисов сопровождения хранилищ интегрированной информации, проведения исследований по оценке реализуемости прогнозов и формированию отчетов типа «Белая книга – Глобальный тенденции развития КМС на период от … до …».

Рисунок 3 – Обобщенная структура облачного сервиса электронной прогнозной аналитики долгосрочного развития КМС

Заключение

Предложенный подход прошел практическую аппробацию на уровне отдельных компонент сервисной системы, связанной с разработкой систем аналитического мониторинга ФЦП, мониторинга финансово-экономического потенциала предприятий ОПК, информационно-сервисной системой поиска и оценки вариантов размещения портфеля заказов на производство инновационной продукции [6-8].

Список литературы

[1] Аксенчер – международная компания, оказывающая услуги в области управленческого консалтинга http://www.accenture.com/ru-ru/Pages/service-predictive-analytics.aspx.
[2] Компания SAS: разработка и продажа решений и услуг в области бизнес-аналитики. http://www.sas.com/offices/europe/russia/software/solutions/RI.html.
[3] Виттих В.А. Управление ситуациями в сложных развивающихся системах с применением интерсубъективных теорий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. №12. – С.2-6.
[4] Право на секрет производства (ноу-хау) http://www.copyright.ru/library/zakonodatelstvo/gk_rf_obschee_zakonodatel/grazhdanskii_kodeks_RF_4_chast/glava_75__pravo_na_sekret_proizvodstva_nou-hau.
[5] Технологический уклад http://ru.wikipedia.org/wiki.
[6] Степановская И.А., Сизов Ю.Г., Пляскота С.И., Сериков А.П. Концепция автоматизированной информационно-моделирующей технологии программно-целевого управления жизненным циклом научно-технической продукции // Вооружение. Политика. Конверсия. 2010. 2(92). С. 36-42.
[7] Управление развитием крупномасштабных систем / Под редакцией А.Д, Цвиркуна. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2012. – 496 с. – ISSN 978-5-94052-188-4.
[8] Буравлев А.И., Горчица Г.И., Саламатов В.Ю., Степановская И.А. Стратегическое управление промышленными предприятиями и корпорациями: методология и инструментальные средства. – М.: «Физматлит», 2008. . – 176 с.

ЦИВИЛИЗАЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ МЫСЛЯЩИЕ СИСТЕМЫ

А.И.Тимофеев

ОАО Национальный институт авиационных технологий
118047, Москва, Кировоградская д.3, Россия
timofiev@yandex.ru
тел: 8 (495) 311-04-14

Ключевые слова: *цивилизация, проблема, мыслящие системы, неопределенная ситуация, пространственное осязание, разумная рука*

Abstract

There are discovered some roles and features of technological thinking systems in our civilization. For example, main feature of methodology of the project "Artificial intellectual hand" in comparison with known solutions in the field of manipulating robotics and prosthetic appliances is the presence of feedback based on simulation of afferent connections of human hand – spatial sense of touch of human hand at semantic level - during unstressed capture reliability of any non-oriented complex form objects.

Введение

Сегодня наша цивилизация для удовлетворения своих растущих потребностей в условиях ограниченных природных ресурсов придерживается следующей тактики:

1) Поиск и применение новых альтернативных источников энергии
2) Адаптация природных эволюционных процессов к своим потребностям.

Однако для кардинального решения глобальной проблемы выживания цивилизации и сохранения человечества на нашей планете, как общей объединяющей все нации идее необходимо упразднить *растущие противоречия как между цивилизацией и Природой (Проблема I), так и противоречия внутри нашей цивилизации (Проблема II).*

Для решения *Проблемы I*, на наш взгляд, необходимо разработать *стратегию использования ограниченных природных ресурсов* в масштабах планеты с увеличением богатств биосферы на основе *принципа согласования темпов роста производительности труда всех отраслей экономики с темпами роста допустимых изменений внешней среды.*

Решение *Проблемы II* возможно в изучении причин возникновения противоречий (социальных, национальных, религиозных, экологических и других), переводом их в разряд неантагонистических противоречий и выработкой целенаправленных взаимовыгодных коллективных решений с принятием ответственности за эти решения и их реализацию на основе *принципа единства междисциплинарных системных знаний и этического императива (с целесообразными ограничениями, в т.ч. военного, экономического и экологического характера).*

Выработка целостного *планетарного* системного *мышления* человечества будет способствовать кардинальным решениям упомянутых проблем с созданием новых общественных организационных структур нашей цивилизации как для обеспечения условий *ко-эволюции с целенаправленным развитием человечества и окружающей среды.*

Значительный вклад в основу *планетарного мышления* в конце XIX века и в начале XX века внесли такие ученые и писатели как И.М. Сеченов – о единстве психической и физической составляющих человека и окружающей среды ("Рефлексы головного мозга", 1869г.), Д.И. Менделеев – (о системной конструкции химических элементов неживой природы на основе их атомных весов,1869 г.), Н.Ф. Федоров – (об основах целостного планетарного мышления, « Философия общего дела», 1906 г.), В.И. Вернадский, Э. Леруа – (учение о ноосфере и целост-

ная картина мирового процесса развития , 1926 г.), Э.К. Циолковский – (о Теории космических эр и космонавтике ,1932г), П. Тейяр де Шарден – (о человечестве как объекте планетарного масштаба, 1940), Д.Л. Андреев – (о структуре Вселенной и месте человека в ней, «Роза мира», 1955) и другие.

В настоящее время сокращение как энергетических и природных затрат, так и ресурсов времени при удовлетворении растущих потребностей нашей цивилизации возлагается также и на создаваемые сегодня разнообразные технические *мыслящие системы.*

1 Мыслящие системы на пороге нашего общества

В последние годы за рубежом большое внимание уделяется *мыслящим системам,* в т.ч. проводятся специализированные международные конференции, где представлены инновационные доклады по разнообразным «*умным*» (smart) и *мыслящим* (thinking) системам, включая такие как, например, «умные» города будущего с «умными» домами, «умными» улицами и «умными» квартирами, «умными» глазами, «умными» руками и т. д., обсуждается роль этих систем в педагогике, в бытовых и экстремальных условиях, рассматриваются конкретные требования, которым должны отвечать жители городов будущего, обсуждаются проблемы моделирования разнообразных *мыслящих* систем.

Академик А.Н. Колмогоров полагает [7], что *моделирование способов организаций* материальных систем (в т.ч. и биологических) заключается в создании из других материальных элементов (и алгоритмов функционирования) *новых систем*, *обладающих в существенных чертах той же организацией, что и моделируемая система*. Поэтому, по его мнению, *достаточно полная модель живого существа должна называться живым существом, а модель мыслящего существа – мыслящим существом.*

2 Примеры мыслящих систем

Проект *«Искусственная Разумная рука»* призван механизировать и автоматизировать на автономном уровне недоступные ранее виды ручных работ человека со сменным автоматизированным инструментом в естественных и экстремальных условиях.

Появление этого проекта вызвано длительным отсутствием кардинального решения актуальной проблемы в манипуляционной робототехнике и в протезостроении — ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЗАХВАТА НЕОРИЕНТИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНЫХ ФОРМ - связанной с проявлением физических законов нашей планеты - отсутствием проекций сил веса объекта в новых точках контакта до отрыва его от исходного положения, и обязательным их появлением (и других сил) в процессе манипулирования.

Поэтому манипуляционные возможности любого робота, связанные с захватом объекта, и сегодня успешно реализуются исключительно в узких пределах детерминированной среды, ранее созданной или осознанной человеком, что лишает робототехнику автономности в естественной недетерминированной среде.

Стратегия решения этой проблемы базируется на техническом моделировании единственного кардинального решения, реализованного Природой на живой материи – руке человека.

Основное отличие проекта по сравнению с известными решениями – применение обратной связи на *основе моделирования пространственного осязания руки человека на семантическом уровне,* что, в конечном итоге, позволяет прогнозировать надежность захвата любого объекта на основе оценки физической ситуации в системе”Кисть-Объект” аналогично малоосознаваемой, вынужденной и постоянной психической деятельности человека.

В целом кардинальное техническое решение актуальной проблемы представляет собой *дедуктивную логическую систему* с применением *псевдофизической логики,* использующей временные, пространственные каузальные отношения и отношения действий в информацион-

но управляемой модели процессов прогнозирования надежности захвата в условиях неопределенности с принятием и реализацией решения.

Применение относительной метрической шкалы (безразмерные отношения точек контакта в системе ”Кисть-Объект”) и топологической шкалы (секторы закрепощений виртуальных перемещений объекта в пространстве), а также модели предметной области (образ закрепощений виртуальных перемещений объекта) с формальным образным языком описания как междисциплинарных знаний, так и реальной физической ситуации в системе «Кисть - объект» позволяют использовать как реальные физические свойства и особенности внешнего физического мира (гравитационные, инерционные ускорения в векторном варианте, упомянутые парадоксальные исходные условия, в частности), так и особенности восприятия его человеком (стадии пространственного осязания руки в т.ч. с афферентным синтезом, аппарат предвидения результата действий, в частности) с целью *моделирования особенностей процессов познания в исходных неопределенных условиях - основы междисциплинарного, бионического и онтологического подходов* упомянутого кардинального решения.

Успешное применение целесообразных *функциональных принципов* двигательного акта руки человека с моделированием его функциональной системы захвата, в нашем случае, принимаемых в качестве *критериев достижения* целесообразного *функционального паритета* технических и биологических систем (в пределах границ общего класса решаемых задач), предопределяет степень *идентичности, например, их процессов самоорганизации аналогично процессам биологического аналога*, в т.ч. условий и особенностей формирования новых активных структур и функций технического исполнительного органа (вида захвата) по обеспечению надежности захвата в неопределенных исходных ситуациях.

В качестве одной из рекомендаций по проектированию – обеспечение безударности охвата неориентированного объекта - за счет разложения активных контактных сил, воздействующих на адаптивное захватное устройство, по заранее заданным осям, совместимыми с векторными компенсаторными звеньями размерных цепей его механизма.

3 Задачи интеллектуализации манипуляционной робототехники

Определены следующие *перспективные задачи* в области интеллектуализации манипуляционной робототехники на автономном уровне в т.ч. с применением систем технического зрения:

1) Развитие процессов *самоорганизации* в системах управления манипуляционными роботами, в т.ч. автоматизации выявления причин отрицательного прогноза и расчетов координат передислокации кисти робота в новую позицию.
2) Информационные процессы взаимодействия манипуляционных движений как отдельных пальцев кисти, так и рук роботов с системами технического зрения в автономном режиме при производстве сборочных, аварийно – спасательных и других работ.
3) Решение обратной задачи – определение в автономном режиме координат *зон точек контакта* неориентированных объектов сложных форм *в качестве такелажных точек*.
4) Расширение функциональных возможностей робототехники за счет совместного применения как пассивной, так и активной форм адаптации интеллектуальных захватных устройств.

Это принципиально отличается от разработанных на Западе образцов современных биопротезов и манипуляторов с ручным управлением – например, фирмы «Touch Bionics» (Шотландия), клиники Барселоны (Испания), Университета Дж. Хопкинса (США) и т.д., с управлением движениями пальцев кисти и всей руки от усиленных сигналов сенсоров, расположенных на коже культи и различных ее нервах или (и) вживленных в мозг чипов, и применяющих только *активную форму* адаптации пальцев (эфферентная связь) к форме и положению объекта, где оценка ситуации производится визуально с применением зрения пациента.

Зарубежные протезы и манипуляторы, безусловно, являются определенным достижением в области изучения эфферентных сигналов двигательного акта руки человека, *однако они лишены возможности афферентной связи, афферентного синтеза (как результатов пространственного осязания)* или их технических аналогов – важных звеньев биологической функциональной системы захвата человека – и как следствие – *лишены возможности оценки ситуации и прогнозирования надежности захвата с принятием решения в автономном режиме* на семантическом уровне, тем более в условиях ограничения видимости или ее отсутствия.

Поэтому пользователь этих протезов лишен ряда возможностей собственной биологической функциональной системы захвата, в том числе таких как *детерминирование* исходной физической ситуации в системе «Кисть - объект», *прогнозирование* надежности захвата на основе анализа тактильной полноценной информации (по афферентной связи) и ее оценки, что актуально в условиях ограничения или отсутствия прямой видимости.

В качестве другого примера – реализуемый сегодня проект антропоморфного робота (Япония) на основе функционального моделирования основных систем (в том числе и мыслительных возможностей) и органов человека, что сегодня представляет значительный интерес, прежде всего, как источник «запасных частей» человека. Однако возможное моделирование таких функций как *формирование потребностей в качестве основы целеположения в автономном режиме, так и функции самовоспроизведения (с применением уже существующих аддитивных технологий)* способны вывести проект за границы *этического императива.*

Следует также отметить, что использование методологии Современной Теории Катастроф [2] открывает возможность оценки перспективы масштабного применения любых технических мыслящих систем с возможным определением «скачка» динамических моделей катастроф в качестве «обратной» связи.

4 Области применения

4.1 Медицина, биология

- Гамма интеллектуальных протезов (в т.ч. интеллектуальные перчатки) для инвалидов рук с различными степенями ампутации, включая и инвалидов с парализованными руками,
- Спецманипуляторы для инвалидов ног (самообслуживание) - увеличение вылета центра кисти в 2 раза, например, увеличивает объем рабочей зоны в 8 раз.
- При выполнении такой деятельности как, например, управление автотранспортом (надежный захват руля при возможности одновременного управления им, тормозом и газом), проведение садовых работ (с заменой удобного инвентаря), участие в спортивных соревнованиях (как надежное удержание спортивного инвентаря с манипулированием, так и его замену в автономном режиме) обеспечивается физическая и психологическая реабилитация лиц с ограниченными физическими возможностями через осознание снижения их зависимости от внешней помощи.
- Модели биологических систем в биологии, психологии посредством моделирования мыслительных процессов на уровне подсознания, например, что позволяет выявлять закономерности этих процессов при достижении функциональной адекватности модели и ее биологического аналога.

4.2 Бытовая сфера

- Интеллектуальные кисти бытовых роботов, например, по уходу за больными – доставка, собирание и уборка использованной неориентированной посуды.
- Спецманипуляторы для проведения спортивных соревнований по сборке различных конструкций с выполнением разъемных и неразъемных соединений и применением сменного автоматизированного инструмента.

4.3 Космос

- Космические спецманипуляторы как новый инструментарий с изменяемыми длиной и линией вылета кисти для внекорабельной деятельности космонавтов при выполнении исследовательских, механосборочных в т.ч. разъемных и неразъемных соединений, ремонтных, аварийно-спасательных и др. видов работ с применением различного сменного автоматизированного инструмента в труднодоступных местах.
- Оснащение транспортных планетоходов спецманипуляторами с большим вылетом.
- Расширение перечня космических макрообъектов для их исследования и освоения (планеты типа Юпитер, Сатурн и т.д.), где недопустимо присутствие человека из-за значений их масс и др. условий.

4.4 Мировой океан

- Участие в технологиях проведения глубоководных безводолазных спасательных работ по обвязке стропами затонувших подводных объектов на базе использования необитаемых глубоководных микроаппаратов типа «Гном».
- 4.2.2 Оснащение манипуляторов вышеуказанных микроаппаратов адаптивными захватными модулями для отбора проб грунта на морском дне (песок любой дисперсности, мелкие камни, илистые отложения).
- Безударный надежный захват подводными манипуляторами неориентированных одиночных мин и снарядов на морском дне при разминировании с укладкой их в боксы.
- Участие в проведении ремонтных, геологических и археологических работ на больших глубинах с применением необитаемых глубоководных аппаратов и сменного автоматизированного инструмента.

4.5 Тематика МЧС

- Интеллектуальные кисти для оснащения экзоскелетов (для человека) типа моделей «HULC» (США) или «HAL» (Япония) со сменным инструментом при выполнении аварийных, спасательных, ремонтных и др. работ в труднодоступных условиях.
- Безударный захват неориентированных одиночных мин и снарядов при разминировании с укладкой их в боксы.

Заключение

Концентрация интеллектуальных и материальных возможностей нашей цивилизации на развитии творчества будущих поколений человечества с целью их совершенствования с применением процессов самопознания, самооценки и этического императива, позволит, наконец, покончить с многими негативными пороками, в т.ч. преодолеть пороги эгоистического мышления, материального накопительства, потребительского мышления, кастовых отношений. Это обеспечит, в конечном итоге, возможность реализации мечты о космических эрах, включая достижение состояния «лучистого человечества» в условиях возможных космических угроз, в чем создаваемые сегодня разнообразные технические «мыслящие» и «умные» системы будут нашими разумными помощниками.

Список литературы

[1] Сборник докладов, представленных на I Всесоюзных Федоровских чтениях, Комитет космонавтики ДОСААВ СССР, г. Боровск, 14-15 мая 1988 г., Москва – 1990 г.

[2] Нечаев Ю.И. Философские аспекты реализации проблем Современной Теории Катастроф в интегрированной динамической среде. Искусственный интеллект. ISSR 1561-5359, 2013 №3(61), с. 6-18, Национальная академия наук Украины, Донецк, 2013.

[3] Кацуро Я. Исследования антропоморфной механической руки с индивидуальными приводами на пальцах. Перевод ГПНТБ №78/42192, Япония, 1978.

[4] Irina Ezhkova. Self-organizating representations. Cybernetics and systems, An International Journal, Taylor, Francis Inc., 2005, 36, 861-875.

[5] Савельев С.В. Происхождение мозга. Москва. Веси. 2005.

[6] Судаков К.В. Рефлекс и функциональная система. Новгород, 1997.

[7] Колмогоров А.Н. Жизнь и мышление как особые формы существования материи. Сборник «О сущности жизни», Москва, Наука, 1964, с.52.

[8] Тимофеев А.И. Семиотическая основа процессов прогнозирования в неопределенных условиях. Материалы Десятой национальной конференции по искусственному интеллекту. 25-28 сент. Обнинск. Физматлит.2006.

[9] Тимофеев А.И. «Разумная» рука манипуляционных роботов – модель функциональной системы захвата предметов. (Монография –«Информационные модели информационных систем» под ред. К.В. Судакова, В.А. Викторова, РАМН, фонд «Новое тысячелетие», Москва, 2004.)

[10] Тимофеев А.И. О процессах самоорганизации технических систем в условиях неопределенности. Материалы 4-й Всероссийской мультиконференции 3-8 октября 2011, т.I с. Дивноморское, Россия.

[11] Тимофеев А.И. Об информационных моделях самоорганизации (на примере технической модели – системы захвата). Вестник Международной академии наук (русская секция). ISSN 18-5733 №1 Москва, 2005.

[12] A.Timofeev. Artificial intellectual hand: Capture reliability prognosis of non-oriented complex shape objects for manipulating robotics. EMCSR 2012 - European Meeting on Cybernetics and Systems Research, University of Vienna, 10-13 of April, 2012.

[13] Тимофеев А.И. О закономерностях онтологического подхода проекта «Искусственная разумная рука. Материалы XIV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» – ПУМСС-2012, ИПУСС РАН, Самара, 2012.

[14] A.Timofeev,V.Dmitrieva. The system of decision taking in indeterminate situations. 2th B.S. Lab. International Symposium «Systems Thinking for a sustainable economy», 23-24 January, 2014, Universitas Mercatorum, Rome, Italia.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ СООТВЕТСТВИЯ НАУКОЁМКОЙ ПРОДУКЦИИ ПРИОРИТЕТНЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ РАЗВИТИЯ НАУКИ, ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИКИ

М.В. Цапенко[1], М.Ю. Лившиц[2], А.Н. Давыдов[2]

[1]Институт проблем управления сложными системами РАН
443020 г. Самара, ул. Садовая, 61, Россия
E-mail: smirnov@iccs.ru
тел./факс: +7 (846) 333-27-70

[2]Самарский государственный технический университет
443010, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
E-mail: nich@samgtu.ru
тел: +7 (846) 278-43-16

***Ключевые слова**: структурная идентификация, многокритериальная оценка эффективности научных исследований, метод многокритериального сравнительного оценивания Data Envelopment Analysis, когнитивный анализ*

Abstract
The article describes the method of structural identification and quantification of the relationships of high technology products matching priority areas of science, technology and engineering. Considered the method to identify promising research on the basis of their consistency with the definition of nation-wide priority areas of science, technology and engineering.

Введение

В статье рассмотрен способ структурной идентификации и количественной оценки взаимосвязей соответствия наукоёмкой продукции приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники, предложена методика, позволяющая выявлять перспективные научные исследования на основе определения количественных оценок степени их соответствия общегосударственным приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники.

Количественная мера степени соответствия определятся на основе применения методологии когнитивного анализа и способа многокритериального оценивания Data Envelopment Analysis.

Рассмотренный способ структурной идентификации и оценки позволяет количественно определять степень соответствия наукоёмкой продукции приоритетным направлениям научных исследований и проводить их ранжировку.

Исследование проводится в рамках проекта РФФИ №14-08-01255А.

1 Методика идентификации взаимосвязей соответствия наукоёмкой продукции приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники

Структурную идентификацию соответствия наукоёмкой продукции приоритетам развития науки проведём с использованием методологии когнитивного анализа – построения когнитивных карт [1] и многокритериального оценивания – метода многокритериальной сравнительной оценки Data Envelopment Analysis [2].

Предположим, что предложение наукоёмкой продукции на рынке формируется научными коллективами, объединёнными той или иной организационной конструкцией. В качестве таких организационных построений могут выступать: высшие учебные заведения, территори-

альные инновационно-промышленные кластеры, сетевые организации, виртуальные корпорации, многомерные организации, круговые корпорации, интеллектуальные организации, образовательные учреждения, научные центры, бизнес-инкубаторы, инновационные парки и др. [3].

Спрос на производимую инновационную наукоёмкую продукцию будем структурировать в соответствии со сформулированными в настоящее время государственными приоритетами – восемью направлениями развития науки, технологий и техники [4].

Идентификацию структуры взаимосвязей, а также анализ степени соответствия наукоёмкой продукции и приоритетов развития науки будем осуществлять на основе методологии когнитивного анализа, предполагающей построение когнитивных карт [5], [6].

Рассмотрим пример взвешенной когнитивной карты с двумя узлами, определяющими условные научные приоритеты: «Приоритет 1», «Приоритет 2» и пятью научными коллективами НК1, НК2, НК3, НК4, НК5 – рисунок 1.

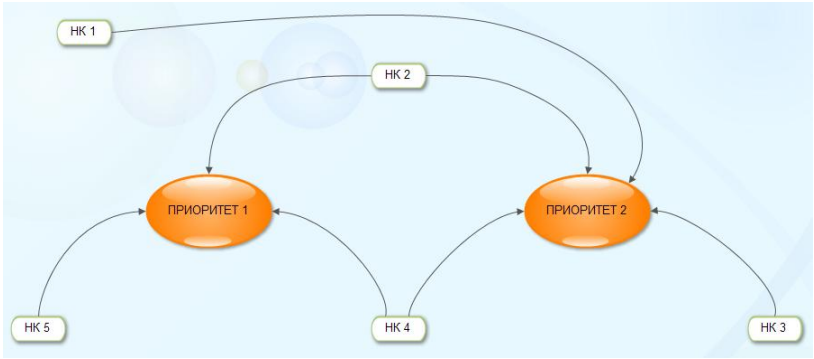


Рисунок 1 – Пример когнитивной карты

Ребра графа показывают взаимосвязи между результатами деятельности научных коллективов и приоритетами развития науки, определяющими спрос на наукоёмкую продукцию.

Как видно из представленной когнитивной карты по первому приоритету выполняют работы три научных коллектива, по второму – четыре, при этом два коллектива (НК2 и НК4) работают по обоим заявленным направлениям.

Такое представление взаимосвязей даёт качественную картину взаимодействий производителей наукоёмкой инновационной продукции и потребителей, структурированных подобным образом.

Для определения количественных оценок потенциалов производителей наукоёмкой продукции применим способ многокритериального сравнительного оценивания Data Envelopment Analysis [2], [7].

Учёт потенциалов научных коллективов проведём на основе взвешенных оценок, характеризующих интенсивность воздействий по соответствующему ребру орграфа и, таким образом, построим взвешенную когнитивную карту.

В качестве весовых коэффициентов возьмем показатели глобальной, обобщенной эффективности научных коллективов – DEA-оценки, которые формируются на основе частных показателей результативности их научной деятельности. В качестве таких локальных показателей эффективности могут выступать различные параметры увеличение которых определяет возрастание общей системной эффективности коллектива.

Ранее, в работе [8], нами была предложена система таких критериев: критерии, характеризующие публикационную активность коллектива (количество опубликованных монографий, статей, тезисов); количество защит и руководство диссертациями; объёмы выполняемых НИР, грантов, производства научно-технической продукции; показатели защиты интеллектуальной

собственности (патентование и лицензирование разработок); участие в научных мероприятиях; наличие связей с другими организациями и др.

Свертку разнородных частных показателей в глобальный результирующий критерий проведем на основе методологии DEA, позволяющей получать обобщенные оценки эффективности без использования информации о рангах (значимостях) частных разнородных критериев путем решения соответствующих задач математического программирования. Подробно численный алгоритм реализации DEA-модели рассмотрен в работах [9–11], разработанный программный комплекс свёртки защищён свидетельством о государственной регистрации программ [12].

Свёртка локальных показателей эффективности пяти условных научных коллективов на основе DEA-модели дала следующие результаты – таблица 1.

Таблица 1 – DEA-оценки сравнительной эффективности научных коллективов

№ п/п	Индекс научного коллектива	DEA-оценка
1	НК1	0,5860
2	НК2	1,0000
3	НК3	0,2698
4	НК4	0,8960
5	НК5	1,0000

Эти оценки будут определять веса на взвешенном орграфе, отвечающем когнитивной карте – рисунок 1.

Величину вклада и степень соответствия результатов деятельности научных коллективов приоритетам развития науки будем характеризовать двумя базовыми показателями: научным уровнем приоритета B_i и научным потенциалом коллектива P_i.

Научный уровень приоритета будем определять как среднюю величину DEA-оценок эффективности N ветвей орграфа, входящих в соответствующий *i-ый* приоритет когнитивной карты:

$$B_i = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} DEA(HK_n^i),$$

где $DEA(HK^i_n)$ – обобщённый критерий эффективности научного коллектива f_n.

Отметим, что сумма DEA-оценок всех коллективов, принимающих участие в работах по *i-му* приоритету определяет интегральный научный уровень этого приоритета – $B_{i\sum}$.

Потенциал научного коллектива для обеспечения *i-го* приоритета будем определять суммарным вкладом эффективностей коллективов, работающих по соответствующей проблематике, взятых с учётом доли участия коллектива в работах по другим приоритетам:

$$P_i = \sum_{n=1}^{N} \frac{1}{M_n} DEA(HK_n^i),$$

где M_n – число приоритетных направлений, по которым выполняются исследования в *n-ом* научном коллективе;

$DEA(HK^i_n)$ – обобщённый критерий эффективности научного коллектива f_n.

Также введём дополнительный показатель, позволяющий проводить сопоставление потенциалов различных коллективов, нормированный потенциал научного коллектива:

$$P_i^{\text{НОРМ}} = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^{m} P_i},$$

где m – общее число научных приоритетов.

Построим когнитивную карту условного примера, учитывающую DEA-оценки научных коллективов – рисунок 2.

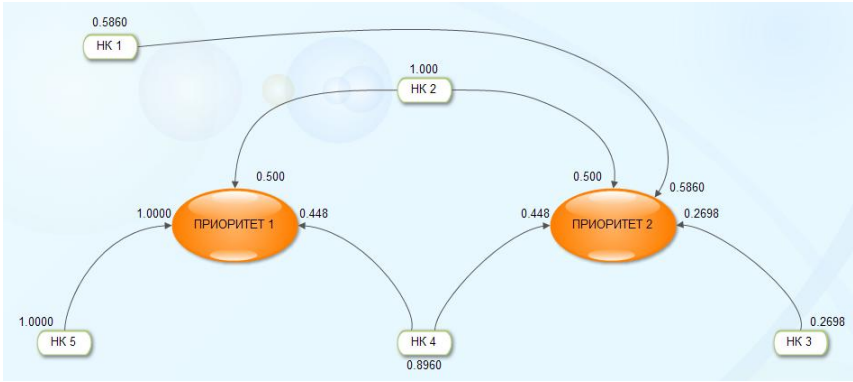


Рисунок 2 – Взвешенная когнитивная карта

Для расчёта показателей соответствия (1)–(3) представим графический образ соответствий – когнитивную карту – в форме матрицы, где строки будут соответствовать научным коллективам, столбцы – приоритетам, а в их пересечениях будут указываться оценки передаваемых потенциалов – DEA-оценки научного коллектива, отнесённые к числу приоритетов по которым работает данный коллектив – таблица 2.

Одновременно в этой таблице отразим результаты расчётов показателей (1)–(3).

Таблица 2 – Матрица соответствий коллективов и приоритетов

Коллективы/показатели	DEA-оценка потенциала научного коллектива	Число приоритетов, реализуемых коллективом	Оценки передаваемого потенциала	Приоритет 1	Приоритет 2
Порядковый номер приоритета				1	2
НК1	0,5860	1	0,5860		0,5860
НК2	1,0000	2	0,5000	0,5000	0,5000
НК3	0,2698	1	0,2698		0,2698
НК4	0,8960	2	0,4480	0,4480	0,4480
НК5	1,0000	1	1,0000	1,0000	
Потенциал научных коллективов по приоритету (P_i)				1,9480	1,8038
Нормированный потенциал научных коллективов по приоритету ($P_i^{НОРМ}$)				0,5192	0,4808
Количество коллективов, задействованных по приоритету (n)				3	4
Интегральный научный уровень приоритета (B_{iN})				2,8960	2,7518
Научный уровень приоритета (B_i)				0,9653	0,6880

Как видно из данных таблицы 1 первый приоритет имеет превосходящий в 1,4 раза научный уровень, при этом потенциал научных коллективов по этим приоритетам примерно одинаков, с небольшим превышением потенциала у первого приоритета.

Анализ полученных показателей позволяет выявить степень соответствия предложения наукоёмкой инновационной продукции приоритетам развития научных исследований и провести их ранжировку.

Проведём апробацию методики на конкретном примере.

2 Оценки соответствия наукоёмкой продукции приоритетным направлениями развития науки, технологий и техники

Проведём апробацию методики идентификации взаимосвязей соответствия наукоёмкой продукции приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники на реальном примере научной деятельности коллективов крупного регионального высшего учебного заведения.

Анализ тематики исследований 45 научных коллективов этого учебного заведения позволил выделить из общей совокупности 35 коллективов, работающих по 8 приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники.

Когнитивная карта, структурно идентифицирующая анализируемые взаимосвязи, представлена на рисунке 3.

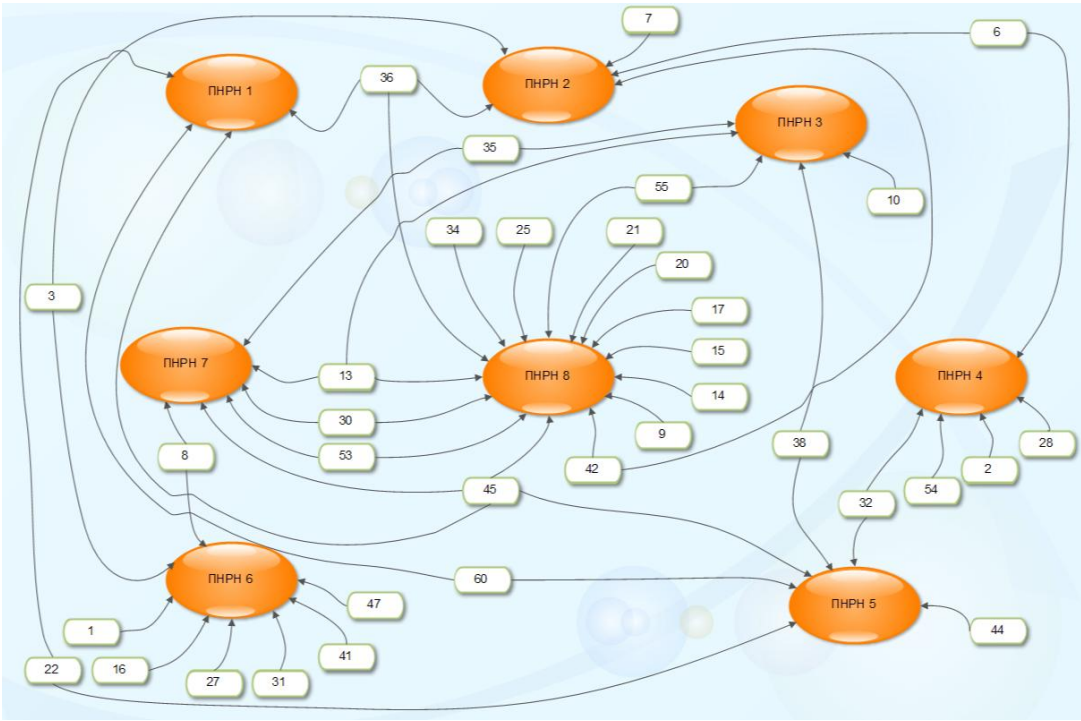


Рисунок 3 – Когнитивная карта соответствия наукоёмкой продукции приоритетным направлениями развития науки, технологий и техники

Из когнитивной карты, представленной на рисунке 3, видно, что один коллектив – НК45 – одновременно работает по четырём научным направлениям, два коллектива (НК13 и НК36) работаю по трём направлениям и 12 коллективов одновременно работают по двум направлениям, остальные 20 коллективов имеют связи только с одним из научных приоритетов.

Также содержательные анализ показал, что большинство (15 из 35 или 43%) коллективов работают по приоритету «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» (ПНРН 8), восемь коллективов принимают участие в работах по приоритету «Рациональное природопользование» (ПНРН 6), по шесть коллективов участвуют в приоритетах: «Перспективные виды вооружения, военной и специальной техники» (ПНРН 5) и «Транспортные и космические системы» (ПНРН 7), по пять коллективов работают в направлениях: «Индустрия наносистем» (ПНРН 2), «Информационно-телекоммуникационные системы» (ПНРН 3) и

«Науки о жизни» (ПНРН 4), четыре коллектива работают по одному направлению – «Безопасность и противодействие терроризму» (ПНРН 1).

Для расчёта количественных показателей соответствия построим матрицу соответствий коллективов и приоритетов аналогичную таблице 2, а результаты расчёта показателей степени соответствия представим в таблице 3.

Таблица 3 – Показатели соответствий коллективов и приоритетов

Показатели	Безопасность и противодействие терроризму	Индустрия наносистем	Информационно-телекоммуникационные системы	Науки о жизни	Перспективные виды вооружения, военной и специальной техники	Рациональное природопользование	Транспортные и космические системы	Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика
Порядковый номер приоритета	1	2	3	4	5	6	7	8
Потенциалы научных коллективов по приоритету (P_i)	1,4393	2,2716	2,6366	2,7769	3,0074	5,6528	2,3532	9,5117
Нормированные потенциалы научных коллективов по приоритету ($P_i^{НОРМ}$)	0,0485	0,0766	0,0889	0,0937	0,1014	0,1907	0,0794	0,3208
Количество коллективов, задействованных по приоритету (n)	4,0000	5,0000	5,0000	5,0000	6,0000	8,0000	6,0000	15,0000
Интегральный научный уровень приоритета ($B_{i\Sigma}$)	3,6919	3,8565	4,8066	3,6582	5,5148	6,4739	5,5464	12,9687
Научный уровень приоритета (B_i)	0,9230	0,7713	0,9613	0,7316	0,9191	0,8092	0,9244	0,8646

На диаграмме рисунка 4 отобразим нормированные потенциалы научных коллективов по научным приоритетам, характеризующие предложение на рынке инновационной наукоёмкой продукции – результаты деятельности научных коллективов.

Из данных, представленных на диаграмме рисунка 4 видно, что максимальное предложение (32%) на рынке наукоёмкой продукции характерно для восьмого приоритета «Энергоэффективность …», также большое предложение наблюдается в сегменте шестого приоритета «Природопользование …», а самый минимальный уровень предложения (5%) имеет первый приоритет «Безопасность и противодействие терроризму».

Проанализируем структуру спроса, которая представлена на диаграмме, изображённой на рисунке 5.

Как видно из данных, представленных на диаграмме рисунка 5 структура спроса по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники имеет равномерное распределение среди приоритетов – в среднем по 13%.

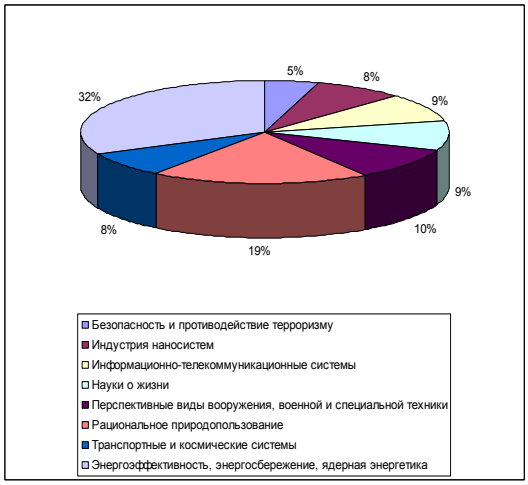


Рисунок 4 – Нормированные потенциалы рыночного предложения

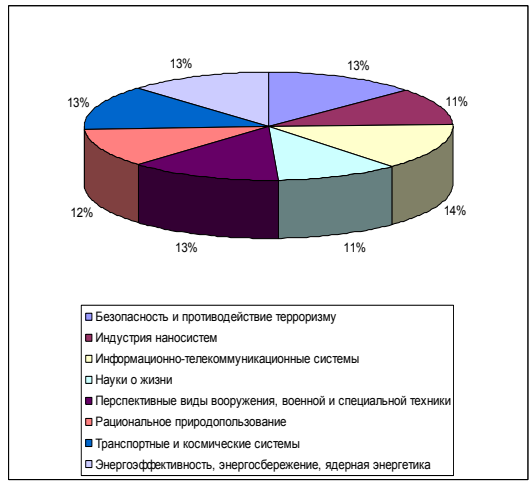


Рисунок 5 – Оценки рыночного спроса на наукоёмкую продукцию

Сопоставим спрос и предложение на рынке. Отметим существенное превышение в 2,5 раза предложения над спросом на наукоёмкую продукцию в сегменте энергосбережения (предложение – 32%, спрос – 13%), а также превышение предложения по приоритету «Рациональное природопользование» в 1,6 раза.

Одновременно с эти наблюдается недостаточный уровень предложения в сегменте приоритета «Безопасность и противодействие терроризму» (спрос – 13%, предложение – 5%).

При этом наиболее сбалансированной является структуры спроса и предложения в сегменте наук о жизни – 11% и 9%, соответственно.

Эти сопоставления позволяют определить стратегические направления развития научных исследований и провести корректировки существующих тем.

Заключение

В рамках исследования предложена методика идентификации взаимосвязей соответствия наукоёмкой продукции приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники, построены когнитивные карты взаимосвязей на рынках инновационной наукоёмкой продукции.

В основу предложенной методики были положены существующие, широко распространённые методы системного анализа и структурного моделирования.

Проведена систематизация исходной статистической информации о параметрах рынка наукоёмкой продукции на основе которой предлагаемые модели были апробированы.

Разработанные модели позволили провести идентификацию взаимосвязей между научно-техническими заделами и потребностями реального сектора экономики в инновационной продукции по предложенной системе критериев соответствия для крупного регионального вуза.

Список литературы

[1] Eden C. Cognitive Mapping // European Journal of Operational Research. –1988. – Vol.36. – P.1-13.

[2] Farrel M.J. The Measurement of Productive Efficiency // Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General), Vol. 120, Part III, 1957, 253 – 281 p.

[3] Серпер Е.А. Современные формы организации инновационной деятельности // Российское предпринимательство. — 2011. — № 2 Вып. 2 (178). — с. 33-36. — http://www.creativeconomy.ru/articles/11616.

[4] «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации» Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899.

[5] Боумен У. Графическое представление информации. -М.: «Мир», 1971. - 150 с.

[6] Кузнецов О.П., Кулинич А.А., Марковский А.В. Анализ влияний при управлении слабоструктурированными ситуациями на основе когнитивных карт // Человеческий фактор в управлении. – М.: КомКнига, 2006.

[7] Дилигенский Н.В., Цапенко М.В., Давыдов А.Н. Методология анализа, многокритериального ранжирования и нормирования показателей обобщённой эффективности научных исследований // РАН, СНЦ РАН, ИПУСС Труды XV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара, 25–28 июня 2013. (с. 112 – 124)

[8] Дилигенский Н.В., Цапенко М.В., Давыдов А.Н. Иерархическая система обобщённых характеристики эффективности научных исследований // Стратегическое планирование и развитие предприятий. Секция 2. / Материалы Четырнадцатого всероссийского симпозиума. Москва, 9-10 апреля 2013 г. Под ред. чл.-корр. РАН Г.Б. Клейнера. – М.: ЦЭМИ РАН, 2013 г. (с. 61 – 63).

[9] Дилигенский Н.В., Цапенко М.В., Давыдов А.Н. Системный анализ вклада научно-технической деятельности в развитие технологических платформ // Вестник Самарского государственного технического университета №2 (34), серия «Технические науки», Самара, 2012 год (с. 19 - 26)

[10] Дилигенский Н.В., Цапенко М.В., Давыдов А.Н., Барболин Д.А. Программно-аналитический инструментарий для многокритериального оценивания эффективности научных исследований // Вестник Самарского государственного технического университета №4 (36), серия «Технические науки», Самара, 2012 год (с. 39 – 45).

[11] Лившиц М.Ю., Цапенко М.В., Давыдов А.Н. Метод оценки соответствия наукоёмкой продукции приоритетным направлениям научных исследований // Стратегическое планирование и развитие предприятий. Секция 2. / Материалы Пятнадцатого всероссийского симпозиума. Москва, 15-16 апреля 2014 г. Под ред. чл.-корр. РАН Г.Б. Клейнера. – М.: ЦЭМИ РАН, 2014 г. – с. (с. 126 – 129).

[12] Барболин Д.А., Барболина С.А., Давыдов А.Н., Цапенко М.В. Многокритериальная DEA-оценка эффективности научных исследований // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013617531, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 19.08.2013 г.

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОПИСАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО СОЗНАНИЯ СУБЪЕКТА И ТИПОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУБЪЕКТОВ В ГРУППЕ.

Л.Л.Чекалов

ООО «Транс-Мобил Спедишн»

443030, Самара, Желябова д.3-45, Россия
ltrans777@mail.ru
тел: +7 (963) 115-00-77

Ключевые слова: *сознание, информация, взаимодействие субъектов, информационная эволюция сознания*

Abstract

To create the theory of intersubjective control, it is necessary to make a description of two interrelated objects: 1) subjects' informative types of consciousness in groups; 2) generic interaction pattern consciousness in groups of subjects. One of the main principles of description consciousness of subject and generic interaction pattern has to be evolutionary and historical approach. For this description you need to choose items that can effort to make an enough clear description as to the current state of these objects and to their evolutionary and historical changes. As the result, there will be an opportunity to consider various types' combinations of consciousnesses in different schemes of interrelated consciousness in groups of subjects.

Введение

Для построения теории интерсубъективного управления необходимо сделать описание двух взаимосвязанных объектов:

- информационных типов индивидуального сознания субъектов;
- обобщенных схем взаимодействия в группах субъектов.

Одним из основных принципов описания сознания индивидуального субъекта и обобщенных схем взаимодействия должен быть эволюционно-исторический подход. В противном случае мы получим описания, действующие в ограниченный исторический период и не дающие основного научного результата любого исследования – прогноза изменения сознания субъектов и схем их взаимодействия.

Следующей проблемой описания является выбор понятий, позволяющих сделать достаточно адекватное описание как текущего состояния этих объектов, так и их эволюционно-исторические изменения. При выборе набора понятий нужно совершенно четко понимать, что неадекватный набор выбранных понятий и отношений между ними будет в дальнейшем сильно влиять и ограничивать возможности описания и нашего понимания объектов.

Известный астрофизик А. Эддингтон предложил аналогию, которую затем не раз использовал К.Поппер: “Теория – это сеть, которую мы забрасываем в мир. Все, что мы выловим в океане природы этой сетью – это и есть предмет теории.” Остальное может остаться незамеченным.

Таким образом, очень часто мы «видим» в объектах только то, что мы заранее предполагали и хотели увидеть в рамках существующей научной картины мира или гипотезы.

В итоге появится возможность рассматривать различные сочетания типов сознаний в различных схемах групп субъектов.

Сначала хотелось бы сделать описание индивидуального субъекта и его свойств.

1 Субъект, его внешнее и внутреннее пространство, и многослойность материи

Во первых, хотелось бы отметить, что к фундаментальному свойству материи можно отнести её многослойность. Бесконечность материи проявляется как в пределах одного слоя, так и в количестве слоев. Каждый слой имеет свои особенности реализации физических законов. Существуют законы, общие для всех слоев, в различные времена по разному называемые, и дошедшие до наших дней в виде законов философии. В процессе эволюционных изменений при переходе материи от неживой к живой материи животного мира и в последующем к человеку можно представить многослойность материи в виде нескольких слоев, имеющих между собой определенные различия.

Рисунок 1 - Многослойность внешнего и внутреннего пространства

Названия слоям даны с некоторой степенью условности. Также нужно уточнить, что в научной традиции три верхних слоя на Рисунке 1 в данный момент чаще всего относят к функции физического слоя, а в религиозной традиции три верхних слоя обладают своей субстанциональностью со своими механизмами (законами) взаимодействия и реализации причинно-следственных связей. Процесс реализации действия у человека в физическом слое всегда проходит через слой сознания как переход от физической информации к психической и соединение психической информации о текущей ситуации с прошлым опытом, а потом идет реализация принятия решения в физический слой. В религиозных традициях понимания реальности слой сознания также субстанционален, как и физический слой, и причины созданные на уровне мысли или чувства на уровне сознания будут иметь тоже свои следствия и на этом же уровне и на физическом.

Если рассматривать эти четыре слоя с научных позиций, то к физическому слою можно отнести органическую и неорганическую материю, к психическому слою те свойства отличающие функционально органическую материю животного мира от неорганической материи, и к слою сознания можно отнести те особенные функциональные свойства человека (имеющего физическое тело сходное по свойствам с животным, с таким же составом органов и их функциональным назначение, сходное ДНК), отличающие его от животного мира.

Конечно же нужно понимать, что между слоями существуют переходные состояния и не всегда можно абсолютно точно провести между ними границу. С другой стороны, мы видим, что при переходе из слоя в слой у материи возникают дополнительные функциональные возможности. Оставаясь на существующих в данный период научных позициях рассмотрим основные функциональные различия материи между слоями, которые можно описать с помощью

категорий *материя, энергия, информация, пространство, движение, время, управление, форма*.

Объекты неживой материи осуществляют свое движение в пространстве-времени на основании законов физики (или реализации свойств энергии в соответствии с законами (законы описывают управление движением) физики). Форма (объект или поток) неживой материи не управляет собственным движением в пространстве-времени.

В слое психической эволюции живой материи животного мира мы видим, что живая материя совершенствует управление движением собственной формы для реализации движения этой формы во внешнем пространстве вопреки действию законов физики на основе перехода от физической *информации* о внешнем пространстве к психической информации. Камень не может забежать на гору и не может получить и использовать информацию о том, что на горе прыгает мышка, которую можно съесть.

В слое эволюции сознания человек, выходя из животного состояния, уже умея управлять материей своей формы (внутреннего пространства) для движения, учится управлять своей формой для активного изменения материи внешнего пространства, начиная с управления кистью руки [1]. Это управление материей внешнего пространства сегодня превышает на порядки простую потребность выживания человечества и даже начинает угрожать его существованию. Но научившись управлять рукой, а точнее своим вниманием (или осознанностью) в процессе обучения управления рукой, и видя внешний результат этого управления, человек получил *возможность* ***управления*** *функциями психического и сознания.* Все действия человека направленные на изменение материи внешней среды в своей сути тренировали его способность к концентрации внимания (осознанности) на одном действии или объекте в течение длительного времени. Сложность удержания внимания на одном объекте длительное время каждый может проверить на себе.

2 Внимание субъекта и осознание настоящего времени

Что же такое внимание и каковы его характеристики?

Во первых, мы ощущаем «жизнь» и материю внутреннего и внешнего пространства только в пространственных и временных пределах нашего внимания. Это осознанное внимание имеет у человека вполне определенные пространственные, временные характеристики и характеристики движения. В работе К.Анохина [2] показано, что для формирования ощущения осознанности на данном этапе эволюции человека необходимо возникновение устойчивого циклического возбуждения (реверберации) между двумя зонами коры головного мозга – зоной, принимающей физическую информацию о материи внешнего пространства от органов чувств и зоной памяти, которая содержит и физическую и психическую информацию, связанную с поступающей физической информацией (Рисунок 2). Поэтому мы видим не цветные пятна физического уровня восприятия, а означенные психически предметы. Время, необходимое для создания такого циклического возбуждения равно около 200-400 миллисекунд. За это время осуществляется субъектом неуправляемый им перевод информации с физического уровня на психический. По этой причине мы «видим» окружающий мир с некоторой задержкой на те же 200-400 миллисекунд. Это и есть реальный *диапазон «настоящего» времени* у субъекта человеческого этапа эволюции. Косвенно, немного в другом временном диапазоне, с этим связана и способность воспринимать покадровый показ слайдов в виде непрерывного кино (у человека 24 кадра в секунду создают ощущение непрерывности изменения изображения, у мухи для этого необходимо уже 300 кадров в секунду). Если физически событие меньше этого времени, то скорее всего оно не попадет в наше осознание и останется как бы информационно незамеченным. Таким образом, осознанность связана с определенными временными свойствами скорости сравнения поступающей от органов чувств информации с памятью.

Кстати у ранних форм живой материи, в частности у мух, зрительное восприятие фиксирует более короткие по времени события, но с гораздо меньшим разрешением (дискретностью).

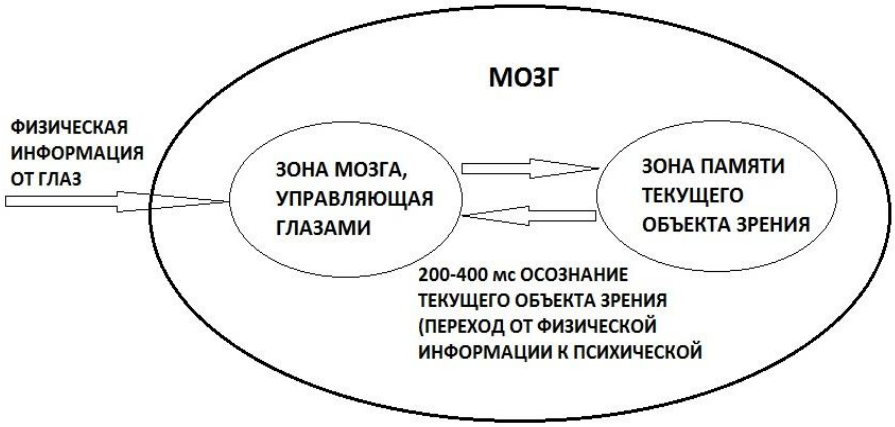


Рисунок 2 – Схема процесса осознания Значений Внешнего пространства.

В художественной литературе есть очень интересный рассказ Тургенева «Разговор» [3] о беседе двух горных вершин, для которых осознание одного кадра внешнего пространства происходит раз в тысячу лет. *Диапазон «настоящего» времени* составляет “наших” 1000 лет. Соответственно в осознание попадают события и объекты только с тысячелетним периодом физического присутствия. Это наводит на мысль о том, каким будет восприниматься мир, если время перехода информации органов чувств из физической в психическую будет 10 000 лет, 1 000 000 лет?

Время сравнения информации органов чувств и информации памяти можно назвать единицей времени внимания (кадра осознанности) для данного вида субъектов живой материи. Таким образом, *единица времени внимания вида субъектов* есть минимальная длительность события при котором это событие переводится субъектом из физической информации в психическую, т.е. осознается.

Исходя из наличия единицы времени внимания можно сказать, что любой субъект живой материи планирует свое поведение (движение) исходя из прошлых событий внешнего пространства в диапазоне единицы времени внимания. Разные временные периоды осознанности (или внимания) в процессе эволюции так же давали определенные преимущества или недостатки в борьбе субъекта за выживание. Например, человек только делает замах, а муха уже улетает. Для неё это движение длится уже слишком долго в единицах времени её внимания и она спокойно успевает среагировать. Наверное, можно говорить о наличии у каждого вида субъектов живой материи своей единицы времени осознанности (внимания), соотнесенной с периодом планетарного вращения (день, год) и с размерами и скоростями движения собственной формы.

Временной параметр осознанности восприятия (единица времени внимания) живой материи наряду с *пространственными размерами формы* и *скоростями движения формы в пространстве* в сравнении со скоростями движения других объектов и субъектов тоже создает определенные условия выживания вида субъектов.

Другим параметром осознанности (внимания) может быть *информационная емкость внимания* в единицу времени внимания для данного вида субъектов. Косвенно эта емкость связана с площадью возбуждения коры головного мозга субъекта. И это расширение фиксируется на физиологическом уровне. В состоянии обычной активности сознания субъекта томограф

фиксирует очаговое возбуждение отдельных участков коры головного мозга. При переходе к рисованию активность коры головного мозга охватывает гораздо большие участки, что увеличивает информационную емкость внимания и обеспечивает более широкое, целостное и непрерывное восприятие мира.

Видимо для рисования нужна увеличенная информационная емкость внимания, связанная с увеличением физического пространства внимания.

В связи с тем, что наше ощущение жизни, управление телом и умственная деятельность ограничена этой единицей времени внимания, то от того насколько расширено или сужено внимание зависит *степень фрагментарности восприятия мира.* Чем более узкое внимание, тем меньше его информационная емкость в единицу времени внимания и тем более фрагментарной (дискретной) будет текущая «картина» мира.

Фрагментарность восприятия усложняет осознание целостных непрерывных взаимосвязей между фрагментами. Представьте пазлы одной картины разбросанные на столе. Смысл изображения на каждом пазле не соответствует и даже в чем-то искажает смысл всей картины. Если говорить только о научном знании, то сейчас фрагментация достигла такой степени, что с одной стороны, невозможно осмыслить и попытаться нарисовать целостную картину научного знания, а с другой, возникает серьезное расхождение между терминологией (знаками) и смыслами (значениями) этих терминов даже в рамках одного научного направления.

3 Соотношение Знака и Значения во внешнем и внутреннем пространстве субъекта

Теперь можно перейти к рассмотрению соотношения знака и значения. В аналитической философии обычно рассматривается семантический треугольник Г.Фрегге Знак-Значение-Смысл [4]. В данной работе смысл рассматривается просто как функция субъекта живой материи по адекватному соотнесению знака и значения, сформированной и совершенствующейся в процессе эволюции по принципу естественного отбора – неадекватность работы этой функции уменьшает шансы на выживание.

Также обязательно нужно учитывать, что форма субъекта разделяет пространство на внутреннее и внешнее по отношению к самому субъекту и соотношение Знак-Значение имеет различный смысл во внутреннем и внешнем пространстве субъекта (Рисунок 3).

Группу Значений1 ВНЕП образуют объекты и потоки (процессы) физического слоя материи. Соответственно Значения1 ВНУП это субъективные образы, прошедшие через органы чувств и интерпретированные в внутреннее представление, а также комплекс качественных и количественных характеристик материи этих объектов, который становится научным знанием при его выражении в Знаках1 ВНЕП. Научный Опыт – знаковое описание и применение (смысл по треугольнику Г.Фрегге) значений при совершении действий во внутреннем или внешнем пространстве с пониманием их последствий (понимание следствий при создании определенной причины). Т.е. знание не просто знаковое описание закономерностей, но и опознание их в реальном мире и возможность применения этих знаний.

Значение1 ВНЕП бесконечно для познания субъектом, если не принимать во внимание тот фантастический момент, когда субъект сам сможет создать идентичное Значение1 ВНЕП. На этом бесконечность исчерпывается и познание Значения1 ВНЕП заканчивается. Значение1 ВНЕП будет равно Значению1 ВНУП и Значение1 ВНУП из субъективного образа становится объективным.

Группу Значений2 ВНУП образуют наши субъективные ощущения радости, горя, вкусовые и т.п. ментальные (сознание), витальные (психическое), физические, значений которых нет в «чистом» виде во внешнем пространстве.

Рисунок 3 - Знак и значение во внешнем и внутреннем пространстве субъекта

Коммуникация субъектов, включающая передачу информации и управление, требует перехода от Значений 1 и 2 ВНУП во внешнее пространство к Знакам 1 и 2 ВНЕП и через них передается информация другим субъектам. На данном этапе эволюции у субъектов нет возможности для взаимопонимания и управления друг другом обмениваться субъективными Значениями 1 и 2 ВНУП. В связи с этим используются объективные для всех субъектов Знаки1 ВНЕП для Значений1 ВНУП и ВНЕП. Но знаки сами по себе без субъектов и объектов не несут, в данный момент эволюции, в себе значений.

Знаки2 ВНЕП для выражения во внешнем пространстве Значений2 ВНУП больше связаны с художественным творчеством, с музыкой, с живописью, когда субъект свои ощущения переносит в музыкальное произведение или на холст (одно из направлений живописи так и называется «импрессионизм») и субъект, имеющий сходный жизненный опыт, получает от этих Знаков2 ВНЕП сходные Значения2 ВНУП. Художественное творчество имеет свои закономерности и в данной статье в дальнейшем мы не будем его касаться, остановившись на рассмотрении соотношения Знаков1 и Значений1.

Отсюда можно сделать такие определения:

Знак – это присваивание определенного одного фрагмента восприятия органов чувств (изображение, звук,…) или действия, объединяющего разно качественный опыт, по какому-либо признаку, в одно качественный опыт (значение).

Значение – объект (или процесс (поток)) воздействия на субъекта *внешнего пространства* (физическая информация) или совокупность ощущений - опыта (психического, сознательного, духовного) или комплекса знаковых описаний (уровня сознания), принадлежащих *внутреннему пространству* (психическая информация).

В дальнейшем мы будем рассматривать Знаки1 ВНЕП и Значения1 ВНУП и ВНЕП. Виды Значений1 можно разделить на одно качественные, для которых существуют однозначные количественные характеристики, и много качественные, которые не имеют однозначных количественных характеристик, и даже не имеют однозначных качественных соотношений (Рисунок 4).

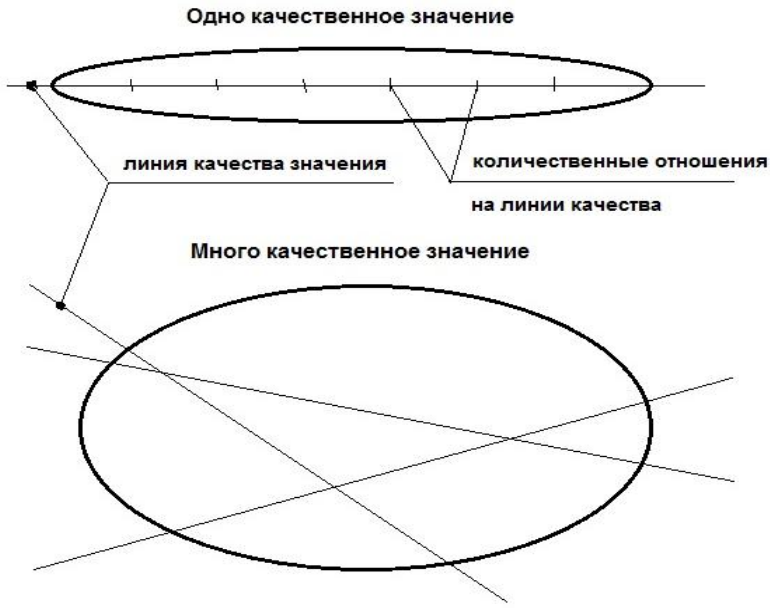


Рисунок 4 – Одно качественные и много качественные значения

Качественные соотношения таких понятий имеют большую субъективность в научном познании. Например, понятия материи, энергии, информации слишком много качественны, чтобы иметь однозначное количественное измерение. Поэтому такие сложности вызывает в физике формулирование общей теории для макро- и микро- мира в единой системе знаков и значений.

Знаки1 связанные с одно качественными значениями1 в интерсубъективном общении приводят в основном к однозначному взаимопониманию субъектов. Такими знаками и значениями стараются пользоваться в естественных науках и математике для постоянной объективной количественной проверки соотношения значений. Но знаки, связанные с много качественными значениями, однозначной количественной оценке не поддаются и зависят от расширения субъективного опыта. Соотношением таких значений занимается сознание субъекта и здесь знание становится в большей мере субъективным. Много качественность знаков и значений связана не только с необходимостью выражать более верхние в структуре описания знаки и значения через нижние, но и с развитием познания и уявлением со временем новых качеств у уже исследованных явлений. Особенно сильно это проявляется общественных науках и философии. И здесь можно отметить интересное различие между естественными науками и философией: если в естественных науках мы видим выделение новых значений и новых соотношений между значениями стремительно меняющие наш внешний мир и создающее ощущение движения познания вперед, вширь и вглубь, то в философии создается ощущение, что написанное знаками тысячи лет назад не понято в их значении до сих пор. Сложные много качественные значения философии закрывающие всё пространство мира осваиваются индивидуально и субъективно до сих пор. И никакого «нового» знания в философии не создается. Осуществляется лишь субъективное расширение значений сознания.

Способ построения структуры знаков и значений в науке имеет иерархически-сетевую форму, в которой в нижней части расположены одно качественные знаки и значения, которые имеют количественное измерение. Вверх по иерархической структуре знаки и значения приобретают много качественность через знаки и значения нижних уровней и тоже получают свое количественное измерение (Рисунок 5).

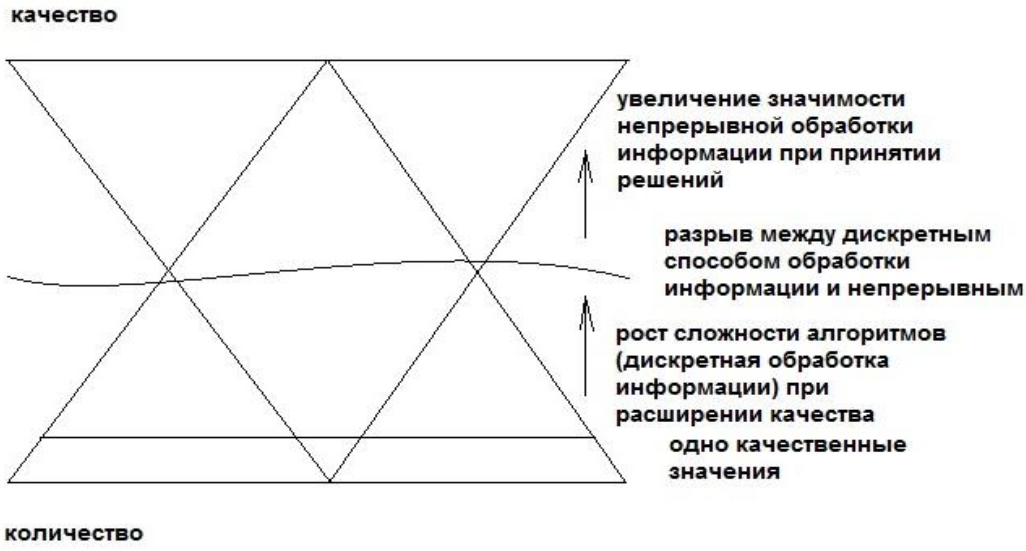


Рисунок 5 – Переход от одно качественных к много качественным значениям

Теоретически существует возможность прийти к знаку и значению единой вершины иерархии, которое можно вычислить количественно. А.Энштейн интересовался построением единой физической теории, связывающей знаки и значения физики в одну структуру. Но до сих пор не получается связать описание микро и макро мира. Будет ли когда-нибудь это сделано? Возможно. Но тогда мы снова выйдем за границы микро и макро мира и прикоснемся к новому слою бытия и опять заново придется искать соединение структур знаков и значений. Но не нужно забывать, что описания физики – это описание явлений физического слоя, а что делать с описанием других слоев (психики, сознания, духовного)?

И хочется обратить внимание на два способа обработки информации сознанием – дискретный и непрерывный (***раздел 7 данной статьи***). Дискретный способ обработки информации – это и есть вся наша наука - правила (законы, алгоритмы), которые описаны структурами знаков и значений и отношениями между ними. А непрерывный способ обработки информации – это и есть источник откуда взялась наша наука. И непрерывная обработка информации сознанием справляется с пониманием много качественных знаков и значений и пониманием отношений между много качественными понятиями. Хотя это понимание в большей мере субъективно, т.к. в непрерывной обработке информации отсутствует алгоритмическая часть. Она может отсутствовать и после завершения непрерывной обработки информации из-за огромной сложности требуемого алгоритма. Например, обработка много качественной зрительной информации алгоритмически до сих пор несмотря на усложнение алгоритмов и рост быстродействия компьютеров так и не может приблизиться к возможностям сознания. Хотя современная алгоритмическая одно качественная обработка зрительной информации создает иллюзию решения этой проблемы.

Эту проблему перехода от физики и алгоритма к сознанию формулирует Р.Пенроуз в работе [5], хотя и не дает ответа на вопрос. Графически эту ситуацию можно отобразить приблизительно так: на рисунке 5, поднимаясь вверх от одно качественных знаков и значений, мы получаем рост сложности алгоритмов для качественного и количественного выражения знаков и значений более высокого уровня. И с какого-то момента возникает колоссальный рост сложности алгоритмов, накладывающихся друг на друга и мы получаем, не добравшись до вершины иерархии, невозможность дальнейшего алгоритмического решения для более высоких слоев. Возникает разрыв между дискретным способом описания (фрагментарным) и обработки

информации (алгоритмическим) и непрерывным способом восприятия и обработки информации субъектом. И дальше выше линии разрыва, на данном этапе развития науки, по иерархии знаков и значений субъект переходит на эволюционно отработанную непрерывную обработку информации. В верхней части пирамиды количество знаков «уменьшается», а значения «расширяются» и «понять» это пока может только сознание субъекта. Конечно же рисунок 5 можно нарисовать не в плоскости, а в объеме, но это может усложнить понимание сути проблемы. А с другой стороны, мы прекрасно понимаем, что с повышением уровня иерархии знаки и значения становятся всё более много качественными и если существует единая вершина для такой объемной иерархии, то она соберёт все качества нижних слоев.

4 Способы формирования полной структуры значений и знаков.

Выделение значений из многообразия явлений (объектов и потоков) основано на установлении различий между явлениями и это структурирует значения и позволяет присваивать им знаки.

Последовательное формирование взаимосвязанной структуры знаков и значений при признании и понимании определенного жизненного цикла объектов и их эволюционных изменений привело бы необходимым образом к началу образования вселенной (если такое происходило) либо из физической точки (теория большого взрыва, где точка и была бы тем самым первым знаком-значением из которого последовательно иерархически образовывались бы другие знаки-значения Рисунок 6), либо из духовной точки (Бог, от которого также последовательно иерархически формируются во времени знаки-значения Рисунок 6). С другой стороны, это может быть сложная динамическая структура объектов, никогда не сводимая к точке. Мы её сейчас сводим к точке из-за невозможности «различить» её структуру. В этом смысле интересно описание движения нашего познания, сделанное Гегелем, которое с необходимостью придет к «точке», названной им «абсолютной идеей». Но есть ещё вопрос: «Пойдет ли дальше познание?» В истории познания много примеров прихода к различным «точкам», которые оказывались «запятыми».

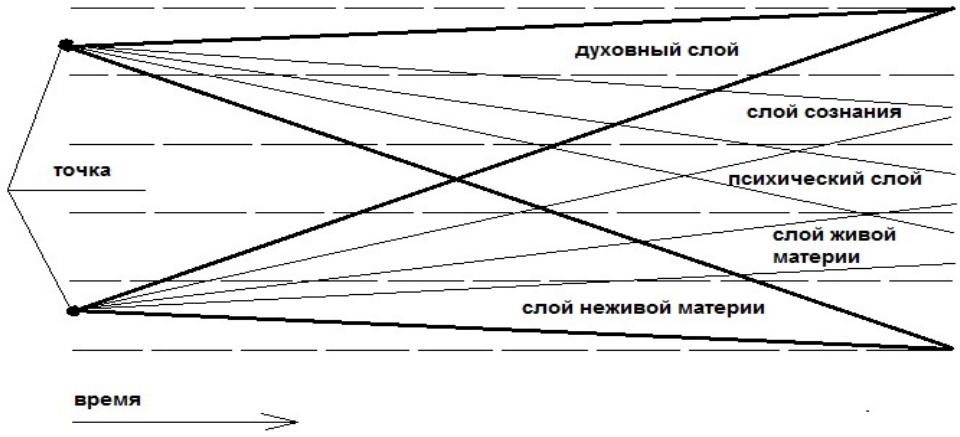


Рисунок 6 – Эволюционный способ формирования структуры знаков и значений

Иерархически-сетевое соотношение знаков и значений, которое применяется повсеместно для текущего описания явлений (объектов и потоков) может использоваться для описания и управления с целями, имеющими короткий временной интервал.

5 Основное и боковое внимание

Субъект постоянно и неизбежно ощущает, а память фиксирует все изменения внешней среды воздействующие на тело на различных уровнях:

- физическом,
- химическом,
- квантовом.

В дальнейшем все эти уровни для упрощения называются как физические.

Также существуют неосознанные неощутимые на физическом уровне субъекта воздействия (радиация) и ощутимые, но не имеющие перехода воздействия на наше тело с физического уровня на психический (опыты ***Rollin McCraty*** (Director of Research at Institute of HeartMath) с интуицией).

Внимание есть чувство (ощущение) определенной части или всего тела субъекта, которое с определенной частотой сравнивается с физическим и психическим опытом субъекта в результате чего происходит переход от физической информации к психической. Такой переход при фокусировке внимания на зрительном восприятии позволяет видеть не просто цветовые пятна на физическом уровне, а означенные на психическом уровне предметы. Внимание можно разделить на основное сфокусированное и боковое.

Переход от физической информации к психической осознается в фокусе основного внимания, а в боковом внимании этот переход не осознается, и проявляется в основном внимании в случае повышенной значимости данной психической информации для субъекта.

Все изменения состояний тела в фоновом режиме без непосредственного участия основного внимания (осознанности) переходят от физической информации к психической. При поступлении значимой для субъекта психической информации в боковом внимании может происходить неуправляемое субъектом переключение фокуса внимания на значимую информацию.

Информация здесь понимается как любое изменение состояния (формы) субъекта (объекта), связанное с постоянным и неизбежным движением и взаимодействием материи. В этом смысле очень интересна следующая цитата:

«Дискретность, как известно, фундаментальное свойство материального мира, т.е. мира вещей и энергии. Именно дискретность природных явлений составляет базу всех естественных наук. В случае информации дело обстоит иначе. Слагается ли информация из отдельных дискретных составляющих, или это непрерывный, точнее, – неразрывный поток, лишь искусственно расчлененный на отдельные сообщения или сведения?…

Однако как в обыденной жизни, так и в научной литературе «информацией» нередко называют все, что может воздействовать на живой организм извне, независимо от его физической и химической природы и независимо от того, являются ли источниками таких воздействий живые или неживые объекты [Серавин Л. Н. Теория информации с точки зрения биолога. Л.,Изд. Лен.унив., 1973.]. В подобном контексте к *информации можно свести все виды взаимодействия живых и неживых объектов.* Здесь опять исчезают различия между совокупностью сигналов, обладающей семантикой, родственных источнику и приемнику, и «слепым» воздействием одного объекта на другой» [6].

Само физическое ощущение воздействия от объекта или потока на органы чувств субъекта является неким кодом (знаком) по которому осуществляется доступ к психической составляющей информации. В предельном понимании чувство (ощущение) физического состояния мозга есть чувство связи этого состояния с психическим кодом того же состояния. Таким образом, понятно, что внешнее пространство определяется только через внутренние физические состояния субъекта, только часть из которых связана с его психическим опытом. Когда все воздействия будут связаны с психическим опытом - эволюция в этих слоях закончится.

6 Два этапа информационного онтогенеза субъекта

Эволюционные изменения субъекта по отношению к восприятию и осознанию информации происходят как в период родового филогенеза, так и в период личного онтогенеза.В период личного онтогенеза можно выделить два этапа взаимодействия субъекта с информацией.

Первый этап накопление опыта переходов от физической информации к психической.

Второй этап активное использование накопленного опыта

На первом этапе информационного онтогенеза субъект обладающий изначально способностью к непрерывной обработке физической информации в виде простой физической реакции на неё пытается, обязательно при помощи другого субъекта, перевести и закрепить дискретную информацию в память – обучение чтению наиболее яркий пример. Ребенок сначала медленно по слогам читает слово и с трудом учится его произносить сразу целиком. А взрослый человек иной раз может не заметить перестановки букв в слове читая предложение и без труда совмещает знак ВНЕП со своим опытом – знаком ВНУП. Таким образом, при закреплении в памяти этих дискретных фрагментов (знаков) субъект снова переходит неосознанно к непрерывной обработке информации.

Непрерывный поток физической информации на втором этапе информационного онтогенеза, попадая в память, постоянно фильтруется на наличие совпадения с уже сформированными дискретными физическими фрагментами информации, связанными с осознанной (психической) деятельностью субъекта в процессе обучения, и неосознанно происходит перевод физической информации на психический уровень осознания. У животных тоже формируются такие фрагменты физической информации несколькими путями – подражание родителям (зеркальные нейроны), болевые ощущения в определенных ситуациях.

Можно сказать, что на первом этапе онтогенеза у субъекта формируется структура знаков и значений, и отношений между ними, через которую («…теория это сеть, которую мы забрасываем в мир…») субъект смотрит на мир во втором этапе информационного онтогенеза. Эта структура для 95% субъектов становится достаточно «жесткой» и они не могут выйти за её пределы. Эти субъекты успешно и полезно усовершенствуют структуру знания, но не пересекают её границы. И только около 5% субъектов ставят под сомнение абсолютную правильность преподнесенных им структур знаков и значений, и имеют волю перейти границу и развивать эти структуры двигая науку и всё человечество вперед.

7 Способы принятия решений субъектом, их эволюция и проблема описания

Понятие управления движением формы субъектом непосредственно связано с восприятием информации о текущей ситуации (ТС) как для своей формы (внутреннее пространство), так и вокруг неё (внешнее пространство), сравнением ТС с прошлым опытом субъекта (обработка информации (ОИ) или переход от физической информации к психической) и принятием решения (ПР) о движении своей формы в пространстве.

Субъекты (человек) имеют психофизиологические различия левого и правого полушарий мозга, что позволяет субъекту по-разному воспринимать действительность и накладывает особый отпечаток на обработку информации и принятие решений.

Функциональные особенности левого полушария (ЛП): ведает логическим мышлением, знаковым восприятием действительности, аналитическим расчленением целого на элементы. Функциональные особенности правого полушария (ПП): отвечает за образное мышление, за целостное восприятие объектов; позволяет одномоментно охватывать все имеющиеся в предмете связи [7].

У субъекта возможно смещение доминанты в обработке информации между левым и правым полушарием и это приводит к различным вариантам ПР. *Доминанта* - сознательная или неосознанная задержка (концентрация) внимания на определенной части внешнего или внутреннего пространства субъекта.

Любую ситуацию, связанную с принятием решения (ПР) можно представить в пространстве - времени как на рисунке 7. Необходимые шаги принятия решения и управления:

1) прошлый опыт (1-2);
2) текущая ситуация (2);
3) сравнение ТС с опытом (обработка информации) (2-3);
4) принятие решения (3);
5) управление движением в пространстве (3-4).

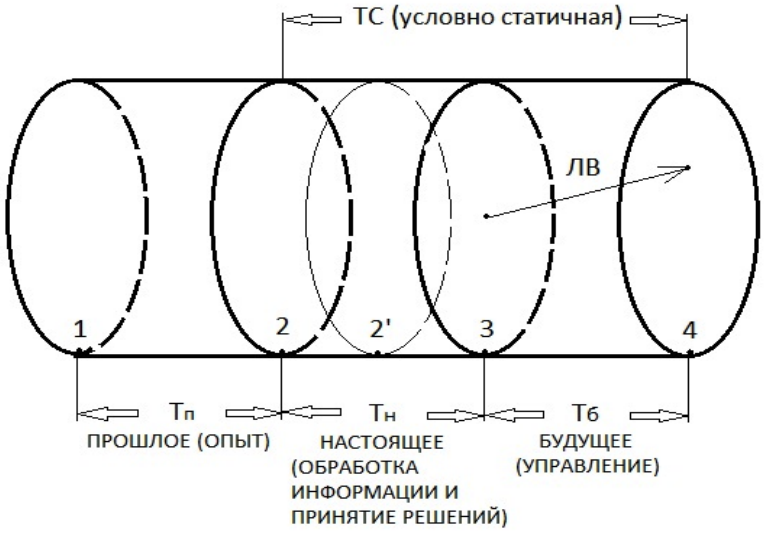


Рисунок 7 – Схема обработки информации, принятия решения и управления

Как будет выполнять эти шаги левое полушарие (дискретная обработка информации):

1) Прошлый опыт - дискретный фрагментарный алгоритмически взаимосвязанный, он ориентирован на ограниченное количество целей и поддается описанию знаковыми системами, вернее он формируется в процессе обучения через знаковые системы.
2) Текущая ситуация – дискретизируется (или фрагментируется) алгоритмически (осознанно) по набору параметров в соответствии с целями прошлого опыта (время между точками 2-2’ больше нуля). Точка 2’ рисунок 3 характеризует окончание предварительного этапа обработки информации - дискретизация ТС. Изначально ТС непрерывна при отсутствии субъекта.
3) Обработка информации - дискретная ТС сравнивается алгоритмически (осознанно) с дискретным опытом (время между точками 2’-3 больше нуля).
4) Принимается решение - точка 3 . Если необходимо, подтверждение истинности ПР в сознании до начала практической реализации происходит на основе алгоритма.
5) Управление. Практическая проверка истинности принятого решения и попытка его совмещения с целью.

У правого полушария схема будет несколько иная:

1) Прошлый опыт - непрерывно-дискретный, более целостный, менее фрагментарный.

2)3)4) Текущая ситуация - дискретизируется, сравнивается с опытом и принимается решение на основе ощущения (чувства). Все три действия проходят «одновременно» (нам так кажется) и подтверждение истинности ПР в сознании проводится без участия алгоритма (неосознанно)

на основе ощущения «мгновенно» (время между точками 2-3 стремится к нулю в нашем осознании, а в реальности это всё те же 200-400 миллисекунд [2]).

5) Управление. Практическая проверка истинности принятого решения.

Нельзя сказать, что левое и правое полушария функционируют раздельно, наоборот субъект никогда не может полностью отключить одно из полушарий, но в определенные промежутки времени при ПР доминирует то одно, то другое полушарие и, соответственно, происходит либо более дискретная обработка информации, либо более непрерывная.

Информация проявляется для субъекта в виде двух предельных состояний – дискретной и непрерывной. Дискретность и непрерывность это неоднородность качественная и/или количественная в пространстве и/или времени. По отношению к субъекту дискретность и непрерывность информации связана с его способностью различать эту неоднородность на физическом и/или психическом уровне, т.е. связана с относительными свойствами его собственной неоднородности, по отношению к пространственно-временной неоднородности воздействия. Отсюда, разная скорость показа фотокадров в одном случае, будет восприниматься как слайд-шоу, а при увеличении скорости - как кино. Если пространственно-временная плотность, поступающей через органы чувств, информации выше возможности реакции органов чувств и скорости обработки информации субъектом (это время требуемое осознание – как переход информации с физического уровня на психический), то принимаемая информация будет непрерывной.

Очень интересен также вопрос объективности дискретной и непрерывной обработки информации и соответственно принятия решения. Объективность дискретной и непрерывной ОИ, ПР и УП в конечном счете подтверждается достижением с той или иной степенью точности поставленной цели управления. Но есть промежуточный этап – точка 2', расположенная до начала практической реализации управления в точке 3 (рисунок 7), где возможна алгоритмическая проверка возможности достижения поставленной цели (хотя она может проводится и параллельно с выделением цели в процессе ПР). Такая проверка, дополнительно, является способом *интерсубъективного* дискретного обмена для объяснения причин именно такого ПР и УП.

В случае с непрерывной обработкой информации это сделать невозможно до точки 3 (рисунок 7), ни алгоритмически вывести и проверить принятое решение, ни вступить в *интерсубъективное* общение, потому что переход от точки 2 к точке 3 происходит «мгновенно» и осознается для субъекта результат обработки информации, а не её процесс. После точки 3, мы можем уже попытаться обосновать ПР и УП, как для себя, так и для других, но к реальному процессу ОИ и ПР это не будет иметь никакого отношения. Но как само ПР при непрерывной ОИ, несмотря на это, всё равно претендует на истинность и по каким причинам?

Эволюционно основными задачами субъекта при развитии от животного к человеку было:

- ориентация во внешнем пространстве;
- управление движением своего внутреннего пространства для движения во внешнем пространстве;
- управление движением своего внутреннего пространства для изменения объектов внешнего пространства.

От истинности решений первых двух задач зависела жизнь субъекта в животной стадии эволюции. В человеческом этапе эволюции тело и способность на первой стадии онтогенеза обучаться решению первых двух задач досталась человеку от животного, и плюс добавилась способность решать третью задачу. Здесь также можно отметить, что настройка непрерывной обработки информации правого полушария на истинность - тоже результат естественного отбора. Если субъектом не объективно воспринимается внешняя ситуация, не корректно происходит управление телом, то либо субъект остается голодным и умрет, либо его съедают.

Отсюда непрерывная обработка информации, результат который подтверждается только лишь ощущением, направлена на истинность, если только нам удается уловить это ощущение. Но если мы исходя из каких-то соображений не принимаем это ощущение и делаем неверное решение, то весь организм сигнализирует об этом - на этом и основана работа детектора лжи. Но сигналы организма не всегда осознаются при переводе с физического уровня информации на психический. Также возможно существуют устойчивые зоны мозга, в которых пересекаются обработка информации и управление внутренними органами и если сознательно нарушается истинная ОИ, то тут же нарушается неосознанное управление внутренними органами.

Таким образом, объективность работы сознания в части восприятия мира, обработки информации, принятия решений и управления телом – составная часть *эволюционного процесса* по развитию функций сознания. Человеку от природы достался инструмент, которым он пользуется в меру жизненной необходимости, в основном не думая о его возможностях и функциях.

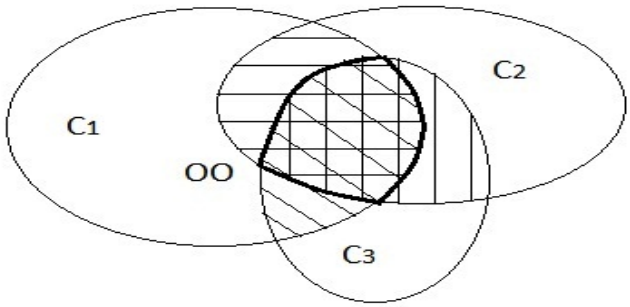


Рисунок 8 - Пересечение зон дискретного и непрерывного опыта трех субъектов

Еще один интересный вывод следует из наличия и применения субъектом непрерывной обработки информации и опыта - его невозможно передать другому субъекту. Дискретная составляющая опыта передается в любой знаковой форме, а непрерывная - всегда остается достоянием самого субъекта. Понимание трех субъектов при общении, а оно возможно пока только на дискретном уровне, происходит только в зоне пересечения общего непрерывного и дискретного опыта ОО (рисунок 8). На самом деле, рисунок 2 должен быть нарисован объемным, где большинство дискретного обозначения непрерывного опыта совпадают (допустим на уровне русского языка), а вот непрерывная часть (смыслы, значения) очень часто расходится в содержании. Одним и тем же словом у различных субъектов может обозначаться различный непрерывный опыт. Так появляется проблема «другого сознания» [8], где при совпадении дискретной составляющей (например, русский язык) существенно может различаться непрерывная часть – значения и смыслы слов.

Два способа принятия решения с одной стороны эволюционно взаимосвязаны, с другой стороны, на различных этапах эволюции преобладают (доминируют) в основной массе субъектов только один из них. В настоящий момент, изучение закономерностей функций сознания позволяет учиться осознанно относиться к использованию собственных возможностей.

8 Типы сознания субъектов

Можно выделить несколько типов индивидуального сознания относительно состояния внимания и опыта:

- широкое – узкое (в пространстве и времени)
- целостное – фрагментарное (вся картина - все пазлы – несколько пазлов)
- концентрированное (устойчивое удержание внимания на объекте) – неустойчивое

- по уровню ощущения цели – на физическом, психическом, сознательном или духовном уровнях;
- по внешнему или внутреннему пространству реализации этой цели;
- по «широте» восприятия во внимании текущей ситуации и наличии в памяти «широкого» опыта (фрагментарность и целостность);
- по «глубине» исторического или временного диапазона опыта изменения объектов или потоков, позволяющих предполагать, исходя из прошлого опыта, динамику изменения объектов или потоков в будущем;
- по возможности выхода на втором этапе онтогенеза за пределы знаков и значений, сформированных на первом этапе онтогенеза в опыте (памяти) другими субъектами (учителями), или проще говоря иметь способность к самостоятельной структуризации (дискретизации, фрагментации) внешнего пространства несмотря на существующие мнения;
- и продолжением выхода за пределы текущего знания является появление способности сознания к восприятию и различению уже не двух чисел, что мы сейчас видим повсеместно, а переход к осознанию трех чисел, расположенных не на одной линии, а в конфигурации введенной в западное сознание Гегелем в виде соотношения теза-антитеза-синтез.

Для лучшего ощущения понятий «широты» сознания можно привести такую цитату Г.Селье [9]:

«…Возьмем, к примеру, мое ярко выраженное предпочтение к применению максимально более простых методов. Мне нравится держать крысу на ладони и просто наблюдать за ней. Мне нравится разглядывать ее органы под лупой или на гистологических срезах, окрашенных простейшими способами. Несмотря на мою докторскую степень по химии, я никогда не прибегал к сложным химическим процедурам. Я никогда не использовал изотопные методы, электронный микроскоп, рентгеновскую дифракцию или что-нибудь еще в этом роде не потому, что я недооцениваю их значимость, а просто потому, что меня больше интересует общая картина, чем детали. Я ощущаю себя как-то ближе к Матери-Природе, когда могу наблюдать ее непосредственно теми органами чувств, которые она сама мне дала, чем когда между нами стоят инструменты, так часто искажающие ее облик. Легко распознаваемые, явные изменения формы или поведения не только меньше подвержены "инструментальным ошибкам", но и благодаря своей простоте лучше поддаются широкомасштабному экспериментированию, необходимому для установления единства и взаимосвязи многочисленных жизненных процессов.

Порой мне казалось, что я выгляжу "отсталым" в этой моей страсти к простоте и всеохватывающему подходу. Тем более что в науке сегодня действует совершенно противоположная тенденция. Создаются все более сложные средства для все более глубокого "копания" в каком-то одном месте. Разумеется, это необходимо, но не для всех, Джон, вовсе не для всех! Узкий специалист теряет общую перспективу, более того, я уверен, что всегда будет существовать потребность в ученых-интеграторах: натуралистах, постоянно стремящихся к исследованиям достаточно обширных областей знания. Меня не беспокоит возможность пропуска отдельных деталей. Среди нас должен остаться кто-то, кто будет обучать людей совершенствовать средства для обозревания горизонтов, а не для еще более пристального вглядывания в бесконечно малое. Мы должны готовить ученых, которые могут организовывать большие коллективы для исследования обширных областей знания, пусть даже самыми простыми методами…».

9 Типы взаимодействия субъектов в группах

Типы взаимодействия можно сначала определить для двух субъектов относительно их опыта значений ВНУП (информации), хотя знаковая составляющая значений может полностью совпадать (Рисунок 9).

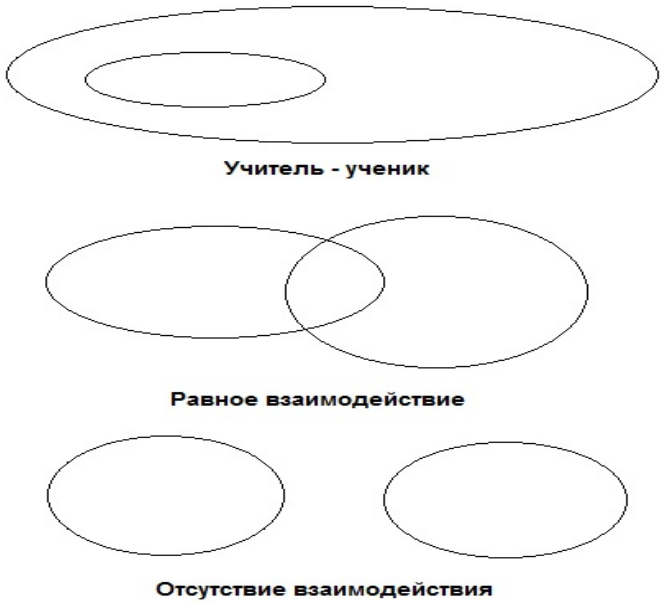


Рисунок 9 Типы информационного взаимодействия субъектов в группах

Можно выделить несколько основных типов взаимодействия управления в группах субъектов:

- иерархическое взаимодействие, когда на вершине иерархии целью управления являются цели, внутренние по отношению к форме субъекта;
- иерархическое взаимодействие, когда на вершине иерархии целью управления являются цели, внешние по отношению к форме субъекта.

Это абсолютно противоположные полюса управления и взаимодействия субъектов в группе, поэтому реальные ситуации расположены между ними часто в виде сетевых взаимодействий без ярко выраженной иерархичности.

Первый тип управления предполагает цели, служащие внутренним ощущениям субъектов на физическом, психическом, сознательном и духовном уровнях субъекта. На физическом уровне это предполагает желание самому побольше и повкуснее поесть, на психическом уровне – самому получить положительные эмоции.

Второй тип управления предполагает те же самые цели, но для других – чтобы вокруг субъекты были сыты и счастливы. Вся обозримая история управления человечества постоянно шатается между этими двумя крайними способами существования групп субъектов.

Так же можно отметить, что первый тип взаимодействия в группе близок к взаимодействию животных в стае, а второй тип взаимодействия сформулирован в основных религиозных учениях. Переход от одного вида взаимодействия к другому описывает вся история человечества. Процесс этот имеет волновой характер с подъемами и спадами.

С одной стороны, эволюционно последовательно цели управления перемещаются из внутреннего пространства формы субъекта во внешнее пространство, с другой стороны, цели управления эволюционно последовательно поднимались от преимущественно ощущения физического уровня к ощущению духовного уровня.

Заключение.

Описанные типы группового взаимодействия реализуются и в обществе. Общество включает в себя все типы сознания субъектов и все типы группового взаимодействия субъектов. В зависимости от распределения и преобладания этих типов сознания и их взаимодействия по уровням иерархии общественного взаимодействия и управления мы можем предполагать устойчивость и возможности данного общества.

Можно взять любую общественную структуру и мы увидим ее ярко выраженное иерархическую организацию управления с элементами сетевого взаимодействия на горизонтальных уровнях иерархии.

Как же будет функционировать такая общественная структура?

Лучший способ узнать будущее – это почитать историю!

В работе были перечислены основные типы сознаний субъектов и основные типы их взаимодействия в группах. Хотя, наверное, этими типами нельзя полностью закрыть всё многообразие.

А дальше можно самостоятельно распределять по уровням общественной иерархии субъектов с различными типами сознания и их групповыми взаимодействиями и тренируясь на исторических примерах можно наблюдать и понимать к чему может привести любая текущая ситуация.

Список литературы

[1] Ярошевский М.Г. История психологии от античности до середины XX в. Учеб. пособие. – М., 1996. – 416 с.

[2] Анохин К.В. Что происходит в мозге, когда рождается мысль? Популярная механика №11(121), ноябрь 2012. С.66-67.

[3] Тургенев И. С. Произведения в 12 томах // Полное собрание сочинений и писем в 30 томах. — М.: Наука, 1982. — Т. 10. Повести и рассказы. 1881—1883. Стихотворения в прозе. 1878—1883. Произведения разных годов. — С. 127—128

[4] Аналитическая философия / Под ред. М. В. Лебедева, А. З. Черняка. — М.: ИПК РУДН, 2006. — 622 с.

[5] Пенроуз Р., Шимони А., Картрайт Н., Хокинг С. П25 Большое, малое и человеческий разум / Пер. с англ. — М.: Мир, 2004. — 191 с, ил. — (Рубежи науки). ISBN 5-03-003390-4

[6] Корогодин В. И., Корогодина В. Л. Информация как основа жизни. – Дубна: Издательский центр «Феникс», 2000. – 208 с.

[7] Геодакян В.А. Homo sapiens на пути к асимметризации. Антропология на пороге III Тысячелетия. Москва 2003, т.1, с. 170-201.

[8] Дубровский Д.И. Проблема «другого сознания». Вопросы философии, 2008, №1.

[9] Селье Г. От мечты к открытию : Как стать ученым /Пер. с англ. Н. И. Войскунской; Общ. ред. М. Н. Кондрашовой, И. С. Хорола; Послесл. М. Г. Ярошевского, И. С. Хорола. М.: Прогресс, 1987. 368 с.

Promising Methods and Means of Aerospace Flights Control

Перспективные методы и средства управления космическими полётами

КОРПОРАТИВНАЯ РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ОНТОЛОГИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РОССИЙСКИМ СЕГМЕНТОМ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Т.Г. Вакурина[1], О.И. Лахин[2], Ю.С. Юрыгина[2], Е.В. Симонова[2], Д.Н. Коршиков[2], А.И. Носкова[2]

[1]РКК «Энергия» им. С.П. Королёва
141070, Московская обл., Королёв, ул. Ленина, 4А, Россия
post@rsce.ru
тел: +7 (495) 513-77-63, факс: +7 (495) 513-86-20

[2]ООО «НПК «Разумные решения»
443013, Самара, Московское шоссе, 17, офис 1201, Россия
info@kg.ru
тел: + 7 (846) 279-37-78

Ключевые слова: *российский сегмент международной космической станции, управление российским сегментом международной космической станции, мультиагентные технологии, корпоративная распределенная онтология, конструктор онтологий, сетецентрическая система.*

Abstract

The approach to the construction allocated enterprise ontology of Rocket and Space Corporation "Energia" to control the Russian segment of the International Space Station is proposed in this paper. This ontology integrates knowledge from various fields for constructing a conceptual model of the Russian segment of the International Space Station. Methods and tools for describing the conceptual model of the Russian segment of the International Space Station using ontologies activities are considered for this purpose, tools for working with corporate ontology are proposed. Examples of corporate ontology and its main elements and its practical use in intelligent aerospace applications are discussed in this article.

Введение

Международная космическая станция (МКС) является уникальным, сложным, инновационным научно-техническим и инженерным орбитальным комплексом большой размерности. В настоящее время в связи с усложнением конструкции МКС и устойчивым возрастанием объемов информации, требуемой для управления полетом российского сегмента международной космической станции (РС МКС) со стороны центров управления полетом (ЦУП), необходимо развитие процессов управления полетом РС МКС в рамках единой наземно-космической системы, направленной на достижение комплекса целей полета. Для принятия решения и осуществления согласованных действий специалистов группы управления полетом и экипажа РС МКС требуется обработка и анализ возрастающего объема информации, поступающего с борта РС МКС, например, при управлении полетом РС МКС необходимо анализировать более 80 000 телеметрических параметров.

Для решения задач управления РС МКС была предложена концепция мультиагентного планирования, позволяющая учитывать специфику управления полетом РС МКС и повысить эффективность собственно процесса принятия решения за счет внесения элементов самоорганизации. Инструментом информационной поддержки принятия решений в процессах управления полетом РС МКС и описания контекста ситуации выступает корпоративная распределенная онтология управления полетом, представляющая собой набор различных онтологий, используемых для формальной спецификации понятий и отношений, характеризующих предметную область. Такой подход позволяет справляться с растущей сложностью данной задачи и высокой динамикой изменений, возникающей как в связи с непредсказуемым появлением но-

вых срочных потребностей в доставке грузов на борт РС МКС, переносом стартов транспортных грузовых кораблей «Прогресс» или транспортных пилотируемых кораблей «Союз», расширением номенклатуры объектов грузов, задержкой подготовки научной аппаратуры для проведения космических экспериментов, так и в процессах оперативного управления полетом РС МКС, требующих незамедлительного принятия решений в случае возникновения различных событий при парировании нештатных и аварийных ситуаций на борту РС МКС.

Использование элементов корпоративной распределенной онтологии в различных взаимодействующих между собой системах поддержки принятия решений при управлении полетом, приводит к необходимости применения качественно нового подхода для обеспечения взаимодействия различных систем принятия решений на основе корпоративной распределенной онтологии управления полетом, функционирование которой базируется на накапливаемых изменяющихся знаниях о РС МКС. Для управления всеми знаниями в корпоративной распределенной онтологии управления полетом и обеспечения взаимодействия систем поддержки принятия решений необходимо создать единую платформу.

В данной статье рассматривается подход к построению корпоративной распределенной онтологии ОАО РКК «Энергия» для управления РС МКС, интегрирующей знания из различных областей, представляются методы и средства управления корпоративной распределенной онтологией управления полетом, приводятся примеры реализации корпоративной онтологии и ее основных элементов (онтология бортовых систем, элементов и ресурсов РС МКС, онтология действий экипажа и специалистов ГОГУ, онтология правил полета, полетных процедур и бортовых инструкций, онтология программы полета и грузопотока, онтология научно-прикладных исследований и космических экспериментов, онтология организационной структуры и т.п.) и ее практического использования в интеллектуальных аэрокосмических системах.

1 Управление РС МКС

В настоящее время РС МКС состоит из функционального грузового блока (ФГБ) «Заря», служебного модуля (СМ) «Звезда», стыковочного отсека (СО1) «Пирс», малых исследовательских модулей (МИМ1) «Рассвет» и (МИМ2) «Поиск», транспортных грузовых и пилотируемых кораблей «Прогресс М», «Союз ТМА». В состав каждого из этих модулей входит множество различных систем, например, системы как БВС и СУБА, расположенные в СМ. БВС – бортовая вычислительная система, предназначенная для управления бортовыми системами СМ и для координации работы всех модулей РС МКС, решения задач долгосрочного планирования и автономного управления, обеспечения связи с системой управления бортовой аппаратурой американского сегмента. Подэлементами БВС являются системы: цифровая вычислительная машина (ЦВМ), терминальная вычислительная машина (ТВМ), устройства сопряжения (УС21, УС22), контроллер сетевых каналов (КСК), коммутатор согласующих резисторов (КСР), каждая из которых состоит из составляющих. СУБА – система управления бортовой аппаратуры, назначение, которой состоит в управлении, контроле и диагностике бортовых систем СМ. В состав СУБА входит порядка 100 элементов, большинство из которых также состоит из определенных блоков. Таким образом, РС МКС является сложной системой, состоящей из множества элементов, большинство из которых сами являются сложными системами, объединяющими более простые элементы. Сложность системы определяется не столько обилием элементов, сколько их сложностью, а также сложностью функциональных и логических связей между элементами и частями системы, ее многорежимностью, возможностью восстанавливаемых и невосстанавливаемых отказов у одних и тех же элементов в зависимости от характера самого отказа и т.д. Элементы РС МКС связаны между собой в единое целое, причем эти связи отличают систему от простого соединения частей. Поэтому РС МКС является системой систем, включающей специалистов групп управления на Земле и экипаж МКС в качестве отдельных элементов. Структура связей внутри РС МКС является сложной вследствие

их большого количества, многочисленных пересечений и различной природы. Различают следующие виды связей: функциональные, логические (логика возникновения НШиАС), иерархические (уровень, описывающий состав элементов), пространственные (уровень, описывающий местоположение элементов). РС МКС характеризуется также множеством атрибутов (например, физические, химические свойства) и режимов. При описании объекта РС МКС следует использовать различные уровни классификации объекта, что позволяет охарактеризовать его с различных сторон и получить полную информационную картину.

Термин «управление РС МКС» в данной статье обозначает процесс последовательного изменения параметров состояния, включающий ряд последовательно выполняемых операций, направленных на изменение состояния РС МКС в соответствии с планом полета, предназначенным для реализации целей полета. План рассматривается, с одной стороны, как документ планирования полета, с другой стороны, как любая последовательность действий, направленная на достижение целей полета в текущей полетной ситуации на оцениваемом интервале времени. Под оперативным управлением понимается управление объектом в реальном и/или близком к реальному времени. Для оперативного управления полетом требуется достаточно точная оценка эксплуатационных качеств объекта на текущий момент времени. К таким качествам относятся: функциональные возможности, располагаемые ресурсы, характеристики операций, которые объект может выполнять в полете, состав бортовых систем и режимы их работы, методики управления бортовыми системами, описание каналов управления, методики контроля состояний и работы бортовых систем, ограничения на режимы работы [1]. Множество задач, которое возможно реализовать при помощи орбитальной космической станции, определяется совокупностью следующих факторов:

- располагаемыми ресурсами (топливо, запасы кислорода, электроэнергия и т.д.);
- функциональными возможностями, которые были заложены при разработке объекта.

Для орбитальных космических станций поставленные задачи, цели полета, характеристики системы, функционал могут варьироваться и уточняться в процессе продолжительного срока эксплуатации. РС МКС является многоцелевой системой. Основными задачами управления РС МКС являются:

- обеспечение безопасности экипажа и станции;
- планирование полетных операций и научных экспериментов, планирование и анализ действий экипажа;
- контроль работы бортовых систем;
- контроль параметров орбиты, расчёт маневров поддержания орбиты, сближения и спуска;
- координация работы средств управления полетом.

Процесс управления полетом, в частности, оперативное управление полетом, можно обобщенно представить в виде следующих взаимосвязанных процессов: планирование полета, реализации плана, контроль и принятия решения. На основе описания этих процессов и их взаимодействия строится модель управления полетом РС МКС.

Существует несколько уровней планирования, оказывающих взаимовлияние друг на друга:

- стратегическое планирование (временной интервал – несколько лет);
- тактическое планирование (временной интервал – около года);
- исполнительное планирование (временной интервал – от полугода (номинальный план полета) до суток (детальный план полета)).

При переходе от стратегического уровня планирования к исполнительному уровню идет уточнение планов, их конкретизация, более глубокая детализация.

Контроль полета проводится регулярно в процессе выполнения плана полета и включает в себя несколько этапов:

- получение информации, которая описывает фактическое состояние РС МКС (источником информации о состояние параметров может быть телеметрическая информация, телевизионная информация, голосовые или письменные сообщения экипажа, информация со специализированной аппаратуры);
- обработка полученной информации для определения достоверных данных на момент контроля;
- анализ полученной информации.

По результатам контроля принимается решение следовать прежнему плану, или перейти к скорректированному плану для достижения поставленных целей, если контролируемые параметры находятся вне диапазона допустимых значений.

Описанная выше схема является обобщенной схемой управления РС МКС.

В управлении РС МКС задействованы различные группы специалистов, каждая из которых отвечает за «свою» предметную область. Причем каждый специалист должен владеть большим количеством информации в своей области и уметь выбрать на основе сопоставлений, логических рассуждений, расчётов и моделирования лучший вариант для достижения поставленных целей. При этом необходимо учитывать сложность объекта управления, рост количества требований и ограничений, перепланирование при возникновении нештатных ситуаций в условиях дефицита времени, необходимость анализа большого количества данных и соблюдения ограничений при принятии решений

Результирующее решение принимается в результате совместной деятельности и переговоров специалистов различных групп управления. Однако из-за отсутствия взаимосвязи между ними увеличиваются сроки принятия решений, снижается их оперативность и эффективность.

2 Использование корпоративной распределенной онтологии для управления РС МКС

Корпоративная распределенная онтология управления полетом является средством связи между специалистами различных групп управления, специалистами и системами, системами различных групп управления. Применение онтологий, описывающих сложную систему управления в целом, способствует повышению уровня оперативности, согласованности, эффективности принимаемых решений. Онтология позволяет накапливать, структурировать знания и манипулировать ими, выступая в роли библиотеки, где знания представлены в единой форме и можно найти не только необходимую информацию, но и ее источник. Информация становится доступной специалистам различных групп управления, экономя трудозатраты и временной ресурс на ее поиски.

Формализованное представление знаний при управлении МКС в форме онтологий предоставляет следующие возможности:

- приведение терминологии различных групп специалистов управления полетом, инженеров и экипажа МКС к единой системе понятий для обеспечения единого толкования и взаимопонимания между различными специалистами;
- использование онтологии в качестве универсальной «энциклопедии» РС МКС, интегрирующей знания специалистов различных групп управления;
- моделирование различных ситуаций, возникающих при управлении полетом РС МКС, например, используемых для поддержки принятия решений;
- создание на основе общей онтологии системы, не требующей полного перепрограммирования при введении новых фактов и корректировок в предметной области;
- освоение специалистами новой информации с помощью онтологии для увеличения уровня их квалификации и профессиональная подготовки;
- выявление недостающих логических связей при построении онтологии;

- поддержка согласованной работы и координации планов в реальном времени, оптимизация ресурсов и взаимодействие подсистем групп управления.

В основе построения системы лежит онтология мира МКС (концептуальная модель МКС), описывающая:

- возможный структурный состав МКС (бортовые системы и элементы МКС, комплекс целевых нагрузок);
- возможные функциональные связи между подсистемами;
- возможное пространственное размещение устройств;
- правила полета, полетные процедуры и бортовые инструкции;
- возможные действия космонавтов и специалистов ЦУП;
- возможные действия с устройствами для парирования ситуации;
- подготовку и проведение научно-прикладных исследований;
- организационную структуру корпорации;
- программу полета и грузопоток;
- другие важные зависимости для принятия решений.

3 Онтологический базис

Для обеспечения единой структуры всех онтологий, входящих в корпоративную распределенную онтологию управления полетом, необходимо установить правила по обработке и занесению знаний, то есть выработать или выбрать единый онтологический базис.

На данный момент среди всех возможных подходов к формализованному представлению знаний наиболее используемыми являются подходы на основе фреймов, семантических сетей, логических и продукционных правил [3]. Детальное изучение этих подходов позволило понять, что семантические сети наиболее универсальны и удобны для концептуализации знаний, поэтому для построения онтологического базиса концептуальной модели РС МКС используются семантические сети.

Развитием подхода для представления знаний стали динамические семантические сети. В предлагаемом методе предоставляется возможность строить сетевые интеллектуальные системы или сети интеллектуальных систем. В основу концепции динамической семантической сети положены следующие принципы:

- интеграция процедурных и декларативных знаний;
- параллельное функционирование всех компонентов сети;
- эволюция сети в реальном времени.

Каждый узел динамической семантической сети является выполняемым вычислительным процессом, обладающим алгоритмами обработки информации и выработки решений, средствами общения с другими узлами сети, определенным поведением. Таким образом, каждый узел графа представляет собой выполняемый процесс, характеризуемый набором атрибутов и присоединенных функций, а структура графа отражает текущую модель предметной области [2].

Так как традиционного для онтологий декларативного представления знаний недостаточно для описания процессов и правил, являющихся основными знаниями, используемыми в системах корпорации, в качестве онтологического базиса была выбрана мета-онтология Аристотеля. Она предполагает следующие важные свойства [4]:

- существуют объекты, которые обладают свойствами и характеризуются состояниями;
- с каждым объектом можно что-то делать, изменяя состояние, свойства или отношения между объектами;
- отношения между объектами могут отражать структурные, функциональные, временные или любые другие виды связей;

- чтобы выполнить действие над объектом, необходимо соблюдение определенных условий, которые задаются свойствами и отношениями;
- сложные объекты строятся из простых объектов путем выполнения действий (процессов) над ними для установления отношений и связывания простых объектов в сложные;
- свойства выражают способность объектов вступать в процессы взаимодействия на основе законов мира;
- события, действия (процессы) изменяют состояния объектов, их свойства и отношения и запускают новые процессы;
- процессы состоят из действий с объектами, так же как сложные объекты состоят из простых;
- с каждым объектом мира можно что-то делать в любой момент времени (нет тупиковых состояний), но чтобы выполнить действие над объектом необходимо выполнить определенные условия;
- объекты, свойства, отношения, процессы (действия) характеризуются атрибутами различных типов, которые имеют диапазоны значений, а также конкретные значения в заданный момент времени;
- атрибуты объекта/отношения являются качественной или количественной характеристикой понятия;
- правила являются обобщенными понятиями для формализованных условий вида «если-то» (предикатов) и высказываний (утверждений, аксиом, фактов).

Отличительной чертой данной мета-онтологии является возможность описания процессов, действий, правил и законов. Таким образом, будущая корпоративная онтология, построенная на основании модели Аристотеля, будет наиболее полным и всеобъемлющим описанием предметной области, связанной с РС МКС.

4 Инструменты управления корпоративной распределенной онтологией

Системы поддержки принятия решений управления полетом используют один и тот же подход (мультиагентные технологии и корпоративную распределенную онтологию в качестве базы знаний), который позволяет создать единую сетецентрическую платформу и организовать взаимодействие между системами, объединив их в единую систему систем корпорации для управления РС МКС [6].

Системы поддержки принятия решений управления полетом, построенные на основе сетецентрической платформы корпорации, отличаются следующими характеристиками:

- Все системы имеют общий унифицированный пользовательский интерфейс, обеспечивающий взаимодействие человека и системы на основе общих принципов, при этом применяется единая концепция построения пользовательского интерфейса, интуитивно понятного различным категориям пользователя. Таким образом, пользователь, работая в разных системах, не замечает особых различий, так как работа происходит в единой среде.
- С технической точки зрения системы используют одни и те же механизмы и компоненты.
- Все системы взаимодействуют через общую интеграционную сервисную шину, которая обеспечивает коммуникацию между различными системами.

Корпоративная распределенная онтология агрегирует в себе все существующие знания разных специалистов, исключая ненужное дублирование и обеспечивая общий доступ. Предварительно установленные правила и ограничения позволяют описать предметную область наиболее полно с точки зрения пользователя и доступно для обработки с точки зрения систем. Настраиваемые права доступа, с одной стороны, не дают возможности внести в онтологию какие-то критические изменения, противоречащие уже существующим знаниям, а с другой стороны, позволяют всем пользователям различных систем отслеживать изменения и корректировать свои части онтологий согласно новым данным.

Параллельно с созданием самой корпоративной распределенной онтологии ведется разработка и развитие удобного инструмента для ее построения. Обзор существующих конструкторов онтологий показал, что в настоящее время не существует инструмента, удовлетворяющего всем требованиям, предъявляемым к конечной онтологии предметной области. В связи с этим разрабатывается новый инструмент, обладающий всеми преимуществами существующих конструкторов и имеющий ряд своих особенностей, необходимых для создания и использования распределенной онтологии управления полетом.

Разрабатываемый конструктор онтологий представляет собой систему визуального проектирования семантических сетей онтологий деятельности, в которой пользователь может в удобной форме создавать и редактировать различные онтологии, специфицируя свои концепты и устанавливая связи между ними, а также формируя сценарии действий, и далее «проигрывать» ситуации в этих мирах с помощью исполняющей системы, реализующей законы описанной предметной области.

При этом такая система должна поддерживать взаимосвязи объектов из нескольких областей, объекты которых могут быть связаны между собой (в случае корпоративной онтологии, взаимосвязь между ее составными частями – онтологиями отдельных систем).

Помимо характеристик и возможностей, присущих всем существующим инструментам инженерии онтологий, разрабатываемый конструктор онтологий имеет следующие особенности:

- возможность свертки объектов по группам (принцип погружения), когда группу объектов можно свернуть в один объект, например, систему можно разложить на составные часть, а затем свернуть в один объект (данная функция является реализацией холонической теории, согласно которой составной частью системы является холон – целое, являющееся частью другого, большего целого [5]);
- возможность создавать запросы, описываемые правилами, с помощью которых пользователь сможет легко вести поиск и навигацию по онтологиям (например, просмотреть всех наследников выбранного класса, или просмотреть все входящие элементы и т.д.);
- возможность отображать онтологию в различных вариантах: автоматическое отображение (библиотека шаблонов отображения) и ручное;
- наличие различных форм визуализации данных (диаграммы, графики, семантическая сеть, текст и т.д.);
- наличие различных дополнительных редакторов (редактор карты, редактор сети и т.д.), облегчающих задачу занесения новых данных в онтологию.

Относительно корпоративной распределенной онтологии управления полетом, основным преимуществом данного конструктора онтологий является разработка специальных меню и интерфейсов, адаптированных под конкретные разделы единой онтологии. Основная идея заключается в следующем: внешние системы интегрируются с конструктором онтологий таким образом, что в нем можно выполнять предметнозависимые операции, то есть применительно к каждому разделу распределенной онтологии создается меню, с помощью которого можно быстро и без труда описать специфические знания, не нарушая общей структуры онтологии.

Другой важной особенностью данного конструктора онтологий является возможность многопользовательского доступа к единой онтологии. В таком случае может возникнуть ситуация, когда несогласованные действия пользователей приведут к нарушению целостности и логичности конечной онтологии. В связи с этим вводится понятие ролей, которые ограничивают круг возможностей пользователя конкретной системы в том или ином разделе корпоративной онтологии, то есть пользователь может либо просто просматривать онтологию, либо вносить определенные изменения. Данная функциональность связана с другой отличительной чертой нового конструктора: отслеживание изменений в разделах корпоративной онтологии.

Так как доступ к корпоративной распределенной онтологии планируется предоставить пользователям различных систем, логично предположить, что знания этих пользователей мо-

гут пересекаться и знания, относящиеся к одному из разделов корпоративной распределенной онтологии, могут влиять на знания из другого раздела (другой системы). Отслеживание изменений позволяет оповещать других пользователей распределенной онтологии о новых знаниях. На основании этих событий система может предложить другим пользователям внести свои изменения в онтологию, перестроить планы и т.д.

5 Применение корпоративной распределенной онтологии управления полетом

Корпоративная распределенная онтология управления полетом используется в РКК «Энергия» в следующих системах поддержки принятия решений при управлении полетом РС МКС:

- интерактивная мультиагентная система построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС;
- интеллектуальная система поддержки принятия решений при использовании бортовых ресурсов в процессе парирования аварийных ситуаций;
- автоматизированная система организации оперативных работ смен главной оперативной группы управления (ГОГУ);
- адаптивный тренажер для формирования и восстановления навыков ситуационной поддержки принятия решений сменным руководителем полетов и специалистами ГОГУ;
- информационная система управления ресурсами РС МКС;
- система информационной поддержки процесса управления научно-прикладными исследованиями на РС МКС;
- система поддержки принятия решений в процессе выполнения экипажем полетных процедур.

Все системы построены на основе сетецентрической платформы, обеспечивающей взаимодействие между ними на основе корпоративной распределенной онтологии. Каждая система при этом является своего рода «многофункциональным агентом». При работе системы могут появляться события, которые требуют действий и информации от других систем. Таким образом, одна система формирует запрос другой системе, аналогично принципу взаимодействия агентов в мультиагентных системах. Инструменты единой платформы обеспечивают возможности гибкой настройки и управления такого взаимодействия, таким образом, единая платформа позволяет создать интеллектуальный сетецентрический корпоративный программный комплекс вместо разрозненных систем.

Основными преимуществами данного подхода являются:

- открытость к добавлению новых систем снизу и сверху, слева и справа;
- согласованность планов между отдельными системами (подразделениями);
- высокая гибкость за счет адаптивности планирования по событиям в реальном времени;
- в отличие от классического подхода «сверху-вниз», система строится «снизу-вверх»;
- масштабируемость в пределах предприятия.

Заключение

В работе описан подход к построению корпоративной распределенной онтологии для управления РС МКС, применяемой в ОАО РКК «Энергия», а также методы и средства описания концептуальной модели РС МКС с помощью онтологий деятельности.

Рассмотренный инструментарий для работы с корпоративной распределенной онтологией управления полетом позволит наиболее полно и точно описать все необходимые знания специалистов о предметной области и обеспечить взаимодействие между системами.

Список литературы

[1] Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полётами. Ч.1-М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 476 с.

[2] Вакурина Т.Г., Котеля В.В., Лахин О.И., Матюшин М.М., Скобелев П.О. Онтология российского сегмента Международной космической станции и ее практическое использование в интеллектуальных аэрокосмических приложениях // Материалы IV Международной научно-технической конференции «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2014), 20 – 22 февраля 2014 г. – Минск: БГУИР, 2014. – С. 221-226.

[3] Гаврилова Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский // СПб. – 2000. – 384 с.

[4] Скобелев П.О. Онтологии деятельности для ситуационного управления предприятием в реальном времени // Онтология проектирования. 2012. №1(3). – С. 26–48.

[5] Koestler, A. The Ghost in the Machine / A. Koestler. – London: Arcana books, 1989.

[6] Иващенко А. В., Карсаев О. В., Скобелев П. О., Царев А. В., Юсупов Р. М. Мультиагентные технологии для разработки сетецентрических систем управления // VI Всероссийская научно-практическая конференция "Перспективные системы и задачи управления", 4 - 6 апреля 2011 г., Таганрог. – Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №3 (116). – С. 11-23.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭКИПАЖА ПРИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ

П.Н. Васильева, А.Г. Котов

ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева
141070, Московская область, Королев, ул. Ленина 4а,Россия
vpolinca@mail.ru
тел: 8 (499) 516-53-23

Ключевые слова: бортовая документация, многофункциональная информационная система, система поддержки принятия решения, нештатная ситуация, разгерметизация.

Abstract

This paper we consider the problem for the crew onboard the actual documentation for the flight program , as in the normal mode , and in emergency situations of varying degrees of severity . Spotted hence a need for development of software for the conversion of paper -board documentation in electronic form . Based on the research by the authors offers a new approach to improve the efficiency of the crew on parrying contingency, considered tools for the task and practical application.

Введение

Во время полета пилотируемого космического аппарат (ПКА) используется бортовая документация (БД), которая предоставляется в нескольких видах: на электронном носителе и в бумажном виде. БД представляет собой комплект инструкций, регламентирующих действия экипажей по управлению служебными системами и целевыми нагрузкам. В настоящее время больший объем БД представлен в бумажном виде, что затрудняет её использование в условии дефицита времени при возникновении нештатной ситуации (НС).

1 Бортовая документация

Для формирования бортовой документации используются средства, которые позволяют компоновать методический материал с помощью стандартизованных обозначений и условных символов, цветовой дифференциацией,схем, рисунков, таблиц, фотографий, экранных форматов с поясняющими надписями и ссылками.

Бортовая документация разработана с использованием специальных приемов представления информации, основная цель и назначение которых заключается в том, чтобы максимально сжато выразить смысл в тексте бортовых инструкций [1].

На рисунках 1-3, представлены: страница с текстом инструкции, примером блок-схемы и монограммы из международной бортовой документации «EMERGENCY PROCEDURES 1a: DEPRESS,FIRE, EQUIPMENT RETRIEVAL».

Существующая система разработки и сопровождения БД, ориентированная на представление информации на бумаге, не в полной мере обеспечивает структуризацию и оперативный поиск необходимой информации для планируемых к выполнениюэкипажем полетных операций. Также отсутствуют средства для объединения постоянно действующей и оперативной информации (радиограмм, планов радиообмена), что может являтьсяпотенциальным источником ошибок действий экипажа.

Необходимо отметить, что большая часть БД хранится в бумажном виде, что имеет ряд преимуществ и недостатков.

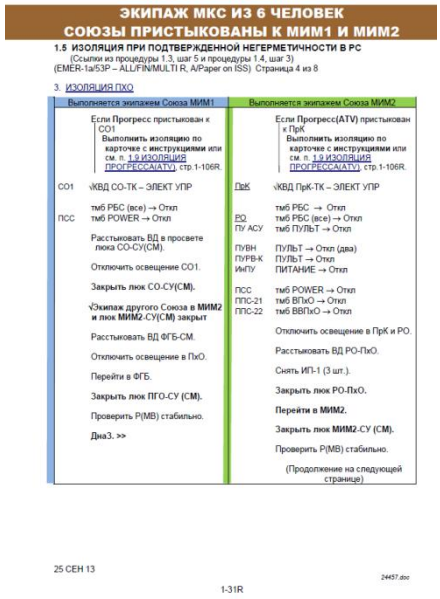


Рисунок 1 – Пример страницы ботовой документации

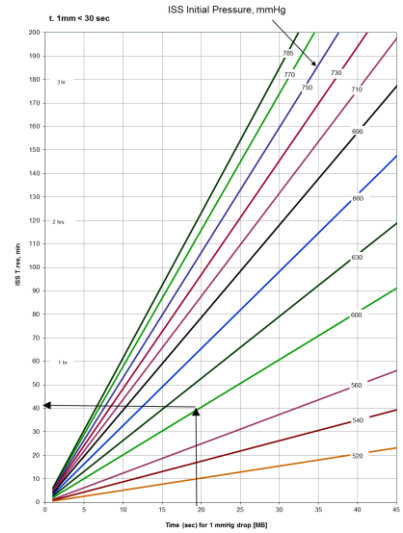


Рисунок 2 – Номограмма

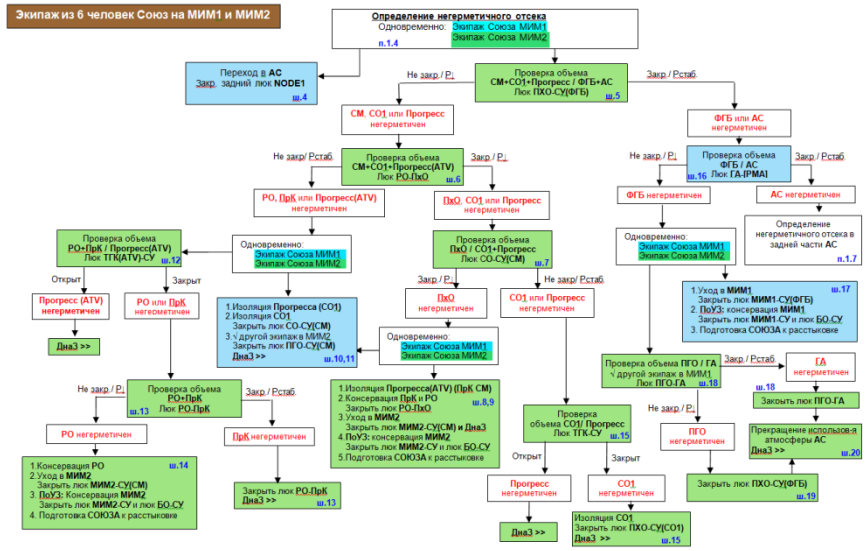


Рисунок 3 – Блок-схема

Преимущества:

- при работе с бумажной версией БД не требуются технические средства;
- независимость от электропитания и, следовательно, повышенная надежность применения при парировании нештатных ситуаций.

Недостатки:

- небольшой срок службы БД при частом использовании;
- трудности при оперативном поиске необходимой информации в массиве бортовой документации;
- многочисленные ссылки из раздела в раздел и между книгами существенно увеличивают время работы и ориентирование в процедурах;
- применяемые методы разработки и архитектура, используемые при написании БД на бумаге, не позволяют делить её на уровни и подуровни (процедуры при н/с, графическая информация, справочная информация и др.)
- отсутствует возможность предоставления информации в современном графическом виде (3d анимация, видео информация, фото в большом разрешении);
- большая масса и занимаемый объём при доставке и хранении БД на МКС;
- оперативная корректировка БД на борту невозможнав связи с тем, что её обновление происходит после доставки актуальных (новых) версий на ТГК и ТПК;
- при работе с бумажной версией БД нет связи с бортовым планом полета, с базой фотографий оборудования, доставленного на МКС, системой инвентаризации оборудования;
- при использовании бумажной версии БД нет возможности использования компьютерной обработки методической и других видов информации с использованием современных методов и алгоритмов с целью выработки своевременных решений-подсказок для экипажа.

Выявленные проблемы обуславливают направление работы по переводу БД в электронный вид с разработкой программного обеспечения (ПО), которое позволит решить следующие задачи:

- упрощение представления информации;
- возможность оперативного преобразования информации в процедуры и алгоритмы действий экипажа в процессе полета;
- автоматический подсчет резервного времени в зависимости от места возникновения аварийной ситуации.
- возможность отображения общей схемы МКС с определением герметичных и негерметичных отсеков в процессе деятельности экипажа;
- сокращение занимаемых объемов хранения документации на МКС;

Для решения поставленных задач применяются современные информационные технологии, позволяющие оптимально использовать доступное дисковое пространство и вычислительные возможности сервера и клиента, а также перераспределять эти ресурсы между вычислительными мощностями в зависимости от приоритета решаемых ими функциональных задач.

Уровень современных информационных технологий дает возможность внедрять и использовать на борту ПКА лэптопы, планшетные ПК и др. мобильные устройства. Благодаря появлению и активному использованию устройств на борту появилась возможность работать с электронной версией БД.

В настоящее время экипаж на борту использует БД в электронном виде в двух форматах – pdf и doc. Новые версии БД доставляются на ПКА на CD носителях.

2 Многофункциональная информационная система (МИС)

Благодаря использованию МИССовершенствуется процесс информационной поддержки деятельности экипажей во время полета. Об этом свидетельствует опыт американских партне-

ров, максимально использующих собственную, а также европейскую и японскую бортовую документацию в электронном виде. За счет, оперативного обновления процедур повышается качество предоставляемой экипажу информации.

В состав МИС входят два комплекса: наземный и бортовой (рисунок 4).

С помощью наземного комплекса осуществляется поддержка актуальных версий бортовых процедур и их взаимосвязей, оперативная разработка и корректировка переменной информации бортовых процедур, управление обменом информацией с бортовым комплексом МИС и синхронизацию данных в бортовом и наземном комплексах.

Наземный комплекс разработанна основе систем Windchill и Arbortextc использованием технологии оперативного формирования актуального документа по принципу единого источника.

Бортовой комплекс обеспечивает хранение на борту МКС электронной версии БД, быстрый поиск необходимой информации на базе использования связей процедур с бортовым планом полета и между собой, а также отображение информации экипажу с учетом ранее выполненных и выполняемых в текущий момент времени операций.

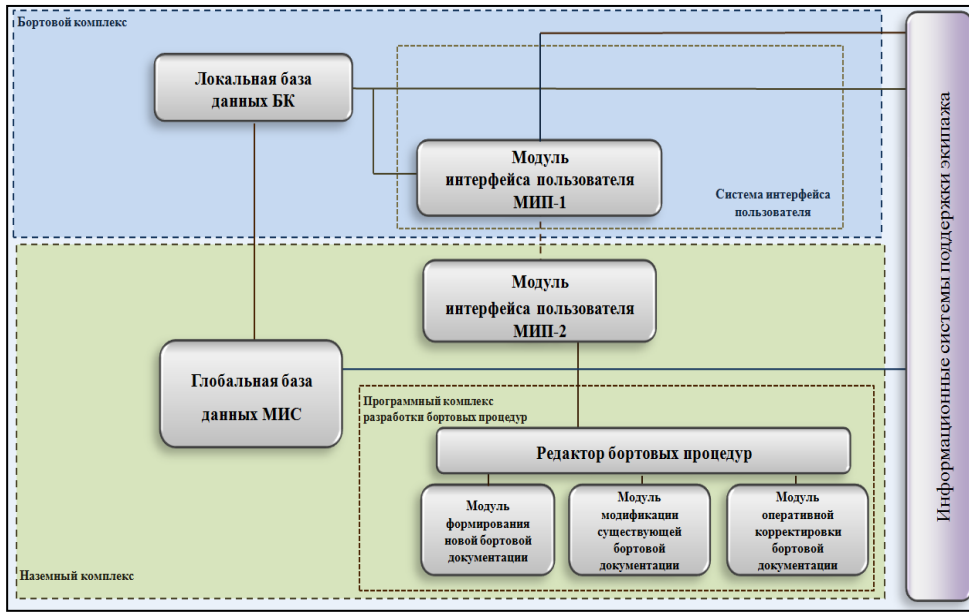


Рисунок 4 – Функциональная схема системы МИС

В программном комплексе разработки бортовых процедур осуществляется фрагментация материала и формирование гиперсвязей, обеспечивающих возможность его компоновки для того, чтобы:

- полноценно, понятно и компактно представить необходимую в данный момент информацию;
- осуществить его привязку к бортовому детальному плану полета;
- объединить материалы из разных разделов бортовой документации и радиограмм для выполнения комплексной полетной операции.

МИС функционирует под управлением операционных систем семейства Windows,Android, iOS. Защита от несанкционированного доступа к документам и функциям МИС достигается путем разграничения прав доступа операторов и пользователей. Индивиду-

альная настройка и изменение параметров информационного поля с учетом расширения возможностей и предпочтений пользователя, позволяет сделать систему комфортной.

Структура МИС позволяет привязать к основному телу процедуры необходимые элементы (рисунок 5), в самой процедуре представляется линейное описание конкретных операций. Такой подход значительно упрощает ориентирование между элементами процедур. При этом основное тело процедуры содержит минимальные сведения, необходимые для выполнения операции.Интеграция процедуры с дополнительными элементами значительно повышает её информативность.

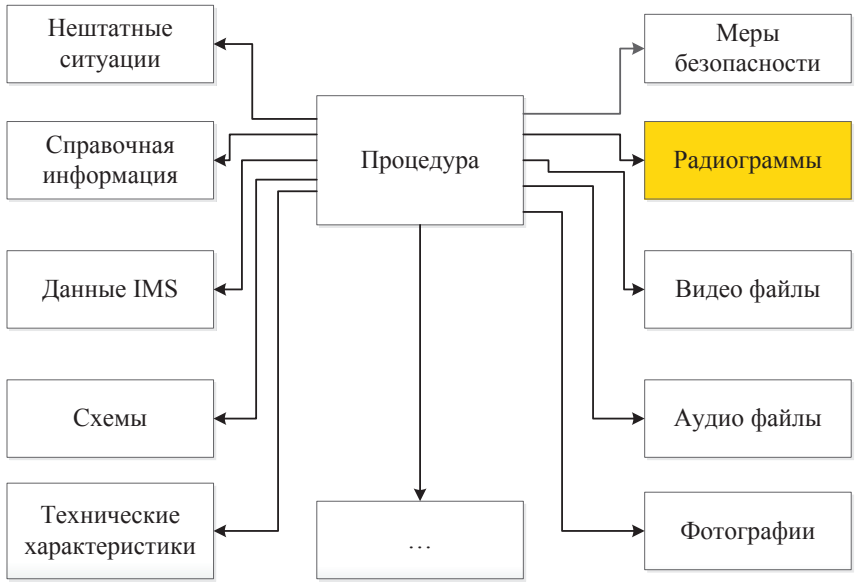


Рисунок 5 – Взаимодействие процедуры и элементов

Перед отправкой бортовой инструкции на борт происходит выборка необходимых процедур в виде XML-файлов с последующей загрузкой в файловую систему наземного комплекса до её отправки.

3 Модуль интерфейса пользователя (МИП)

МИП - одна из важнейших составляющих многофункциональной информационной системы.Данный модуль обеспечивает компоновку и представление экипажу информации, которая подготавливается в Arbortextна основе массивов бортовой и справочной документации. МИП – основное программное средство общения космонавта с многофункциональной информационной системой. Комплекс предназначен также для информационной поддержки действий экипажа при наземном изучении содержания бортовых работ и порядка их выполнении в орбитальных условиях. [2]

Обновление бортовых процедур реализуется на бортовом сервере, где установлена служба, которая выполняет анализ необходимой директории на предмет появления новых версий бортовых инструкций и в случае обнаружения копирует их в МИП. Передача обновленных инструкций в директорию сервера с Земли осуществляется через каналы связи.

Поиск необходимой информации производится среди архивных и актуальных документов в соответствии с различными критериями.

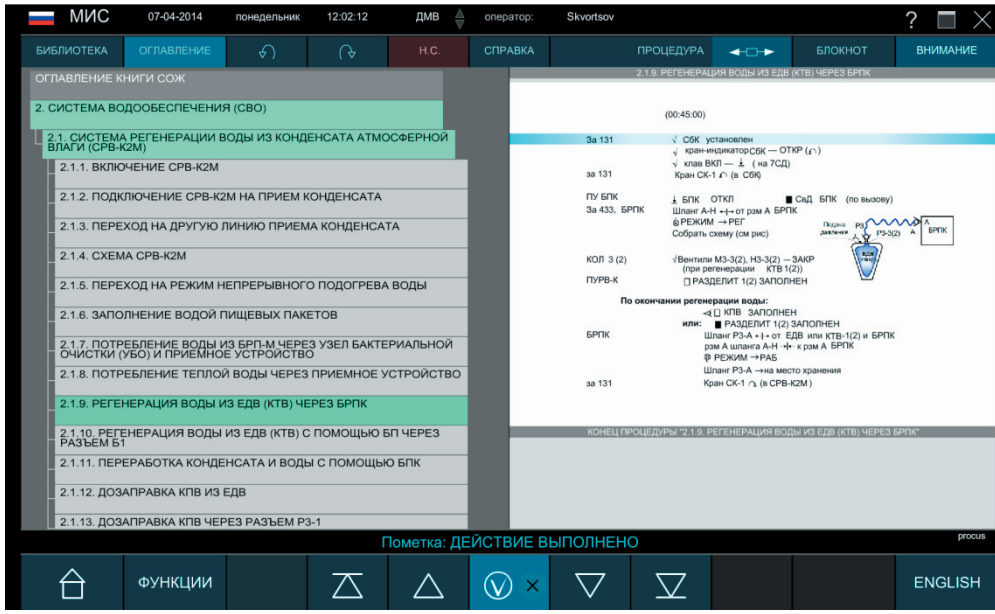


Рисунок 6 – Окно интерфейса пользователя

Программный комплекс разработки бортовых процедур обеспечивает возможность в короткое время интегрировать в единый документ различные информационные фрагменты,в частности, объединение заранее подготовленной типовой части планируемой процедуры с текущими данными, параметры настройки и другие сведения, необходимые для выполнения операции[3].

Интерфейс комплекса МИП включает набор инструментов, позволяющий производить форматирование текстового и графического материала при разработке и корректировке электронной бортовой документации. Предусмотрены наборы символов, шрифтов, таблиц и шаблонов, использующихся при разработке существующей бортовой документации с учетом стандартов бортовой документации МКС (ODF).

Реализуются следующие режимы взаимодействия оператора и информационного комплекса в рамках МИП: ознакомление, интерактивная работа в процессе выполнения полетной операции, воспроизведение документированной сессии.

В МИП реализовано хранилище, которое структурированно по разделам: библиотека, книги, процедуры, действия. Для их воспроизведения МИП строится в многооконном варианте с распределением информации по типам окон с реализуемыми функциями (см. рисунок 6).

4 Система поддержки принятия решения (СППР)

Программный комплекс многофункциональной информационной системы (МИС) планируется расширить за счет разработки и внедрения системы поддержки принятия решений (СППР). Это позволит повысить эффективность действий экипажей ПКА во время штатного и нештатного хода полета, безопасность и оперативность выполнения операций по парированию нештатных ситуаций (НС), предоставляя экипажу ПКА актуальную информацию:

- по текущей конфигурации международной космической станции (разное количество пилотируемых и грузовых кораблей);
- по алгоритму действий в зависимости от хода развития НС с учетом влияющих факторов;
- резервное время на безопасное парирование НС;
- расчет степени опасности возникшей НС.

Существует несколько различных определений «Система поддержки принятия решений».

СППР — это «совокупность процедур по обработке данных и суждений, помогающих руководителю в принятии решений, основанная на использовании моделей» [4].

СППР — это «интерактивные автоматизированные системы, помогающие лицу, принимающему решения, использовать данные и модели для решения слабо структурированных проблем» [5].

СППР — это «система, которая обеспечивает пользователям доступ к данным и/или моделям, так что они могут принимать лучшие решения»[6].

Большое количество исследователей под системами поддержки принятия решений понимают – «интерактивные компьютерные системы, которые помогают лицу, принимающему решение, использовать информацию и модели для решения слабоструктурированных или трудно формализуемых задач»[7].

Исходя из определений СППР и учета специфики области её применения, она имеет следующую структурную схему, которая представлена на рисунке 7.

Рисунок 7 –Структурная схема системы поддержки принятия решений

Рассмотрим СППР на примере нештатной ситуации - разгерметизация.

В данной статье под нештатной ситуацией (НС) понимается совокупность обстоятельств, обусловленных действием возмущающих факторов и представляющих угрозу безопасности или выполнению задач полета, под аварийной ситуацией – совокупность множеств катастрофических и критических нештатных ситуаций [8].Под разгерметизацией понимается потеря герметичности КА.

Модуль сбора информации. Предназначен для сбора и систематизации необходимой для анализа нс информации, которую вносит в систему экипаж: место возникновения разгерметизации (если известно) давление в отсеках, состояние люков между отсекамии т.д.

Модуль анализа информации. Проводится анализ поступающей информации о возникновении НС, привлекаются сведения из базы данных о текущей конфигурации ПКА.

Модуль предоставляет информацию о месте возникновения НС (название модуля/отсека, люков, средства наддува), общих параметрах текущей конфигурации МКС (объем, давление и т.д.), ресурсов и средств парирования НС. Эти сведения необходимы для моделирования НС. Они могут храниться во внутренней базе данных системы.

Модуль моделирования НС. Моделирование НС осуществляется на основе характеристик станции, результатов анализа информации о НС и алгоритмах, описывающих действия экипа-

жа при разгерметизации. На основе данных, поступивших из модулей сбора и анализа информации, вырабатывается информация, которая будет предоставлена экипажу.

Используя точные математические модели, система позволяет моделировать НС и рассчитывать: темп падения в отсеках, текущие и прогнозные значения давления в каждом из отсеков станции, резервное время нахождения экипажа в отсеке.

Выстраивается сценарий развития НС, по которому далее строится цепочка работы экипажа. При этом модуль формирует данные, необходимые для прогнозирования развития НС на предстоящий интервал времени, что позволит экипажу оценить возможное дальнейшее развитие ситуации.

Модуль формирования рекомендаций. На основе данных, поступающих из модуля моделирования НС, модуля анализа информации, а также дополнительной информации, неучтенной в СППР, на схеме отображается место, где произошла НС, какие действия необходимо осуществить для ликвидации разгерметизации, контроль резервного времени и т.д.

В настоящее время разрабатывается пользовательский интерфейс СППР в виде экранных форм. На рисунке 8 представлено окно диалога с пользователем, содержащее:

- необходимую в данный момент информацию из БД;
- параметры, используемые для определения резервного времени;
- область экрана, отображающую указанный модуль, из которой можно перейти на схему с проверенными на герметичность отсеками (рисунок 9). Зеленым подсвечиваются герметичные отсеки, оранжевым - не проверенные, красным - негерметичный.

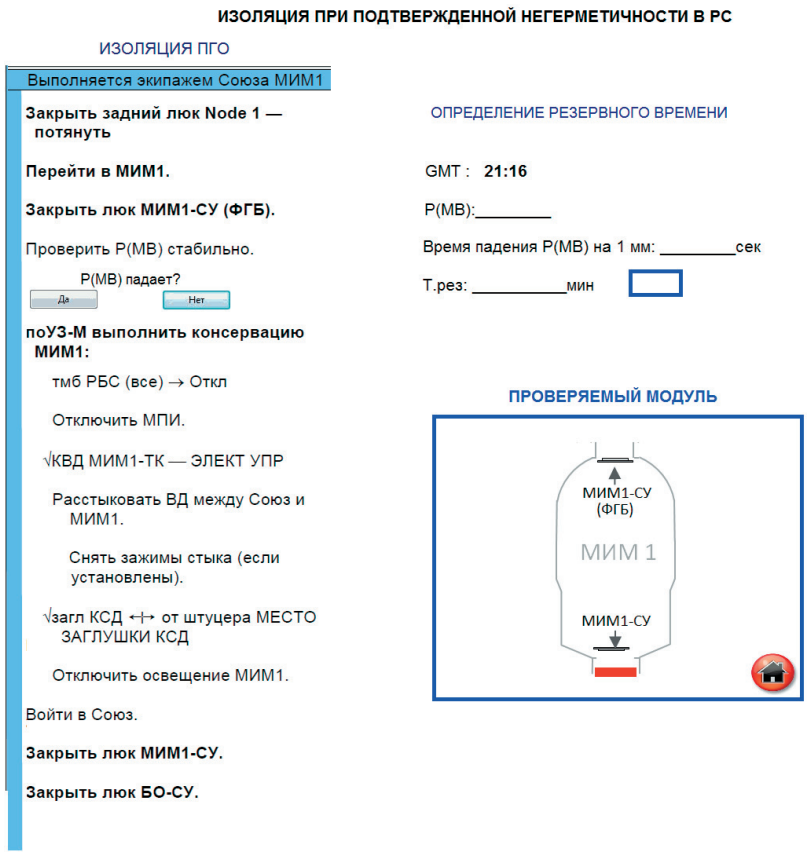


Рисунок 8 – Окно представления информации экипажу в СППР

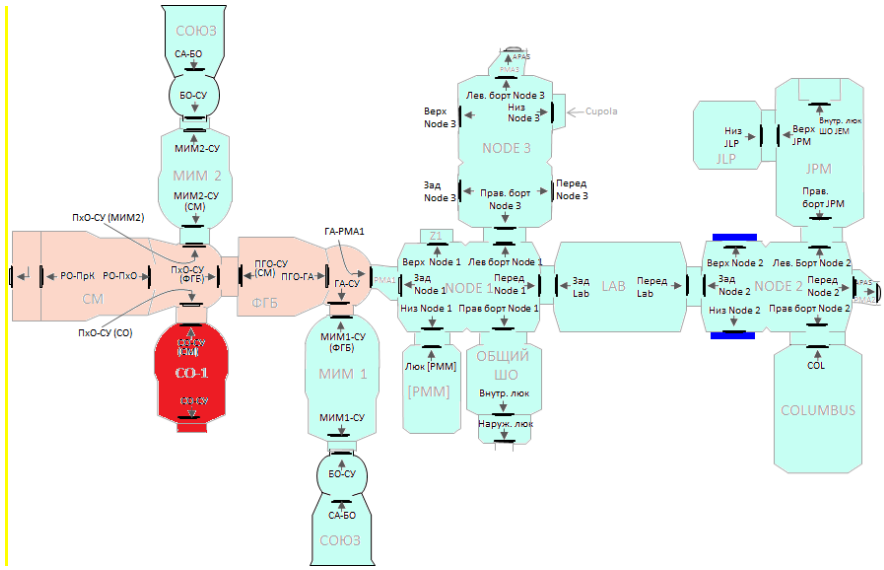


Рисунок 9 – Схема МКС при определении герметичности отсеков

Заключение

В развитие многофункциональной информационной системы, которая уже разработана и применяется в управлении полетом КА, добавление системы поддержки принятия решения позволит предоставить экипажу необходимую информацию по действиям в нештатных ситуациях. Это обеспечит повышение безопасности экипажа при возникновении различных негативных ситуаций с использованием современных технологий.

Список литературы

[1] Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами: учеб.пособие: в 2 ч.; [под общ. ред. Л.Н. Лысенко]. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009].

[2] Душенко А.Г. Котов А.Г., Арестов Д.С., Горбачев Е.Б. Многофункциональная информационная система поддержки действий экипажа //международный журнал «Программные продукты и системы»,2013 № 3 С.54-61

[3] Lotov V., Morugin A., Perenkov S., CLUB 3D: Innovatsionnoeproektirovanie [Club 3D. Innovativeingineeringdesign], 2011, no. 4

[4] Little I.D.C. Models and Managers: The Concept of a Decision Calculus // Management Science, 1970. — v.]

[5] Power D. J. Web-based and model-driven decision support systems: concepts and issues. AmericasConferenceonInformationSystems, LongBeach, California, 2000

[6] Edwards J.S. Expert Systems in Management and Administration — Are they really different from Decision Support Systems? // European Journal of Operational Research, 1992. — Vol. 61. — pp. 114—121.]

[7] Кравченко Т. К., Исаев Д. В. Экономические информационные системы // В кн.: Информатика / Под общ. ред.:С. В. Назаров. . Т. 1. М.: Национальный открытый университет «ИНТУИТ», 2012. № 3. С. 278

[8] Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. Ч. 1. 476 с.

МЕТОДИКА ПАРИРОВАНИЯ АНОМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ЗНАНИЙ ДЛЯ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ

А.В. Донсков

ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева
141070, Московская область, Королев, ул. Ленина 4а,Россия
aleksej_ne@mail.ru
тел: 8 (499) 5160978

Ключевые слова: *аномальная ситуация, оперативное управление полетом, структурированные базы знаний, нечеткие множества, лингвистическая переменная*

Abstract

Throughout the flight the spacecraft is probable that the various situations that may lead to unintended consequences. Typically, these situations are called anomalous. Their appearance threatens safety of the crew and the spacecraft and flight program. The article describes a technique of their parry using the structuring of knowledge about the process and facility management in operational control circuit, as well as a model of decision-making based on fuzzy set theory.

Введение

Приоритетной задачей оперативного управления полетом космического аппарата (КА) на всех этапах его полета является обеспечение высокого уровня безопасности, как экипажа, так и КА. В настоящее время под управлением полетом КА понимается процесс управления параметрами состояния бортовых систем КА (последовательное изменение одних и поддержание в определенных пределах других), направленное на достижение цели полета [1]. Для того чтобы в ходе полета КА правильно принимать решения об изменении текущего состояния бортовых систем с помощью управляющих воздействий, необходимо всестороннее оценить его и прогнозировать дальнейшие его изменения. Но необходимо отметить, что в ходе полета текущее состояние КА может видоизменяться под действием внешних факторов (агрессивная внешняя среда, физические воздействия и т.д.), что ведет к негативным последствиям.

В таких ситуациях лицо, принимающее решение (ЛПР), ограничено как во времени, в течение которого необходимо принять верное решение, так и в информации о них, а, следовательно, неопределенность понимания текущей ситуации зачастую вызывает приближенное решение, основанное лишь на интуиции или личном опыте.

Одной из основных особенностей управления полетом КА является использование в процессе управления большого объема разнородных знаний в относительно компактные промежутки времени. С развитием космических систем отмечается неуклонный рост общего объема знаний, обрабатываемых при управлении полетом, увеличивается и объем знаний, приходящийся на каждую предметную область. При этом в настоящее время информационные возможности по обработке данных из каждой предметной области по ряду причин пока остаются такими же, какими были при контроле полета простых КА. Следовательно, на ЛПР увеличивается информационная нагрузка, и ему приходится сосредотачиваться на отдельных вопросах за счет снижения внимания к смежным.

Упрощение анализа текущего состояния КА возможно за счет формализации знаний в виде структурированных баз знаний предметных областей (совокупность разнородных баз знаний, описывающих состояние и отслеживающих динамику изменений, происходящих в определенных предметных областях).

В данной работе представлена одна из возможностей структуризации и использования знаний в процессе оперативного контроля состояния пилотируемых космических аппаратов в процессе управления полетом. Также рассмотрена возможность совместного их применения с теорией нечетких множеств для принятия решений в процессе управления полетом космического аппарата при возникновении аномальной ситуации (в условиях неопределенности).

1 Аномальные ситуации (АС)

Под аномальной ситуацией понимается совокупность обстоятельств, возникших под воздействием внешних факторов и негативно влияющих на выполнение программы полета или безопасность экипажа.

В настоящее время АС классифицируются в зависимости от степени тяжести последствий, к которым они могут привести, если не будут вовремя ликвидированы.

АС делятся на следующие виды:

- катастрофические (сложившиеся в результате неустранимых отказов и приводящие к гибели экипажа или его травмированию с утратой работоспособности либо к потере одного из жизненно важных элементов КА и неспособности выполнять дальнейшие операции полета). К катастрофическим ситуациям относится и утрата возможности управления полетом;
- критические (приводящие к длительной потере функций или элементов КА либо к травмированию экипажа без потери его работоспособности или влияющие на физическую целостность и безопасность КА, последствия которых могут быть устранены вмешательством экипажа или главной оперативной группой управления);
- некритические (не несут в себе указанных признаков критических и катастрофических АС).
- В зависимости от возможного выхода из АС они подразделяются на два вида:
- расчетные (выход из которых возможен);
- нерасчетные (выход из которых невозможен либо осуществляется с малой вероятностью).

Катастрофические, критические и некритические АС бывают рассмотренными (то есть выявленные при анализе работы систем КА до полета или на этапах летных испытаний) и не рассмотренные (возникновение которых было не предвидимым).

Признаком возникновения АС является выход какого-либо параметра состояния КА за пределы нормы (заранее установленного значения). По содержанию признака выявляется определенный круг ранее рассмотренных АС, которым он может соответствовать. Для идентификации возникшей АС рассматриваются различные состояния КА, которые включают как фактические значение их параметров, так и описывающие все возможные ситуации из указанного выше круга [2].

Конкретное содержание этого признака очерчивает определенный круг рассмотренных НС, которым оно может соответствовать. Совпадение описания какой-либо АС, входящей в этот круг, со складывающейся картиной, установленное при сравнении, позволяет идентифицировать возникшую аномальную ситуацию. В этом случае парирование происходит согласно заранее подготовленной технической документации (включающей планы полета, бортовую документацию, инструкции, методики и т.д.). В противном случае возникшая АС квалифицируется как нерассмотренная заранее. Это затрудняет её парирование с учетом необходимости подготовки, разработки и проверки на правильность плана дальнейших действий в условиях дефицита времени, так как развитие АС может быть скоротечным и зависит от степени её критичности.

На рисунке 1 представлен действующий алгоритм функционирования системы управления при возникновении АС в соответствии с временной циклограммой.

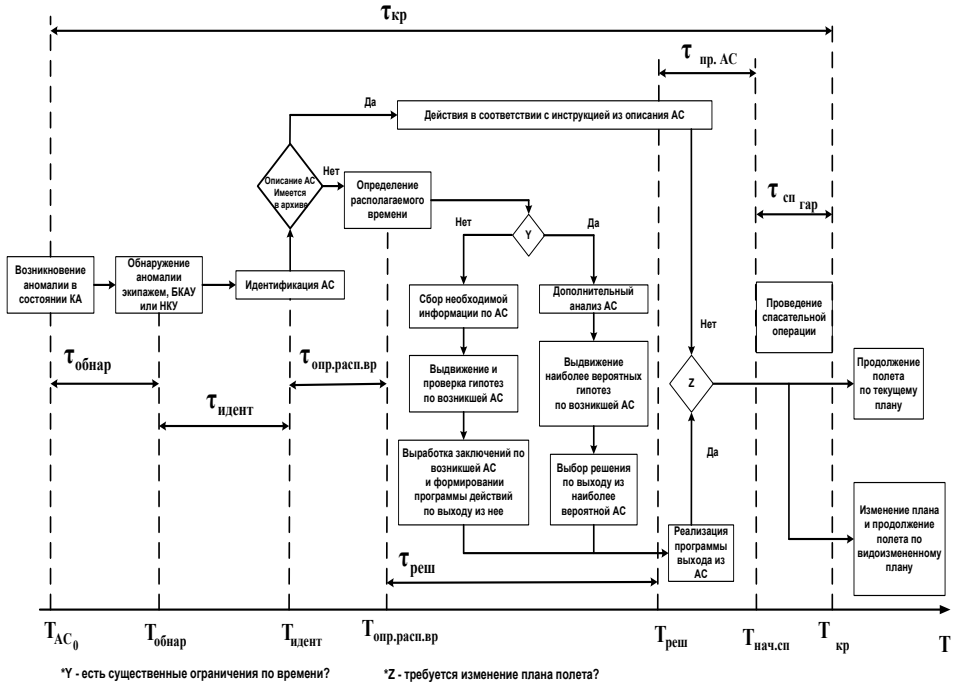


Рисунок 1 – Алгоритм функционирования системы управления при возникновении АС в соответствии с временной циклограммой.

Соответственно, на рисунке 1 представлены следующие обозначения:

Тобнар – момент времени обнаружения аномалии, Тident – момент завершения идентификации АС, Треш. – момент принятия решения и начала действий по останову развития АС, Топр.расп.вр. – момент завершения определения располагаемого времени, Тнач.сп.оп. – предельно поздний момент начала спасательной операции, Ткр – расчетный или прогнозируемый момент наступления критической фазы АС, τкр – продолжительность достижения критической фазы развития данной АС**,** отсчитываемая от момента её возникновения; τобнар – длительность обнаружения аномалии, от начала наблюдения соответствующего параметра до установления факта его выхода за пределы нормы, τident – длительность процедуры идентификации данной АС, τреш – длительность подготовки и принятия решения о парировании АС (включает в себя τпод. (длительность подготовки решения) и τприн (длительность принятия подготовленного решения)), τопр.расп.вр. – длительность определения располагаемого времени на остановку АС, τрасп. – располагаемое время на остановку развития АС от момента завершения идентификации данной АС до момента наступления критической фазы, τост.АС – время на останов развития и нормализацию данной АС, $\tau_{сп.оп._{гар}}$– гарантированная длительность операции по спасению экипажа и/или по переводу ПКА в режим выживания, если ликвидация АС не может быть осуществлена до наступления критической фазы [2].

Несмотря на отлаженность данного алгоритма (рисунок 1) за время его применения, есть ряд факторов, которые обуславливают возникновение следующих недостатков:

- сложность процесса парирования АС;
- ограниченность принятия решения во времени;
- затрудненность прогноза развития текущего состояния КА;
- постоянное усложнение КА, соответственно и возникающих АС при их эксплуатации;

- разрозненность необходимых знаний об объекте и специфике его управления предшествующими полетами.

Выявленные недостатки очерчивают круг задач, которые необходимо решить для повышения эффективности и оперативности процесса управления при возникновении АС в ходе полета КА. Решение их возможно с помощью современных технологий, которые применяются для компоновки необходимых знаний в процессе оперативного управления полетом КА в виде определенных структур. Под структурами понимаются специализированные базы знаний. Такой подход обеспечивает оперативный доступ к необходимой информации по парированию аномальных ситуаций, а так же согласованность действий специалистов. Использование терминов и понятий позволяет расширить круг применяемых подходов к принятию решения, в частности, использование теории нечетких множеств.

2 Структуризация и использование знаний в процессе оперативного контроля состояния пилотируемыми космическими аппаратами

В настоящее время компьютеризация знаний о целых предметных областях для повышения качества работы с ними происходит с помощью наделения их способами представления интеллектуальных свойств, через взаимодействие отдельных объектов между собой.

Центральной компонентой подхода к компьютеризации знаний стали структурированные базы знаний предметных областей, создание которых заключается в представлении утверждений об объектах предметной области, их свойствах и отношениях между ними.

Структурированные базы знаний представляют собой совокупность разнородных баз знаний, описывающих состояние и отслеживающих динамику изменений, происходящих в определенных предметных областях, ориентированную на совместное многократное использование различными пользователями в своих приложениях.

Разработка таких баз знаний позволит формализованно описать необходимые знания о предметной области (в нашем случае под предметной областью понимается отдельная область объекта управления, в частности, отдельная его система: система управления движением и навигации (СУДН), система электропитания (СЭП) и т.д.), используемые в правилах принятия решений, и включающие описание аномальных ситуаций (их причин, последствий) и способы их парирования. Они содержат базовые определения проблемной области, позволяет по возможности выделить знания предметной области, используемые для принятия решений в полетных ситуациях.

Для их представления используется семантическая сеть, которая состоит из узлов и упорядоченных отношений (связей), соединяющих эти узлы. Узлы выражают понятия или предположения о предметной области, а связи описывают взаимоотношения между этими узлами.

Формализованное представление знаний в форме структурированных баз:

- обеспечивает единство терминологии;
- позволяет специалистам оперативно использовать знания о потребностях объектов в ходе работы и принятия решений;
- даёт возможность расширения знаний в случае появления новых составляющих (модулей) КА, использования новых средств принятия решений в полетных ситуациях и др.;
- обеспечивает возможность анализа альтернативных вариантов принятия решений в полетных ситуациях с помощью различных средств;
- обеспечивает возможность моделирования различных сценариев принятия решений в полетных ситуациях.

Решение задачи их использования нужно для того, чтобы стало возможным изменять знания, используемые при автоматизированной поддержке принятия решений. Действительно, конфигурация, состав оборудования таких КА, как, например, МКС, постоянно меняются и можно предложить описывать предметные области этой станции отдельными базами знаний

(определениями и отношениями), которые потом использовать для построения моделей различных модулей станции, и отражать текущее состояние станции. Это позволит отделить знания об объектах и их связях от программного кода системы и пополнять описания мира станции по мере необходимости, без перепрограммирования системы в каждом случае изменений, например, ее компонент или грузов.

Структурированные базы знаний включают в себя целый комплекс понятий от самых общих до наиболее конкретных, охватывающий полный спектр объектов и отношений, включая события и процессы во времени и пространстве.

Эта система объектов связывается как универсальными зависимостями типа «общее-частное», «часть-целое», «причина-следствие» и т.п., так и специфическими для соответствующей предметной области.

Другими словами, база знаний представляет собой модель предметной области, использующую все допустимые средства представления знаний, соответствующие этой предметной области [3].

Актуальность создания структурированных баз знаний вызвана следующими потребностями специалистов при наличии существующих возможностей, предоставляемых базами [4]:

- необходимость совместного использования знаний определенной предметной области различными специалистами для общего понимания структуры информации и текущей ситуации;
- повторное использование располагаемых знаний в предметной области;
- расширение возможности анализа определенной предметной области;
- возможность сделать имеющиеся допущения в предметной области легко доступными для ЛПР.

Структурированные базы знаний включат в себя общие и специфические понятия и термины конкретных предметных областей. Для их представления предлагается следующая модель:

$O = <C, R, F>$,

где C – непустое множество понятий (терминов) предметной области;

R – множество отношений между понятиями X;

F – множество вариантов представлений текущей ситуации, заданных в понятиях X и (или) отношениях R.

Для такой формализации возможны следующие частные случаи.

1) $R = \varnothing$, $F = \varnothing$ – являются пустыми множествами и не содержат ни одного элемента; в этом случае база знаний представляет собой простой словарь и ее практическое использование целесообразно, если термины принадлежат очень узкой предметной области и их смыслы уже заранее согласованы в пределах некоторого сообщества. Примером такой ситуации могут служить обычные поисковые системы.
2) $R = \varnothing$, $F \neq \varnothing$ – множество отношений не является пустым, а множество вариантов представлений пустое, тогда каждому элементу множества X может быть поставлена в соответствие функция интерпретации. При этом часть таких интерпретирующих терминов задается как правила преобразования объектов предметной области, а не утверждениями, то есть смысл терминов предметной области может динамически меняться в зависимости от перехода между предметными областями.

В общем случае ($X \neq \varnothing$, $R \neq \varnothing$, $F \neq \varnothing$ – все множества являются не пустыми) основной акцент делается на задание семантических отношений, имеющихся в предметной области, вместе с созданием единой структуры понятий, терминов и правил их интерпретации.

Использование структурированных баз знаний дает следующее [6]:

- представление естественно-языкового текста в таком виде, что он становится пригодным для автоматической обработки;

- накопление ценной информации о функционировании сложных систем; такой анализ начинается с составления словаря терминов, а также создания системы точных определений этих терминов; документируются основные логические взаимосвязи между соответствующими терминами и понятиями; результатом этого анализа является словарь терминов и их точные определения, взаимосвязи между ними;
- формирование целостного взгляда на предметную область, возможность восстановить недостающие логические связи во всей их полноте; материал, представленный в единой форме, гораздо лучше воспринимается и воспроизводится.

Виды информации, используемые для разработки структурированных баз знаний

Для структуризации необходимых знаний в базы используются следующие источники информации:

- телеметрическая информация (ТМИ);
- данные о расчетных аномальных ситуациях КА согласно проектной документации;
- сообщения экипажа, собранные специалистами в журналах по анализу действий экипажа;
- электронные версии эксплуатационно-технической документации: бортовая документация, процедуры, инструкции, методики и т.д.

Особое значение для описания, контроля и анализа текущего состояния КА имеет ТМИ. В настоящее время используется бортовая и наземная аппаратура с высоким уровнем автоматизации всех процессов получения, передачи и обработки измерительной информации. Устройства автоматического преобразования, кодирования и обработки ТМИ гарантируют высокую точность и оперативность получения данных телеизмерений при числе параметров, измеряемых на одном объекте, доходящим до нескольких десятков тысяч [7,8,9].

ТМИ, поступающая с борта КА, может быть разделена на следующие основные группы:

1) Информация о состоянии и функционировании бортовых систем/узлов/агрегатов КА;
2) Информация о параметрах внутренней и окружающей среды КА;
3) Информация о медико-биологических параметрах человека (экипажа).
4) В зависимости от целей телеметрическая информация обеспечивает:

- получение информации о соответствии характеристик КА техническим требованиям;
- контроль функционирования бортовых систем и состояния экипажа КА, а также параметров среды, в которых они работают;
- выявление неисправностей и отклонения контролируемых параметров от нормы, а также необходимую информацию для их устранения.

Объединение информации воедино позволяет подробно описать текущее состояние КА. Таким образом, представление знаний о процессе управления и объекте управления в виде баз знаний (термины и определения) делает процесс управления полетом более четким и понятным специалистам. Но при возникновении аномальной ситуации из-за недостатка поступающей информации, в частности ТМИ, возникают неопределенности в описании текущего состояния КА. Ввиду недостатка информации для строгого применения вероятностных моделей и трудностей оперирования случайными величинами, а также в связи с тем, что с интервальными величинами можно работать в рамках теории нечетких множеств (ТНМ), последняя приобретает здесь важное значение. На практике всегда имеется возможность наряду с точечной оценкой параметра (наиболее допустимым его значением) указать минимальное и максимальное значение (интервал), которое может принимать нечеткая величина. Кроме того, можно построить функцию, характеризующую допустимость каждого значения внутри заданного интервала на основе статистического материала, который содержится в базах знаний. ТНМ дает возможность проводить вычисления не с одним точечным значением, а с характеристической функцией и получать в результате вычислений нечеткую величину, для которой по максимуму значения функции может быть получена точечная (четкая) оценка.

3 Нечеткие множества

Теория нечетких (размытых) множеств была впервые предложена американским математиком Лотфи А. Заде в 1965 г. и предназначалась для устранения сложности представления неточных понятий, анализа и моделирования систем, в которых участвует человек.

В более общем случае значениями таких переменных могут быть слова или предложения естественного или формального языка, и тогда соответствующие переменные называют лингвистическими. Например, нечеткая переменная «давление» может принимать следующие значения: высокое, невысокое, довольно высокое, очень высокое, высокое, но не очень, вполне высокое, более или менее высокое. Эти значения представляют собой предложения, образованные понятием «высокое», отрицанием не, союзами и, но, а также словами типа очень, довольно, вполне, более или менее.

Лингвистическая переменная является переменной высокого порядка и её значениями являются нечеткие переменные. Лингвистические переменные предназначены в основном для анализа сложных или плохо определенных явлений. Использование словесных описаний типа тех, которыми оперирует человек, делает возможным анализ систем настолько сложных, что они недоступны обычному математическому анализу [10].

Более точно структура лингвистической переменной описывается набором (N, T,X,G,M), в котором N - название этой переменной; T - терм- множество N, т.е. совокупность ее лингвистических значений; X - универсальное множество с базовой переменной x; G-- синтаксическое правило, которое может быть задано в форме бесконтекстной грамматики, порождающей термы множества T; M - семантическое правило, которое каждому лингвистическому значению t ставит в соответствие его смысл, причем M(t) обозначает нечеткое подмножество множества X [11].

Значениями лингвистической переменной являются нечеткие множества, символами которых являются слова и предложения в естественном или формальном языке, служащие, как правило, некоторой элементарной характеристикой явления.

Язык можно рассматривать как соответствие между множеством терминов T и областью рассуждения X. Это соответствие характеризуется нечетким называющим отношением N из T в X, которое связывает с каждым термином t в T и каждым элементом x в X степень $\mu(t,x)$ применимости t к x.

Для фиксированного t функция принадлежности $\mu(t,x)$ определяет нечеткое подмножество M(t) из X, которое является смыслом или значением Таким образом, значение термина t есть нечеткое подмножество M(t) из X, для которого t служит символом.

Термин может быть элементарным, например t = высокое, или составным, когда он является сочетанием элементарных терминов, например, t = очень высокое.

Более сложные понятия могут характеризоваться составной лингвистической переменной. Например, понятие «система» может рассматриваться как название составной лингвистической переменной, компонентами которой являются лингвистические переменные «ресурс», « узел», «рабочее тело» и т.п.

Для лингвистической переменной «ресурс» соответствующая базовая переменная является по своей природе числовой переменной. С другой стороны, для лингвистической переменной «узел» мы не имеем четко определенной базовой переменной. В этом случае функцию принадлежности определяют не на множестве математически точно определенных объектов, а на множестве обозначенных некими символами впечатлений. Следует отметить, что благодаря использованию принципа обобщения большая часть существующего математического аппарата, применяющегося для анализа систем, может быть адаптирована к нечетким и лингвистическим переменным с числовой базовой переменной.

4 Пример применения теории нечетких множеств в парирование аномальных ситуаций совместно со структурированными базами знаний

Рассмотрим пример прогнозирования масштабов загрязнения в случае утечки аммиака из контуров охлаждения вовнутрь КА. Непосредственно после аварии принимаются конкретные данные о количестве выброшенных отравляющих токсичных веществ и реальные условия внутренней среды (атмосферы).

Обобщено, что размер масштабов зоны загрязнения состоит из двух частей:

1) Определяются эквивалентные количества ядовитых веществ.
2) Определяются радиусы зон загрязнения утекшим аммиаком. Полная глубина зоны загрязнения, обусловленная влиянием отравляющих токсичных веществ, определяется:

Г = Г'+0,5-Г" ,

где Г - полная глубина зоны загрязнения, Г' - наибольший радиус загрязнения, Р - наименьший радиус загрязнения.

В случае отсутствия точных исходных данных о влияющих факторах, прогноз возможных последствий проводится при показателях максимально возможному, в конкретной ситуации, выбросу токсичных веществ.

Представленная методика позволяет прогнозировать последствия аварийной ситуации с выбросом отравляющих токсичных веществ при отсутствии точных исходных данных. Целью данной методики есть обеспечение безопасности экипажа и повышение оперативности на парирование аномальной ситуации на основе лингвистических переменных с применение структурированных баз знаний.

В процессе описания влияющих факторов в качестве лингвистических переменных была предложена и испытана пятибалльная шкала. Предложенная шкала предназначена для оценки последствий (потерь) при возникновении аварии на опасном объекте управления. Взаимосвязь между предложенной шкалой и определением влияющих факторов, в качестве лингвистических переменных предложено оценить, как функциональную зависимость: $Y_i = f(x_1, x_2, ..., x_j)$, где Y_i - возможные последствия аварий; $X_1 - X_j$ соответствующий набор факторов, влияющих на возникновение аварии.

Основным показателем, который характеризует последствие аварийной ситуации, является радиус зоны загрязнения. Это расстояние, на которое распространяется опасная для жизни концентрация ядовитого вещества на протяжении какого-либо промежутка времени.

Введем следующие обозначения: X_1 - скорость перемещения воздушных масс, X_2 - объем отравляющих токсичных веществ, выброшенных в атмосферу, X_3 - температура окружающей среды, Y - радиус зоны загрязнения. Таким образом, решение задачи прогнозирования последствий аварии внутри КА состоит в том, чтобы возможному соединению факторов $X_1 - X_3$ поставить в соответствие определенное значение Y: $\tilde{Y}_i = f(\tilde{X}_i)$, где $\tilde{Y}_i$ - радиус зоны загрязнения, которое выражено в виде лингвистической переменной; $\tilde{X}_i$, - влияющие факторы, выраженные в виде лингвистических переменных.

Базовые события, которые отвечают лингвистическим переменным, описывающим влияющие факторы $\tilde{X}_1 - \tilde{X}_3$, были определены квалифицированными экспертами (согласно технической документации). Нижние и верхние значения базовых событий, соответствующие значениям лингвистических переменных $\tilde{X}_1 - \tilde{X}_3$ и $\tilde{Y}$, оцениваются по пятибалльной шкале: низкий (маленький), токе среднего, средний, выше среднего, высокий (большой). Каждое значение лингвистической переменной представляет собой нечеткое множество, заданное с помощью соответствующей функции принадлежности. Для введенных лингвистических пере-

менных $\tilde{X}_1 - \tilde{X}_3$ и $\tilde{Y}$ определены следующие числовые диапазоны значений, с соответствующими лингвистическими оценками, представленные в таблице 1.

Таблица1 – Определение влияющих факторов в виде лингвистических переменных

Лингвистическая переменная	Лингвистическая шкала	Числовой диапазон
X_1 - скорость перемещения воздушных масс	Низкая	0÷0.05м
	Ниже средней	0.05÷0.1м
	Средняя	0.15÷3м
	Выше средней	0,3÷0,5м
	Высокая	> 0,5м
X_2 - объем выброса	Малый	0÷5 мм
	Ниже среднего	5÷10 мм
	Средний	10÷30 мм
	Выше среднего	30÷50 мм
	Большой	> 50 мм
X_3 - температура окружающей среды	Низкая	<18 гр
	Ниже средней	18÷21 гр
	Средняя	21÷23 гр
	Выше средней	23÷25 гр
	Высокая	> 25 гр
Y - радиус зоны загрязнения	Малый	0÷0.6м
	Ниже среднего	0.6÷1.6м
	Средний	1.5÷3м
	Выше среднего	3÷5м
	Большой	> 5м

Во избежание сложностей при вычислении радиуса зон загрязнения предлагается все возможные ситуации, которые могут состояться при прогнозе, сводить к типичной ситуации. Под типичной ситуацией в данном случае понимается значение радиуса зоны загрязнения. Эта зона попадает в тот или иной диапазон при разных значениях факторов, которые влияют на возникновение опасного для жизни экипажа события.

Действующая методика показывает, что проведение прогнозирования при нечетких исходных данных условно проводится в пять этапов:

1) Определение количества эквивалентного содержания отравляющих токсичных веществ в объеме выброса, выраженных лингвистическими переменными.
2) Определение соответствия между полученными значениями эквивалентных значений отравляющих токсичных веществ в объеме выброса и лингвистической переменной "Количество отравляющих токсичных веществ".
3) Определение лингвистической переменной "Скорость перемещения воздушных масс " и соответственно таблице, остальных влияющих факторов.
4) Разработка нечетких логических высказываний для проведения прогноза последствий аварии в случае при выбросе отравляющих веществ.
5) Проведение прогноза последствий аварии на основе полученных правил нечеткого логического вывода.

Функциональная зависимость между нечетким значением радиуса зоны загрязнения и влияющими факторами, определяется следующим уравнением: $\tilde{Y}_i = f(\tilde{Q}_{E1}, \tilde{Q}_{E2}, \tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \tilde{X}_3)$,

где $\tilde{Q}_{E1}, \tilde{Q}_{E2}$ - количества отравляющих токсичных веществ, выраженные в виде лингвистических переменных, $\tilde{X}_1 - \tilde{X}_3$ - влияющие факторы.

Прогнозирование осуществляется при помощи разработанных правил нечеткого логического вывода вида IF X=A THEN Y=B [10]. Непосредственно, разработка правил условного логического вывода охватила известный тип следующего логического предложения: P3= IF X, is Ai and X2 is A2 and.... X,, is An THEN Y is B.

При анализе возможных радиусов зон загрязнения необходимо учитывать нечеткие исходные данные и поэтому рассматривает состояние, которое возникает в случае максимального радиуса зоны загрязнения.

Следующим шагом является разработка нечетких логических правил для проведения прогноза последствий аварийной ситуации при нечетких исходных данных.

Получено пять групп правил, любая из которых отвечает какому-либо значению параметра. Например, первая группа правил описывает возможное логико-лингвистическое соединение влияющих факторов $\tilde{Y}$, которые приводят к значению - «низкое» («маленькое»), $\tilde{Y}$ соответственно вторая группа - «ниже среднего», третья группа - «среднее $\tilde{Y}$ », четвертая группа - «выше среднего $\tilde{Y}$ », пятая группа — «высокое » («большое»):

I. ЕСЛИ X1=Н И X2=В И X3=* ИЛИ X^В И X2=В И X3=* ТО У=Н

II. ЕСЛИ X1=(Н ИЛИ НС) И X2=(ВС ИЛИ В) И (X3=*) ТО У=НС

III. ЕСЛИ X, -(НС ИЛИ С ИЛИ Н ИЛИ НС ИЛИ С) И X2=(Н ИЛИ ВС ИЛИ
ВС ИЛИ ВС ИЛИ В) И X3=(ВС ИЛИ С ИЛИ ВС ИЛИ * ИЛИ *)
ТО У=С

IV. ЕСЛИ X1=(С ИЛИ ВС ИЛИ Н ИЛИ НС ИЛИ НС ИЛИ С ИЛИ ВС) И X2=(НС ИЛИ ВС ИЛИ НС ИЛИ ВС ИЛИ НС ИЛИ ВС ИЛИ В) И Xз=(* ИЛИ НС ИЛИ * ИЛИ * ИЛИ Н ИЛИ * ИЛИ ВС)
ТО У=ВС

V. ЕСЛИ X1=(С ИЛИ С ИЛИ ВС ИЛИ В ИЛИ НС ИЛИ С ИЛИ В ИЛИ НС ИЛИ С) И X2=(Н ИЛИ С ИЛИ ВС ИЛИ НС ИЛИ С ИЛИ * ИЛИ * ИЛИ Н ИЛИ ВР) И X3=(* ИЛИ * ИЛИ НС ИЛИ * ИЛИ * ИЛИ * ИЛИ * ИЛИ С ИЛИ*)
ТО У=В

Символ «*» означает, что определенная переменная может принимать любое значение. В таблице 2 приведены значения радиусов зон загрязнения согласно логическим выводам.

Таблица 2 – Значение радиуса зоны загрязнения

Объем выброса	Скорость перемещения воздушных масс	Температура	Радиус зоны загрязнения	
			Лингвистическая оценка	Числовой диапазон
Н	В	*	Н	0÷0.6м
Н	ВС	*	НС	0.6÷1.6м
Н	В	*	НС	
НС	ВС	*	НС	
НС	ВС	*	С	1.5÷3м
НС	НС	Н	ВС	3÷5м
С	ВС	*	ВС	
ВС	В	ВС	ВС	
НС	Н	С	В	÷ 5м
С	ВС	*	В	

Согласно документации по действиям в аварийных ситуациях (аварийная книга Emergency) выделяется 5 уровней загрязнения:

Уровень 4 (Красный) – наиболее опасный выброс (не поддается очистке);

Уровень 3 (Оранжевый) – опасный выброс (поддается очистке);

Уровень 2 (Желтый) – опасный выброс;

Уровень 1 (Синий) – наименее опасный выброс.

Таким образом, не имея четких значений параметров описывающих текущее состояние КА, получена приблизительная картина происходящего. Исходя из нее, у лица, принимающего решение, есть понимание того, какие предпринимать дальнейшие действия по парировании текущей аномальной ситуации.

Заключение

Структуризация необходимой информации в управлении полетом КА в виде баз знаний представляет собой современный подход к структуризации и систематизации накопленных знаний, и, безусловно, является необходимым условием дальнейшего развития автоматических систем управления полётом. Создание структурированных баз знаний позволит повысить эффективность оперативного управления полетом в ходе возникновения АС, а также обеспечит возможность повторного применения необходимых знаний с учетом изменения текущего состоянии КА. Применение их совместно с математическими методами (теория нечетких множеств) для принятия решения позволяет оперативно выполнить оценку текущей ситуации и возможные риски, подготовить и выбрать решение по выходу из сложившийся АС. В статье рассмотрен пример применения данной методики по парированию АС в ходе полета КА.

Список литературы

[1] Кравец В.Г., Любинский В.Е. Основы управления космическими полётами, М.: Машиностроение, 1983. 256с.

[2] Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полётами, Т.1,2, М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009. 426с.

[3] Матюшин М.М., Мишурова Н. В., Донсков А. В. Особенности структуризации знаний и возможности их использования в процессе оперативного контроля состояния пилотируемых космических аппаратов (ПКА) // Труды XLVII научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. – Калуга, 2012. – С.85.

[4] Матюшин М. М., Мишурова Н. В., Донсков А. В. Структуризация и использование знаний в процессе оперативного контроля состояния пилотируемыми космическими аппаратами // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 10. DOI: 10.7463/1012.0479653.

[5] Матюшин М.М., Мишурова Н. В., Донсков А. В. Возможность применения онтологии при парировании нештатных ситуаций в процессе управления полетом КА на примере ТГК «Прогресс» // Актуальные проблемы российской космонавтики. Труды XXXVII Академических чтений по космонавтике.– М.: Комиссия РАН, 2013. – С. 282-383

[6] Добров Б.В., Иванов В.В., Лукашевич Н.В., Соловьев В.Д. Онтологии и тезаурусы: модели, инструменты, приложения. М.: ИНТУИТ, 2008. 220 с.

[7] Современная телеметрия в теории и на практике /А.В.Назаров, Г.И.Козырев, И.В.Шитов и др:– СПб.; Наука и техника, 2007.- 672с.

[8] Милицин А.В., Самсонов В.К., Ходак В.А. Отображение информации в центре управления космическими полетами - М.: Радио и связь, 1982.-190с.

[9] Гасов В.М., Коротаев А.И., Сенькин С.И. Отображение информации. – М.: Высшая школа, 1990.-111с.

[10] Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений М.: Мир. - 1976.- 167 с.

[11] Борисов А.Н., Крумбер, Алексеев А.В. Модели принятия решений на основе лингвистической переменной - Рига: Зинатие,-1982.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ ЭФФЕКТОВ В ЗАДАЧЕ СПУСКА ТВЕРДОГО ТЕЛА С ИЗМЕНЯЕМОЙ МАЛОЙ АСИММЕТРИЕЙ В АТМОСФЕРЕ

В.В. Любимов, А.А. Василенко

ФБГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)»
443123, Самара, Московское шоссе 34, Россия
vlubimov@mail.ru
тел: 8(846) 2674501, 8(846) 2674502

Ключевые слова: *твердое тело, резонансный эффект, асимметрия, вращение, атмосфера*

Abstract
Consider the problem of reducing the negative influence of the secondary resonance effects at the rotation of a rigid body with a small asymmetry in the atmosphere. Practical significance of the work consists in the recommendations for the control of the secondary resonance effects at the rotation of a rigid body with a small initial angular velocity by changing parameters of asymmetry during the flight.

Введение

В процессе проектирования и при изготовлении спускаемые космические аппараты приобретают массово-инерционную и аэродинамическую асимметрию. Известно, что сочетания малых величин асимметрии приводят к реализации резонансных эффектов при движении космических аппаратов относительно центра масс в атмосфере [1]. Вторичные резонансные эффекты при вращательном движении аппарата могут привести к нарушению функциональных ограничений на условия ввода парашютной системы по угловой скорости и углу атаки, что может явиться причиной потери полезного груза.

В данной работе решается актуальная задача о снижении негативного влияния вторичных резонансных эффектов при вращательном движении в атмосфере космического аппарата как твердого тела (ТТ) с малой асимметрией в случае малых начальных угловых скоростей. Целью работы является исследование процесса управления вторичными резонансными эффектами во вращательном движении твёрдого тела при изменении параметров асимметрии в процессе полёта. Анализ вторичных резонансных эффектов производится путём сравнения численных результатов моделирования угловой скорости твёрдого тела при изменении величин параметров асимметрии.

1 Математическая модель

При моделировании резонансных эффектов применим приближенную нелинейную систему уравнений движения, описывающую движение ТТ с малой массовой и аэродинамической асимметрией относительно центра масс в атмосфере [2]:

$$(1)\quad \bar{I}_x \frac{d\omega_x}{dt} = -\varepsilon m_x^A \sin(\theta + \theta_2),$$

$$(2)\quad \frac{F_a}{4\omega_a^2}\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{\omega^2 tg\alpha}{4\omega_a^2 \pi}\Psi\,\mu\,\varepsilon\,\frac{m^A}{2\omega_a}\cos(\theta + \theta_1),$$

(3) $\frac{d\theta}{dt} = \omega_x - \omega_{1,2}$

(4) $\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon \frac{\omega}{2q} \frac{dq}{dt}$.

Здесь ε- безразмерный параметр, характеризующий малость величин асимметрии ТТ, ω_x - угловая скорость ТТ относительно оси OX, θ-быстрая фаза; $\theta = \varphi - \pi/2$; φ - аэродинамический угол крена; α - угол атаки; $\Psi = 2\pi \frac{d\omega}{dt} / \omega^2 = o(\varepsilon)$; m_x^A, m^A, θ_1, θ_2 - обобщенные параметры возмущений от аэродинамической и массовой асимметрий ТТ, $m^A = \sqrt{(m_1^A)^2 + (m_2^A)^2}$, $m_1^A = -\frac{(1+I_x)\omega_x - 3\omega_{1,2}}{2\omega_a} \frac{\omega^2}{m_{zn}} (m_y^\phi - c_x \overline{\Delta z}) tg\alpha - \frac{c_{yn} \overline{\Delta z} \omega_{1,2} \omega^2 tg^2 \alpha}{2\omega_a m_{zn}}$,

$m_2^A = -\frac{(1+I_x)\omega_x - 3\omega_{1,2}}{2\omega_a} \frac{\omega^2}{m_{zn}} (m_z^\phi - c_x \overline{\Delta y}) tg\alpha + \frac{c_{yn} \overline{\Delta y} \omega_{1,2} \omega^2 tg^2 \alpha}{2\omega_a m_{zn}}$, $\sin\theta_1 = m_1^A / m^A$,

$\cos\theta_1 = -m_2^A / m^A$, $m_x^A = \sqrt{(m_{x1}^A)^2 + (m_{x2}^A)^2}$, $m_{x1}^A = -\frac{\omega^2}{m_{zn}} c_{yn} \overline{\Delta y} tg\alpha$, $m_{x2}^A = -\frac{\omega^2}{m_{zn}} c_{yn} \overline{\Delta z} tg\alpha$,

$\sin\theta_2 = -m_{x1}^A / m_x^A$, $\cos\theta_1 = m_{x2}^A / m_x^A$; $\omega_a = \sqrt{\bar{I}_x^2 \omega_x^2 / 4 + \omega^2}$; $\omega_{1,2} = \frac{\bar{I}_x \omega_x}{2} \pm \omega_a$;

$\omega_x - \omega_{1,2}$ - резонансное соотношение частот; $\omega = \sqrt{-m_{zn} q S L c tg\alpha / I}$;

S и L - характерные площадь и размер ТТ; q - скоростной напор; c_x, c_{yn} - аэродинамические коэффициенты; m_y^ϕ, m_z^ϕ - коэффициенты малых аэродинамических моментов от асимметрии формы ТТ; m_{zn} - коэффициент восстанавливающего аэродинамического момента; Δx, Δy, Δz – малые смещения центра масс ТТ в связанной системе координат; $\bar{I}_x = I_x / I$; I_x и $I = I_y = I_z$ - моменты инерции ТТ относительно осей связанной системы координат;

$$F_a = -\frac{M_{zn}^\alpha}{I} + \frac{\omega_{1,2}^2}{\cos^2\alpha} + (\bar{I}_x \omega_x - \omega_{1,2})(\bar{I}_x \omega_x - 2\omega_{1,2}).$$

В системе уравнений (1)-(4) при выполнении равенства: $\omega_x - \omega_{1,2} = 0$ реализуется главный резонанс. Решение этого уравнения позволяет найти резонансное значение угловой скорости $\omega_x^r = \pm \frac{\omega}{\sqrt{1 - \bar{I}_x}}$.

2 Численное моделирование резонансных эффектов

Посредством применения метода Рунге-Кутты находятся численные решения переменных системы уравнений (1)-(4). Результаты численного интегрирования медленных переменных системы (1)-(4) в зависимости от времени полёта показаны на рисунках1-6. На рисунках 1, 3, 5 кривая с максимумом соответствует резонансным значениям угловой скорости $\omega_x^r(t)$, а вторая кривая описывает изменение величины угловой скорости $\omega_x(t)$. Представленная на рисунках 2, 4, 6 кривая показывает изменение угла атаки $\alpha(t)$. При построении рисунков 1-2 использовались следующие исходные данные: радиус тела r=0.5м; обобщенные безразмерные

параметры асимметрии $m_x^A = m^A$ =0.06, $\theta_1 - \theta_2$ =3.14; моменты инерции I_x =1 кгм^2 и $I = I_y = I_z$ =3 кгм^2; длина тела L=1м; начальные значения интегрируемых переменных $\omega_x(0)$ =0.01 рад/с; $\alpha(0)$ =0.15 рад; $\theta(0)$ =0.5 рад. Для начальных значений воздушной скорости V(0), угла наклона траектории $\vartheta(0)$ и высоты полёта H(0) принимались следующие величины: V(0)=8км/с, $\vartheta(0)$ =-0,017 рад; H(0)=100 км. На рисунке 1 кривая угловой скорости $\omega_x(t)$ характеризует вторичный резонансный эффект, который переходит в длительный резонанс. Как это следует из рисунка 2, при реализации длительного резонанса происходит резкое увеличение угла атаки.

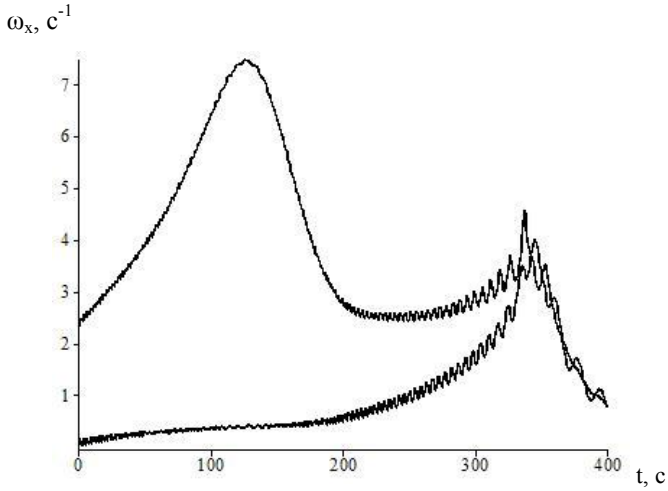


Рисунок 1 – Эволюция угловой скорости при резонансном эффекте и при резонансе

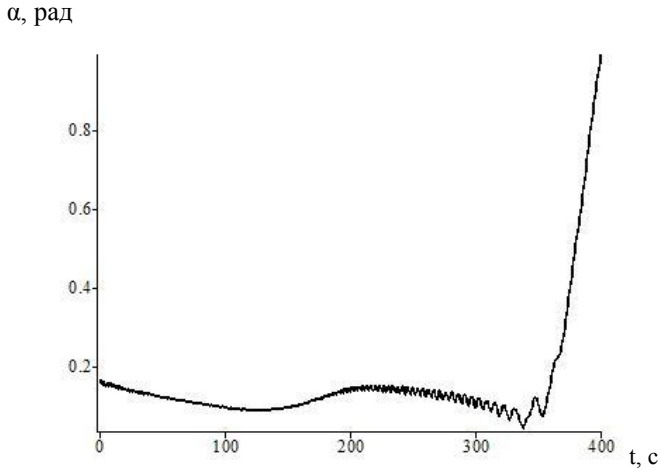


Рисунок 2 – Эволюция угла атаки при резонансном эффекте и при резонансе

Представленное на рисунке 2 резкое увеличение угла атаки на практике может привести к аварийной ситуации, которая может произойти при вводе в действие парашютной системы.

Для устранения негативных последствий вторичного резонансного эффекта и длительного резонанса в случае представленном на рисунках 1 и 2 предполагается в процессе полёта ТТ изменить величину угла между двумя векторами возмущающих моментов от действия аэродинамической и массовой асимметрии, связанного с величиной разности углов $\theta_1 - \theta_2$. Пусть на сотой секунде полёта выполняется переход от «ортогональной» асимметрии ($\theta_1 - \theta_2 = \pi$ рад) к «компланарной асимметрии» ($\theta_1 - \theta_2 = 3\pi/2$ рад) с сохранением величины аэродинамической и массовой асимметрий. Поведение угловой скорости и угла атаки в этом случае показаны на рисунках 3 и 4, соответственно. Следовательно, переход от «ортогональной» к компланарной асимметрии способствует уменьшению нерезонансной закрутки при реализации вторичного резонансного эффекта. В результате угловая скорость $\omega_x(t)$ не достигает своих резонансных значений $\omega_x^r(t)$ (рисунок 3). По этой причине длительный резонанс не реализуется. В этом случае не осуществляется резкого увеличения угла атаки (рисунок 4).

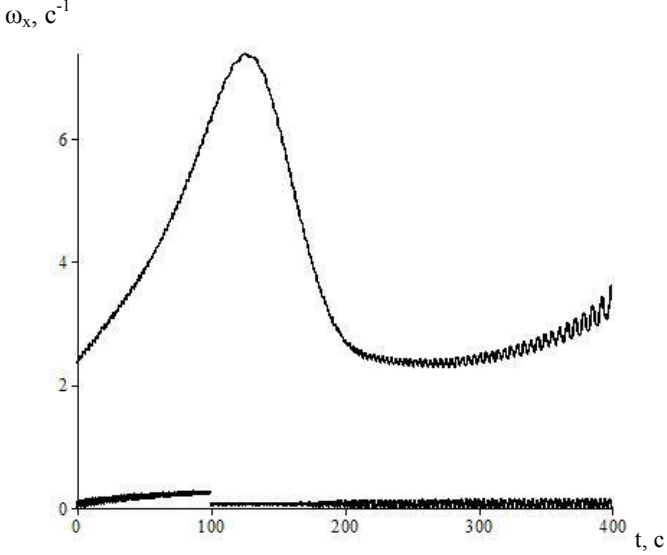


Рисунок 3 – Эволюция угловой скорости при изменении угла между векторами возмущений

Рассмотрим другой способ управления медленными переменными при вторичных резонансных эффектах. Пусть на сотой секунде полёта при неизменном угле $\theta_1 - \theta_2 = \pi$ рад происходит уменьшение величины асимметрии. При этом параметры асимметрии изменяют свои значения с величины $m_x^A = m^A = 0.06$ на величину $m_x^A = m^A = 0.04$. Результаты численного моделирования поведения $\omega_x^r(t)$ и $\alpha(t)$ в данном случае показаны на рисунках 5 и 6, соответственно. Из данных результатов моделирования следует, что при уменьшении величины асимметрий можно также уменьшить закрутку тела, вызванную резонансным эффектом. В этом случае, как и при переходе к «компланарной» асимметрии, наблюдается закрутка ТТ. Однако, величина нерезонансной эволюции $\omega_x^r(t)$ в этом случае больше, чем при переходе от «ортогональной» асимметрии к «компланарной».

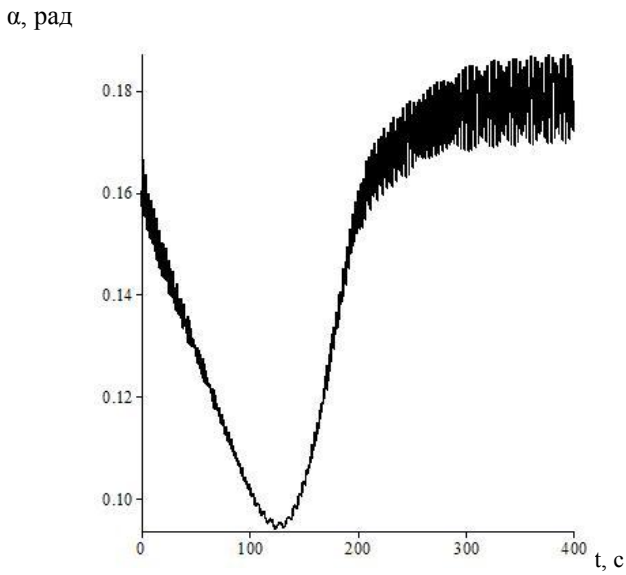


Рисунок 4 – Эволюция угла атаки при изменении угла между векторами возмущений

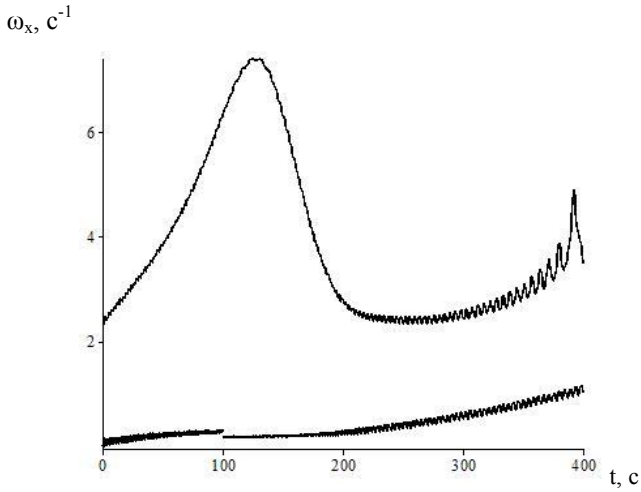


Рисунок 5 – Эволюция угловой скорости при уменьшении величин асимметрии

Анализ результатов численного моделирования позволяет выработать рекомендации по управлению вторичными резонансными эффектами, позволяющими избежать нерезонансной закрутки ТТ от малых значений до резонансных значений угловой скорости.

Рекомендации:

- При движении ТТ с малой асимметрией в атмосфере в случае малых начальных угловых скоростей следует до прохождения максимума скоростного напора перейти от «ортогональной» асимметрии к «компланарной».
- Если переход от «ортогональной» асимметрии к «компланарной» не возможен, то до прохождения максимума скоростного напора следует уменьшить величину «ортогональной» асимметрии.

- Если переход от «ортогональной» асимметрии к «компланарной» возможен, то следует уменьшить величину ортоногальной асимметрии, а затем выполнить переход к «компланарной асимметрий».

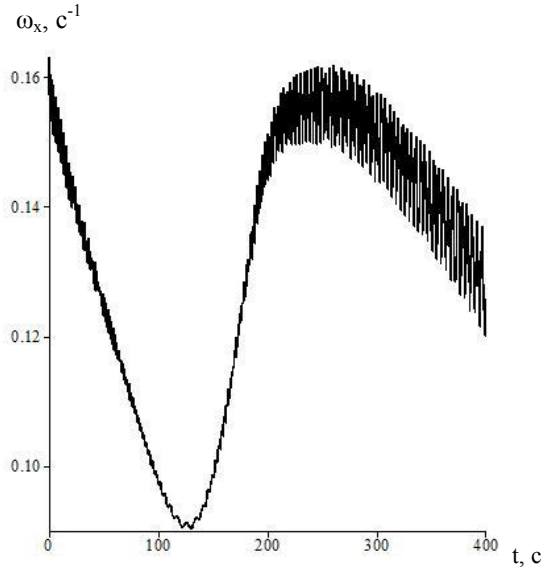


Рисунок 6 – Эволюция угла атаки при уменьшении величин асимметрии

Заключение

В данной работе производится моделирование наиболее существенных в точки зрения практики вторичных резонансных эффектов. Практическую значимость работы представляют рекомендации по управлению вторичными резонансными эффектами во вращательном движении твёрдого тела с изменяемой малой асимметрией.

Список литературы

[1] Заболотнов, Ю.М. Вторичный резонансный эффект при движении КА в атмосфере [Текст] / Ю.М. Заболотнов, В.В. Любимов // Космические исследования. – 1998.- Т. 36.- № 2.- С.206-214.

[2] Заболотнов, Ю.М. Применение метода интегральных многообразий для построения резонансных кривых в задаче входа КА в атмосферу [Текст] / Ю.М. Заболотнов, В.В. Любимов // Космические исследования. – 2003.- Т.41.- № 5.- С.481-487.

ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЕТОМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА КАК ПРОЦЕСС ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

М,М.Матюшин
ОАО «РКК «Энергия»
Московская обл., г. Королев, ул. Ленина, д.4А, Россия
matushin@scsc.ru
тел:+7 4955137497

Ключевые слова: *космический аппарат, оперативное управление полетом, автоматизированная система управления полетом, теория интерсубъективного управления, группы управления полетом, взаимодействие, акторы управления полетом*

Abstract
The paper examines the process of operational flight control spacecraft as goal-oriented set of information processes, which include operators and program-technical means. The features of the formation and functioning of intersubjective information systems as the basis of preparation and implementation of the operational flight control spacecraft, taking into account increasing the reliability and effectiveness of flight control in achieving diverse goals of a space mission.

Введение

Термин «управление полетом» космического аппарата (КА) достаточно широк и в зависимости от направления и задач исследования может нести различное смысловое наполнение [1,2]. В данном случае под термином «оперативное управление полетом КА» будем понимать процесс изменения параметров его состояния, направленный на достижение заданной цели полета [1]. Он включает в себя ряд последовательно выполняемых операций, направленных на изменение состояния КА в соответствии с планом полета. При этом оперативность такого управления понимается как требование реализации последовательности операций в реальном и/или близком к реальному времени.

В нестоящее время принято описывать в достаточно общем виде процесс оперативного управления полетом в виде следующей схемы. В ходе сеансов связи с бортом КА, длительность которых зависит от возможностей средств, используемых для управления полетом, группа управления полетом оценивает состояние КА. По результатам оценки состояния принимается решение о штатном или нештатном состоянии КА. Если состояние штатное - происходит выдача управляющих воздействий на перевод КА в другое состояние в соответствии с планом полета. Если состояние нештатное, то в группе управления инициируется и протекает процесс принятия решений, имеющий целью выработку управляющих воздействий на борт КА, которые позволили бы вернуть КА в плановое состояние или, по крайней мере, в некоторое состояние отвечающее требованиям безопасности управления полетом.

Такое оперативное управление подразумевает реализацию обобщенной технологии управления полетом, которая подразумевает последовательное выполнения этапов управления полетом: планирование, реализация плана, контроль и анализ результатов, принятие решения по результатам контроля. Остановимся на этих этапах подробнее.

1 Обобщенная технология управления полетом КА

Перед началом выполнения определенных полетных операций идет этап планирования. В ходе этого этапа устанавливается порядок следования полетных операций и их привязка к единой временной шкале, разрабатывается программа выдачи необходимых управляющих воздействий. Эффективность управления полетом КА в значительной мере зависит от того, насколько разработанный план полета будет близок к оптимальному плану, с точки зрения обеспечения надежности и полноты достижения цели полета.

В процессе управления полетом на бортовые системы КА выдаются управляющие воздействия, в соответствии с выработанным планом полета. Контроль полета, осуществляется регулярно в процессе реализации плана полета и включает в себя несколько этапов. Первым этапом идет полученные информации, характеризующей фактическое состояние КА. Вторым этапом следует обработка этой информации для определения достоверных значений параметров состояния КА на момент контроля. Третий этап состоит в анализе полученных данных. Этот анализ заключается в сравнении данных с установленными для них нормами, либо с их запланированными или прогнозируемыми значениями. При этом оцениваются также и реакции бортовых систем на выданные управляющие воздействия. В случае отклонения контролируемых параметров за пределы нормальных или прогнозируемых значений осуществляется анализ полученной информации в целях диагностики и установления причин, вызвавших эти отклонения.

По результатам контроля принимается решение по дальнейшему управлению полетом. На основании этого решения полет может быть продолжен по прежнему плану, в случае если фактические значения контролируемых параметров находятся в пределах нормы. В противном случае же возникает необходимость корректировать первоначальный план полета и в дальнейшем следовать скорректированному плану, если фактические значения контролируемых параметров выходят за пределы допустимых значений. В этом случае необходимыми шагами являются выбор стратегии управления, выбор варианта действий по управлению КА и корректировка плана полета.

При формировании решения по управлению полетом во внимание принимаются не только результаты контроля параметров фактического состояния КА, но также фактическое и прогнозируемое состояния наземных средств, обеспечивающих управление полетом. Например, чтобы принять надежно реализуемое решение по управлению КА, необходимо учитывать текущую степень готовности к работе станций слежения, обеспечивающих связь с Центром управления полетом, готовность средств самого Центра управления полетом.

Необходимо отметить, что представленная выше модель управления полетом КА описывает управление полетом, основываясь на достаточно высоком уровне обобщения. Эта модель описывает управление полетом на концептуальном уровне, являясь одной из основ для онтологических метамоделей оперативного управления полетом, однако многообразие реальных структур и процессов, возникающих при управлении полетом, данной моделью далеко не исчерпывается.

Так, например, этап планирования представляет собой иерархически выстроенную по времени и охвату систему процессов планирования различных уровней. Так для орбитальных комплексов одновременно, и оказывая взаимовлияние друг на друга, протекают несколько управляемых процессов: процессы стратегического планирования (временной горизонт – несколько лет), процессы тактического планирования временной горизонт – около года, процессы исполнительного планирования, включающие в себя процессы создания номинального плана полета (временной горизонт – около полугода), общего плана полета (временной горизонт – неделя) и детального плана полета (временной горизонт – сутки). Подобные примеры можно привести по всем остальным этапам управления полета. Кроме того, во многих случаях процессы управления обладают свойством фрактальности, т.е. части процесса сами вполне могут быть описаны представленной выше моделью, те же свойства имеют части нового опи-

сания и т.д. Так, например, процесс реализации детального плана полета в ходе оперативного управления подразумевает и этап распределения управляющих воздействий, которые требуется выдать на борт КА, по временной оси, и этап собственно выдачи управляющих воздействий и этап контроля результатов и т.д.

Ситуация еще более осложняется тем фактом, что структуры и процессы, возникающие при управлении полетом КА, связаны друг с другом сложным образом. Поскольку связи эти динамически изменяются во времени, общую аналитическую модель управления полетом КА, выстроить практически невозможно. На практике для реализации управления полетом КА создается автоматизированная система управления полетом (АСУП) КА.

2 Автоматизированная система управления полетом КА

Целью АСУП является управление полетом КА, которое в свою очередь было уже определено как процесс управления параметрами состояния КА, т.е. последовательное изменение части из них и поддержание в определённых пределах другой части, направленный на достижение целей и задач полёта.

К особенностям функционирования АСУП в полной мере относятся черты, свойственные сложным системам [3]:

- отсутствие (и принципиальная невозможность) единого математического описания и/или алгоритма функционирования;
- «зашумлённость», выражающаяся в затруднении наблюдения и управления, которая обуславливается большим числом второстепенных (для основных целей управления) процессов,
- нестационарность, выражающаяся в дрейфе характеристик, изменении параметров, эволюции во времени,
- невоспроизводимость экспериментов с ней.

На практике АСУП КА представляет собой, как правило, сложную организационно-техническую систему, которая состоит из множества взаимодействующих друг с другом разнородных элементов. И если для первых космических полетов это множество включало в себя десятки элементов, то в настоящее время общее количество структурных элементов в АСУП, в зависимости от задач и сложности самого объекта управления – КА, может достигать сотен и даже тысяч.

Усложнение АСУП КА отнюдь не является положительным процессом, а представляет собой вынужденную меру как ответную реакцию на расширения спектра задач полетов КА, и как следствие усложнения устройства КА, повышения «интеллектуального» уровня бортовых контуров управления КА. Вынужденное усложнение АСУП КА, в свою очередь, выдвигает требования поиска оптимальной организации процесса управления полетами КА и эффективных методов управления полетом, а также эффективной координации работ и взаимодействия значительного количества структурных элементов АСУП КА. Хотя АСУП КА включает в себя три компоненты (бортовой контур управления, экипажа и наземную компоненту) [1], в данной работе основное внимание будем уделять именно наземной компоненте, поскольку именно на нее возлагаются основные функции принятия решений. Поэтому в дальнейшем под АСУП КА будем понимать именно наземную компоненту АСПУ КА.

Оперативное управления полетом КА предполагает выполнение своих функций как одновременно, так и последовательно множеством структурных элементов АСУП [4]. Это приводит к необходимости взаимной координации действий; составления интегрированных планов полета; автоматизированного обмена телеметрией, командами и другой значимой с точки зрения управления полетом информацией.

Для взаимодействия элементов АСУП, как правило, создается специальная наземная информационная сеть, которая включает в себя линии связи (внешние интерфейсы) между эле-

ментами, а также ряд внутренних интерфейсных средств, работающих в рамках каждого элемента и служащих для передачи и приема различных данных.

Внутренние интерфейсы позволяют каждому из элементов АСУП обрабатывать и контролировать содержание и формат данных, а также последовательность обмена данными. По внешним интерфейсам элементов АСУП могут обмениваться различными типами информации: командно-программной; телеметрической; телевизионной; голосовой, баллистической; информацией планирования; пользовательской информацией в виде файлов общего назначения. Обмен по каждому интерфейсу реализуется с помощью специальных организационных, технических и программных средств.

Имея достаточно мощные средства передачи данных, специалисты группы управления полетом достаточно активно ведут информационный обмен при выполнении операций управления КА. Однако далеко не все аспекты взаимодействия этих специалистов можно свести только к обмену информацией. Хотя управление полетом КА разделено зоны ответственности, хотя при выполнении тех или иных полетных операций приоритет управления имеет тот или иной элементов АСУП, но АСУП всегда остается единым сложным техническим объектом. Различные системы и функции этого объекта связаны сложным образом, поэтому управление КА возможно только согласованными управляющими воздействиями, что подразумевает под собой последовательность принятия согласованных всеми участвующими сторонами решений.

От человека-оператора, специалист группы управления полетом, оперативное управление КА требует активной профессиональной позиции, т.е. постоянной готовности осознать сложившуюся проблемную ситуацию и осуществлять познавательно-деятельностную функцию для её регулирования. С другой стороны у каждого такого специалиста есть свои интересы, планы, требования и ограничения, имеющие как объективное так и субъективное основания. Все это позволяет определить человека-оператора, участвующего в оперативном управление КА, как актора в терминологии теории интесубъективного управления [5,6], при это очевидно, что акторы, образующие процесс оперативного управления полетом, являются неоднородными. В этом случае каждый из акторов может по-разному оценивать складывающуюся ситуацию управления полетом. Однако для достижения целей полета возникает объективная необходимость принятия совместного решения акторами, которое рождается в результате процесса взаимопонимания акторов. Это обуславливается тем, что при выполнении ответственной полетной операции, как правило, ни один из акторов (или элементов АСУП) не в состоянии выполнить ее самостоятельно, используя только «свои» средства. Таким образом, управление полетом ведется в рамках сложившейся полетной ситуации на основе согласованных решений, разрабатываемых и принимаемых в процессе информационного взаимодействия акторов. Подобные решения являются одним из важных факторов обеспечения самоорганизации в постоянно протекающих процессах оперативного управления полетом КА.

3 Процесс выработки и принятия решений в АСУП КА как процесс переработки информации

Процесс выработки и принятия решений в АСУП представляется как процесс целенаправленной переработки информации – «информации состояния» в «информацию управления» и может быть представлен моделью:

$P = \langle D_{вх}, D_{вых}, F \rangle$, где $D_{вх}$ - совокупность входных данных; $D_{вых}$ - совокупность выходных данных;

F - обобщенный оператор, реализующий действия по изменению свойств данных:

$F : D_{вх}\{I_i\} \to D_{вых}\{I_j\}$, где I_i и I_j - свойства входных и выходных данных.

Термин «информация» здесь используется в общем виде, как описание сообщений или сведений об объектах, событиях, фактах, которые относятся к управлению полетом КА или условиям, в которых это управление реализуется [7].

«Информация состояния», применительно к управлению полетом, это информация о текущей ситуации управления, имеющаяся в распоряжении группы управления КА как полной совокупности акторов. Основой этой информации является информационный портрет объекта управления – КА. Кроме того, к этой информации относятся: состояние экипажа, планы и методические рекомендации по управлению полетом, состояние средств (инструмента) управления полетом, текущие условия космического полета и т.д.

«Информация управления», применительно к управлению полетом, это все виды управляющих воздействий, с помощью которых группа управления воздействует на объект управления – космический аппарат. К таким видам управляющих воздействий относятся команды управления боровыми системами КА, бортовые планы полета, закладываемые в бортовой контур управления КА, указания и рекомендации экипажу, передаваемые по голосовой связи и в виде радиограмм – выработанные в соответствии с технологией управления полетом КА.

Акт принятия решения в конкретной ситуации оперативного управления полетом КА проводится всегда человеком актором либо группой акторов, поскольку именно на человека как на должностное лицо в настоящее время возлагается функция принятия решения в рамках функционирования АСУП и именно человек несет всю полноту ответственности за свои решения.

В процессе работы АСУП, актор принимает решения в рамках своих полномочий и обязанностей, т.е. процесс построен таким образом, что актор может и должен принять решение. Это, безусловно, предполагает наличие в данной ситуации у актора, с одной стороны активной (волевой) позиции, с другой – соответствующего уровня ответственности. В результате процесса целенаправленной переработки информации происходит отбор данных, которые необходимы для принятия решения. При этом должны быть выделены основные, наиболее значимые факторы, которые в наибольшей степени способствуют или затрудняют реализацию запланированной программы полета. Вполне естественно, что в одиночестве актор, ответственный за принятие решения, не способен проанализировать все аспекты оперативного управления полетом из-за наличия большого объема информации и ограниченного времени. Поэтому, как правило, отобранные для принятия решения данные сами представляют собой результат некоторого множества решений, принятых другими акторами. При этом, как минимум, часть этих решений является консенсусом, достигнутым разными специалистами.

Основным фактором в процессе переработки информации является конечная цель, т.е. определение данных или знаний, которые должны быть получены в конечном результате. В общем случае процесс переработки информации идет непрерывно, в течение всего процесса управления полетом КА. Направление переработки информации определяется текущими целями и задачами управления полетом КА, которые выражены в планах полета различного уровня, методических рекомендациях по контролю и управлению боровыми системами КАи наземного комплекса управления, которые учитывают сложившуюся ситуацию управления полетом КА.

Правильность направления переработки информации, получение максимума необходимых данных и исключение данных, переработка которых не требуется в первую очередь, требуется правильное восприятие текущей ситуации управления, имеющихся методических материалов и прогноза развития ситуации в будущем. Это означает, что для того, чтобы процесса переработки информации шел в правильном направлении, необходимо, прежде всего правильно оценивать основные цели задачи управления полетом КА на текущем этапе. Без данного условия невозможна разработка правильного решения. Неверное понимание целей и задач управления полетом КА неминуемо приведет к неверному решению.

Помимо отбора данных в процессе переработки полученной «информации состояния» большую роль играет анализ данных. Выделение значимых факторов, влияющих на процессы управления полетом, определения роли и значения каждого фактора, их взаимовлияние в ходе реализации программы полета. При этом, естественно, предпочтение должно быть отдано количественному анализу. В процессе управления полета не одно решение не может быть принято без расчетов, без количественного его обоснования. Однако необходимо отметить, что как правило, решения принимаются на основе многофакторного, многокритериального, многоступенчатого выбора, что неустранимо усложняет задачу выработки и принятия решения, поэтому во многом на практике решения являются плодом интеграции объективных выводов и договоренностей акторов, участвующих в управлении полетом КА.

Актор является основным элементом процесса выработки и принятия решения. Поэтому, как любой процесс, в котором участвует человек, процесс принятия решения имеет свою объективную и субъективную составляющие. Объективная составляющая процесса представляет собой существующую помимо человеческого сознания совокупность фактов и связей между ними, отражающих сложившиеся условия. К таким фактам относится: планы полета КА, телеметрическая информация о состоянии бортовых систем КА, различные данные о внешней обстановке космического полета, результаты расчетов и моделирования и т.д. Субъективная составляющая процесса представляет собой как отражение объективного положения дел в сознании актора, принимающего конкретное решение, так и отражение объективного положения дел в сознании других акторов, принимающих участие в подготовке этого решения.

Решение всегда несет отпечаток субъективности, поскольку специалисты-акторы принимают решения на основе определенного, сложившегося к моменту принятия решения отображения объективного состояния в сознании. Это отображение может обладать различной степенью точности, полноты и охвата. Данное положение дел вовсе не означает, что верных решений не может быть в принципе. На практике верным вполне можно считать такое решение, которое в главных, наиболее важных, чертах правильно отражает сложившуюся ситуацию, соответствует текущим целям и задачам управления полета КА и выработано и принято своевременно. В свою очередь неверным решение будет такое решение, которое в принципе не соответствует поставленным целям и задачам, либо неправильно отражает основные черты складывающейся ситуации, либо было принято несвоевременно.

Необходимым условием выработки и принятия верных решений является по возможности адекватное сложившейся ситуации восприятие акторами объективной составляющей. Для этого необходимо, чтобы и субъективная составляющая была должным образом подготовлена. Такая подготовка заключается в безусловном наличии твердых знаний у специалистов- акторов. Эти знания должны охватывать область профессиональной деятельности, т.е. управление полетом космических аппаратов, но кроме того должны включать в себя знания из различных смежных областей, определенный набор которых выбирается конкретным направлением принятия решений. То есть выработка правленого решение невозможна без глубоких знаний.

Кроме того, принятие верного решения обеспечивается не только одними имеющимися знаниями. Для принятия верного решения требуется опыт управления, умение реализовать имеющиеся теоретические знания на практике. Поскольку сами по себе знания представляют собой лишь потенциальную возможность, которую невозможно реализовать без достаточного опыта и навыков на практике. Это обуславливает необходимость с одной стороны постоянного повышения специалистами уровня своих знаний, с другой – постоянное использование этих знаний в реальной работе по управлению полетом КА или в специально созданных для этого условиях, условиях тренировки. Высокий уровень теоретических знаний и практических умений – залог принятия верного решения.

В процессе выработки и принятия решений большое значение имею инициатива и неформальный, творческий подход к делу. Неформальный подход к делу выражается в том, чтобы указания, ограничения и требования организационно-методической документации, опреде-

ляющей управление полетом КА, использовать не как догму, а в строгом соответствии со сложившейся ситуацией. Подобные указания, ограничения и требования иногда могут представлять собой лишь исходные данные для организации процесса управления полетом, которые необходимо конкретизировать применительно к сложившейся ситуации. И наоборот, недопустимым в процессе принятия решений является не достижение поставленных целей полета, а попытка следовать формальной букве указаний. Поэтому довольно часто решение может содержать элементы творчества. Под инициативой в данном случае понимается необходимая ответная реакция на изменение ситуации управления в случае появления новых возможностей. Акторы должны стремиться максимально использовать возможности для эффективного управления полетом КА. Однако, следует оговориться и указать, что творчество и инициатива в процессе принятия решений уместны только в том случае, если они согласуются с общими целями и задачами управления полетом КА. Необходимо избегать положения дел, при котором локальный выигрыш эффективности управления полетом приводит к глобальному проигрышу.

4 Описание выработки и принятия решений акторами с помощью интресубъектной модели

Теория интерсубъективного управления дает прекрасные средства для описания процесса принятия решений акторами как процесса достижения взаимопонимания в ходе урегулирования проблемной ситуация [5]. Интресубъективная модель процессов выработки и принятия решений при оперативном управлении полетом КА, использующая эти средства будет выглядеть следующим образом. После появления проблемной ситуации в процессе управления полетом КА начинается временной интервал, характеризующий способность акторов, вовлекаемых в эту ситуацию, ее обнаружить. Способность акторов обнаружить проблемную ситуацию, т.е. длительность этапа обнаружения зависит с одной стороны от сложившихся обстоятельств и ограничений, накладываемых на процесс оперативного управления полетом, например, факт наличия или отсутствия КА в зоне видимости станций слежения; работа тех или иных бортовых алгоритмов; доступность экипажа и т.д. С другой стороны, длительность этапа обнаружения зависит от подготовленности и готовности сами акторов к обнаружению проблемной ситуации.

После обнаружения проблемной ситуации акторы, являющиеся в общем случае неоднородными, начинают взаимодействовать друг с другом используя подготовленные заранее средства и процедуры взаимодействия. Именно этот процесс взаимодействия и формирует интерсубъективную систему, в рамках которой акторы будут вырабатывать согласованное решение по выходу из проблемной ситуации.

Взаимодействие может быть выстроено как по принципу двухсторонней связи, когда интерсубъетивная система образуется множеством акторов, связанных «каждый с каждым», так и по принципу «круглого стола», когда множество акторов взаимодействует в рамках некоторого единого информационного поля. Второй принцип позволяет оптимизировать циркулирующие потоки информации, убрав дублирующие сообщения, однако, первый может позволить более эффективно достичь взаимопонимание между акторами и сохранить конфиденциальность. В общем случае могут быть использованы сразу оба метода, в зависимости от складывающейся ситуации и организации оперативного управления полетом КА.

Создающаяся интерсубъективная система будет представлять собой открытую холоническую структуру. Т.е. по мере продвижения к разрешению проблемной ситуации, в эту структуру могут входить или выходить из нее новые акторы. Появление этих новых акторов может происходить как по инициативе самих новых акторов, осознавших, что проблемная ситуация начинает касаться сферы их ответственности, так и новые акторы могут вовлекаться специалистами, уже участвующими в разрешении проблемной ситуации. Например, если основой

проблемной ситуации послужили проблемы с системой ориентации космического аппарата, но ситуация начинает влиять на выработку электроэнергии солнечными батареями, то к участию в разрешении этой ситуации должен подключиться специалист по анализу системы электропитания, заметив снижение характеристик свой системы. В качестве другого пример можно привести вовлечение в разрешение проблемной ситуации специалиста-разработчика бортовой системы, если специалисты оперативной смены не могут разрешить проблемную ситуацию, не имея требуемой глубины знаний.

Также по мере развития ситуации акторы могут объединяться в составные холоны и в этом случае, с одной стороны сами составные холоны могут выступать в роли акторов. С другой стороны акторы, формирующие составной холон, должны прийти к взаимопониманию на основе соглашения относительно общих интересов составного холона и собственных интересов акторов. В качестве примера можно привести уже упоминавшееся распределенное управление полетом, при котором у всех участников в той или иной ситуации складывается путем переговоров взаимное понимание как интересов каждого из участников, так и понимание задач, которые требуется решить для оперативного управления объектом в целом.

Необходимо отметить, что вполне возможна ситуация при которой актор будет участвовать в разрешении сразу нескольких проблемных ситуаций, т.е. он будет частью сразу нескольких интерсубъективных систем, может входить в состав нескольких составных холоном и будет вынужден делить свои ресурсы между этими интерсубъективными системами. Так специалист группы детального планирования, занимаясь перепланированием в рамках суточного плана полета, может, и в соответствии со своими должностными обязанностями должен, быть одновременно участником перепланирования работ экипажа, планирования дополнительных наземных средств управления и пересмотром порядка операций с некоторой бортовой системой. В этом случае, естественно, необходимо учитывать при разрешении проблемной ситуации не только ресурсы, теоретически имеющиеся у каждого из акторов, но и тот уровень ресурсов, который он способен для разрешения конкретной ситуации выделить.

В рамках созданной для разрешения проблемной ситуации интерсубъективной системы акторами строится онтологическая модель ситуации. Эта оно онтологическая модель ситуации представляет собой структурированный объем знаний, определяющий общее понимание акторов данной конкретной ситуации. Этот объем знаний формируется на основе предпонимания ситуации каждым из акторов путем синтеза единой согласованной всеми акторами платформы интерсубъективных знаний, которая будет являться онтологической основой разрешения этой ситуации.

Формируя онтологическую модель ситуации, акторы одновременно, в процессе коммуникации, еще и постигают смысл сложившейся проблемной ситуации, поэтому онтологическую модель ситуации не является некоторой выборкой из знаний, образованных суммой предпониманий акторов, но является динамической системой знаний отражающих определенное понимание конкретных акторов конкретной ситуации в конкретный момент времени.

Синтезировав на некотором этапе онтологическую модель ситуации, согласованную всеми участниками, акторы уже в рамках этой модели знаний, учитывая имеющиеся в их распоряжении ресурсы и ограничения, стараются выработать взаимопонимание относительно пути разрешения проблемной ситуации. Т.е. взаимно согласованное понимание акторами сложившейся ситуации вовсе не гарантирует автоматически определение способа урегулирования проблемной ситуации, который бы устраивал всех акторов.

Для поиска этого пути акторы продолжают процесс взаимодействия, трансформируя при этом онтологическую модель ситуации. В процессе этого взаимодействия и именно путем взаимодействия каждый из акторов стремится разрешить конфликт между своими целями и интересами других акторов, а также групповыми ценностными ориентирами. Важно иметь в виду, что предпочтения акторов зависят от контекста и характера взаимодействий между ни-

ми, а шкалы предпочтений строятся в процессе самих переговоров, не являясь жёстко заданными априори.

Результатом взаимодействия акторов является достижения взаимопонимания и общего согласия относительно решений, которые могут разрешить данную проблемную ситуацию. Такое общее согласие подразумевает достижение акторами консенсуса, полученного путём переговоров, благодаря сближению позиций акторов. В данном случае консенсус вовсе не означает единогласие, т.е. он не устанавливает, что «все – за», он означает лишь, что «никто не против» [5].

Здесь необходимо отметить, что при достижении консенсуса в рамках оперативного управления полетом предполагается согласие именно всех акторов, участвующих в разрешении данной проблемной ситуации, т.е. мажоритарный принцип принятия решения большинством голосов в данном контексте не подходит. Это обуславливается неоднородностью акторов, участвующих в процессе оперативного управления полетом КА, и соответственно, различием задач и ответственности, лежащих на каждом из акторов. Так, например, в ситуации, при которой необходимо решить комплекс проблем в разных бортовых системах КА, принятие решения оставляющие проблемы в одной из бортовых систем, устраняя их в других, представляется абсурдным, поскольку все бортовые системы связаны и оставшиеся проблемы не только будут влиять на другие системы, но и могут привести к катастрофическим последствиям для всего КА в целом.

Основным стимулом для достижения акторами консенсуса является ограниченный резерв времени, характерный для оперативного управления полетом КА. Каждая проблемная ситуация в процессе оперативного управления полетом КА имеет строго ограниченный резерв времени. Всеми акторами осознается, что в этот резерв времени должно входить не только время, выделенное на приятие решения, но и время на реализацию этого решения и, крайне желательно, интервал времени на корректировку решения, если оно не полностью достигло своей цели. Этим обуславливается понимание акторами необходимости поиска компромисса, путем взаимных уступок и варьированием шкал предпочтений, поскольку резерв времени постоянно уменьшается.

После принятия согласованного всеми актора решения, это решение переводится в управляющие воздействия, которые изменяют состояние КА в требуемом направлении. Контроль и оперативный анализ состояния КА позволяет сделать выводы о том, достигнуты ли цели определенные выработанным решением, или нет. И если цели не достигнуты, каковы размеры изменения проблемной ситуации на борту КА. Вполне возможно, что если поставленные цели не достигнуты, а ситуация коренным образом изменилась, то может потребоваться для разрешения новой ситуации формирование новой интерсубъективной системы.

Заключение

Одной из основных проблем в процессе принятия оперативных решений в ходе управления КА является нахождение разумного компромисса между требованием персональной ответственности конкретного специалиста - актора за принятое решение и необходимостью подключения других акторов, возможно во все увеличивающимся составе, к выработке этого решения. Поскольку с одной стороны сложность процесса выработки и принятия решения подразумевает хотя бы минимальное участие в этом процессе множества специалистов- акторов группы управления, с другой стороны – только персональная ответственность является движущей силой в обеспечении безопасности и надежности управления.

Некоторым образом, контролируя процесс подготовки данных для решения, каждый актор не может физически принимать непосредственное участие во всех этапах подготовки данных, у него не хватит возможностей и времени вникнуть глубоко во все вопросы. Поэтому для актора необходимо выделить некие ключевые важные точки подготовки данных и обеспечить

процесс достижения взаимопонимания акторов, а значит и процесс принятия решений, именно в этих ключевых точка. Представляется, что решение этой задачи должно быть проведено до начала процесса оперативного управления полетом КА

Поскольку каждый из акторов обладает собственными знаниями и опытом, а также имеет каждый свои обязанности и ответственность в рамках управления полетом, со всей серьезностью встают проблемы в следующих областях: взаимопонимание акторов в процессе принятия оперативных решений; взаимопонимание акторов при выполнении ими действий по управления полетом в рамках своих обязанностей; понимание актором процесса подготовки данных для решения, с тем, чтобы актор был способен выделить ключевые точки, в которых необходимо его участие; понимание актором результирующих данных и последствий вариантов принимаемых решений. Отсутствие у актора понимания хотя бы в одной из этих областей делает практически невозможным выработку и принятие качественного решения.

Список литературы

[1] Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полётами. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009.

[2] Соловьёв В.А., Любинский В.Е., Матюшин М.М. Проблемы управления полетами пилотируемых космических комплексов // Вестник МГТУ им.Н.Э.Баумана. Серия «Машиностроение». – 2013. – № 3. – С.39-52.

[3] Соловьёв В.А., Матюшин М.М. Некоторые современные аспекты обеспечения безопасности управления полетами космических аппаратов, на примере Международной космической станции // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2011. – № 4. – С.77-85.

[4] Матюшин М.М. Опыт и перспективы развития распределенных систем управления полетом пилотируемых комплексов // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2012. – № 10. – С.3-10.

[5] Виттих В.А. Введение в теорию интерсубъективного управления.- Самара: Самарский научный центр РАН, 2013.

[6] Виттих В.А. Управление ситуациями в сложных развивающихся системах с применением интерсубъективных теорий. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. №12.

[7] Глазов Б.И. Методологические основы информационно-кибернетической системотехники. – М.: Изд-во РВСН, 1992.

АДАПТИВНЫЙ ТРЕНАЖЕР ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ГЛАВНОЙ ОПЕРАТИВНОЙ ГРУППЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ ИНТЕГРИРОВАННОГО РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

М.М. Матюшин[1], С.С. Огурцов[1], О.И. Лахин[2], Ю.С. Юрыгина[2], Д.Н. Коршиков[2], А.И. Носкова[2]

[1]РКК «Энергия» им. С.П. Королёва
141070, Московская обл., Королёв, ул. Ленина, 4А, Россия
post@rsce.ru
тел: +7 (495) 513-77-63, факс: +7 (495) 513-86-20

[2]ООО «НПК «Разумные решения»
443013, Самара, Московское шоссе, 17, офис 1201, Россия
info@kg.ru
тел: + 7 (846) 279-37-78

Ключевые слова: *адаптивный тренажер, онтология, тренировка, сменный руководитель полета, главная оперативная группа управления полетом, российский сегмент, международной космической станции*

Abstract

The approach to creation of adaptive simulator for training shift flight directors and specialists of the Main Operating Flight Control Team of Integrated Russian segment of the International Space Station is proposed in this paper. This simulator is used for formation and recovery the skills of situational decision support by shift flight directors and for parry the emergencies onboard Russian segment of the International Space Station by specialists of the Main Operating Flight Control Team. Purposes and principles of development, basic requirements for adaptive simulator, its overall architecture and functional features are set out in article. Structure of the conceptual model of the ISS RS and the most important parameters, characterizing the emergency of depressurization, that are used in the adaptive simulator for training, is given. Basic requirements for workplaces of instructor, train specialists and support crew are considered. Their realization, training regimes and the estimation algorithm of actions of trainees are also considered.

Введение

Международная космическая станция (МКС) является сложным орбитальным комплексом большой размерности, для поддержания работоспособности которой и обеспечения безопасности космических полетов требуется согласованное взаимодействие специалистов Главной оперативной группы управления в ЦУП и экипажа МКС. Для сохранения необходимого уровня безопасности наземные специалисты должны, во-первых, обладать соответствующими знаниями и навыками, а во-вторых, постоянно поддерживать и развивать эти навыки.

Возникновение нештатных (НШС) и аварийных ситуаций (АС) является критическим состоянием, к которому специалисты Главной оперативной группы управления полетом (ГОГУ), а также сменные руководители полетов (СРП) должны быть готовы в любой момент. В силу того, что НШ и АС являются непредвиденными, незапланированными и сложно прогнозируемыми событиями, возникающими достаточно редко, наземные специалисты не имеют возможности постоянно применять и поддерживать свои навыки и умения в этой области непосредственно в ходе оперативной работы. Поэтому навыки действий по парированию редко возникающих НШ и АС могут забываться, если их систематически не отрабатывать и не восстанавливать. Это, в свою очередь, может привести к тому, что возникшая непредвиденная

НШ или АС не будет своевременно и правильно парирована в этот критический момент. Важным элементом подготовки специалистов к действиям в расчетных АС (разгерметизация, пожар и выброс токсичных веществ в модулях МКС) являются тренировки специалистов на средствах, имитирующих возникновение и развитие АС.

Однако имеющиеся в распоряжении ГОГУ моделирующие стенды узко специализированы и в целом не приспособлены для гибкого и достоверного моделирования развития НШС или АС. В то же время, использование специализированного программного обеспечения позволит упростить организацию и проведение тренировок персонала ГОГУ, повысить эффективность тренировок и охватить более широкий спектр возможных путей развития нештатных и аварийных ситуаций. В связи с этим было принято решение о разработке адаптивного тренажера (АТ) для формирования и восстановления навыков ситуационной поддержки принятия решений СРП и специалистами ГОГУ.

1 Цели и задачи

Целью разработки является создание программного комплекса, который позволит проводить тренировки для СРП и специалистов оперативных смен ГОГУ по парированию аварийных ситуаций, которые могут возникнуть на борту МКС, и тем самым повысит их уровень подготовленности. Адаптивный тренажер может применяться для подготовки и обучения СРП и специалистов ГОГУ при парировании АС «Разгерметизация» с последующей разработкой на его основе полнофункционального тренажера, включающего аварийные ситуации «Пожар» и «Выброс токсических веществ».

Указанные цели достигаются решением следующего ряда задач:

1) Построение концептуальной модели РС МКС, включающей следующие онтологии:
   - физической конфигурации МКС;
   - функционального взаимодействия бортовых систем (БС);
   - изменения состояния параметров БС и среды МКС при возникновении и развитии аварийных ситуаций;
   - алгоритмов парирования АС в соответствии с действующей эксплуатационной документацией.
2) Определение основных классов программных агентов, реализуемых функций и протоколов их взаимодействия.
3) Разработка основных компонентов архитектуры АТ с описанием их функциональных возможностей и принципов взаимодействия.

Для решения описанных задач был выбран подход, основывающийся на использовании мультиагентных технологий и онтологий в качестве баз знаний, так как он позволяет описывать, моделировать и отслеживать все возможные нештатные и аварийные ситуации и варианты их парирования, знания о которых должны иметь специалисты ГОГУ и СРП.

2 Предлагаемый подход

Используемый при разработке подход основан на применении двух основных технологий: мультиагентных технологий и онтологий деятельности.

На данный момент использование онтологий в качестве баз знаний является наиболее предпочтительным по нескольким причинам [1]:

1) С помощью онтологий пользователь может описать любую разнородную, сколь угодно сложную предметную область, обладая небольшим онтологическим базисом.
2) С точки зрения разработки интеллектуальных систем, использование онтологий позволяет формализовать специфические предметные знания в виде, допускающем компьютерную обработку, и отделить знания от программного кода системы.

3) Возможность для пользователей онтологии добавлять и изменять объекты, атрибуты и классы по мере уточнения целей и задач, расширять и дополнять онтологию по мере необходимости делает этот метод оптимальным в практическом применении.

В онтологию заносятся знания о физической конфигурации МКС, физической структуре и взаимодействии входящих в нее систем, описываются алгоритмы парирования нештатных и аварийных ситуаций, а также процессы возникновения и протекания этих ситуаций [2,3].

Для удобства построения различных элементов концептуальной модели выделяются три уровня описания предметной области: «онтология» - «модель» - «сцена»:

- Онтология описывает понятия и отношения, необходимые для описания знаний на основе онтологии в дальнейшем строится модель деятельности.
- Модель описывает устойчивые конфигурации объектов, упрощающие создание формализованных описаний сцен в конкретных ситуациях.
- Сцена описывает экземпляры понятий и отношений в заданный момент времени (набор фактов). Любое изменение в конфигурации, любое произведенное действие изменяет сцену.

Для описания в онтологии алгоритмов парирования используется ситуативный подход. Его основной принцип состоит в следующем: все НШ и АС описываются в модели в виде ситуаций, обладающих определенными условиями, то есть ситуация идентифицируется только в том случае, если сработали все ее условия. Каждая ситуация активирует определенный блок задач по парированию, который описывает порядок действий экипажа в соответствии с алгоритмами в бортовой документации. Выполнение любых действий приводит к изменению сцены, что в свою очередь может породить новые ситуации, требующие выполнения других действий. Так продолжается до тех пор, пока аварийная или нештатная ситуация не будет парирована.

Так как аварийные ситуации требуют немедленной реакции и парирования, использование мультиагентного подхода в системе, обеспечивающего управление ресурсами в реальном времени, является предпочтительным. Он позволяет адаптивно перераспределять ресурсы при появлении в ходе работ непредвиденных событий, которые не могут быть спланированы заранее, а также в ходе коммуникации между участниками тренировки (в случае с тренажером) [4].

В основе работы предлагаемой системы лежит концепция сети агентов потребностей и возможностей (ПВ-сети), функционирующих на виртуальном рынке системы.

Данная концепция позволяет проектировать мультиагентную систему как набор конфликтных по определению агентов со своими целями и задачами, критериями, предпочтениями и ограничениями для принятия решений, которые при этом могут кооперироваться и конкурировать при принятии решений в интересах достижения общих поставленных целей. Важнейшей особенностью этой концепции является возможность пересмотра агентами своих ранее принятых решений при обнаружении конфликта между ними и выработка согласованного решения путем переговоров.

В ПВ-сети агенты могут получать и применять роли потребностей (заказов) и возможностей (ресурсов) [5]. В системе адаптивного тренажера роль агентов потребностей выполняют:

1) Агент формирования команды для парирования аварийной ситуации – активируется при возникновении аварийной ситуации, организует поиск подходящих ресурсов посредством создания команды агентов для решения задачи парирования АС.
2) Агент задачи – его целью является получение возможности использования бортового средства, рассчитать маршрут, переход из отсека в отсек и др.
3) Агент аварийной ситуации – находит возможные варианты планов действий для космонавта по использованию бортовых средств и выбирает из них наиболее подходящий, например, по критерию «быстрый путь» или «максимальный прирост резервного времени».

Роль агентов возможностей выполняют:

1) Агент бортового средства – дает рекомендации действий и используется при парировании аварийной ситуации, должен владеть знаниями по истории, параметрам и состоянию каждого бортового средства.
2) Агент космонавта – обеспечивает выполнение намеченных рекомендаций по использованию бортовых средств и парированию аварийной ситуации, владеет знаниями по положению космонавта и его возможным перемещениям.
3) Агент маршрута – строится для оценки проходимости и времени движения в зависимости от аварийной ситуации, положения космонавта и бортового средства, реагирует на события (открытия или закрытия люков и т.д.).
4) Агенты отсеков, люков и др. – используются для получения информации, оповещения о событиях и проведения расчетов по состоянию каждого объекта по запросам от других агентов или по событиям (например, если люк закрывается, агент люка извещает агента маршрута, который его использует).

3 Архитектура системы и реализация предложенного подхода

Текущий прототип системы состоит из нескольких функциональных модулей:

1) Модуль управления тренировками – обеспечивает механизмы по созданию и работе с тренировками.
2) Модуль моделирования процессов – обеспечивает изменение параметров сцены во времени в соответствии с правилами, описанными в онтологии и параметрами, заданными в рамках сценария тренировки.
3) Модуль построения плана действий – обеспечивает формирование плана по парированию моделируемых процессов аварийных и нештатных ситуаций.
4) Модуль оценки действий – обеспечивает оценку действий, выполняемых пользователем в рамках прохождения тренировки.
5) Модуль конструирования онтологии – позволяет расширять физическую конфигурацию станции, изменять описание процессов, которые используются для построения сценария, расширять алгоритмы, используемые модулем построения плана действий.
6) Модуль безопасности – обеспечивает аутентификацию пользователя и ограничивает доступ к данным и действиям над ними в соответствии с ролями, правами пользователя и настройками безопасности.
7) Модуль организации пользовательского интерфейса – включает пользовательский интерфейс по управлению тренировками, интерактивную карту МКС, командную консоль для ввода докладов и получения информации от системы или других участников тренировки, кадры отображения имитируемой телеметрической информации о состоянии БС и параметров среды МКС, аналогичные штатным кадрам, используемым в оперативной работе, циклограмму.

Так как адаптивный тренажер используется как для проверки знаний специалистов, так и для обучения, вводится разделение клиентских мест. В системе есть три типа пользователей: «Инструктор», «Обучаемый» и «Экипаж поддержки». Каждое клиентское место имеет свои функциональные особенности.

Инструктор имеет возможность создавать и редактировать тренировки, назначать тренировки для группы обучаемых или для конкретного специалиста оперативной смены, просматривать тренировки в ходе прохождения и результаты по итогам тренировки.

Обучаемый может проходить предложенные тренировки в режиме обучения или проверки. При прохождении тренировки обучаемые специалисты контролируют состояние БС и параметров среды МКС по имитируемой телеметрической информации (ТМИ) (Рисунок 1) и аварийно-предупредительной сигнализации. При обнаружении АС обучаемые выдают рекомендации и принимают решения о необходимых действиях в соответствии с используемой

документацией по действиям в аварийных ситуациях. Для переговоров при этом обучаемые специалисты могут использовать штатные голосовые каналы ЦУП. В зависимости от вида тренировки обучаемые могут просматривать подсказки о необходимых действиях, выдаваемые системой. По окончании тренировки обучаемые могут просматривать результаты тренировки и оценки правильности их действий, выставленные системой.

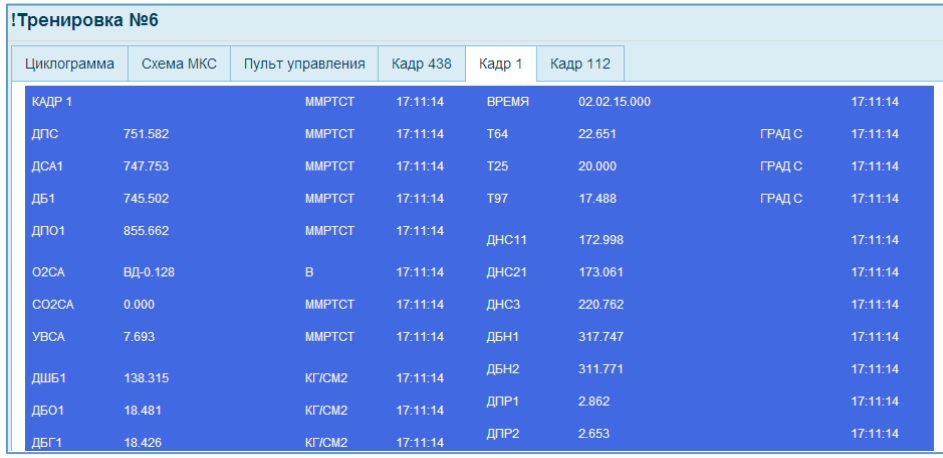


Рисунок 1 - Имитируемая телеметрическая информация

Клиентское место «Экипаж поддержки» по предоставляемым возможностям в целом аналогично рабочему месту «Обучаемый». Дополнительно экипаж поддержки имеет возможность в ходе тренировки воздействовать на элементы управления (кнопки на мнемосхеме пульта автоматической противоаварийной сигнализации (АПС) (Рисунок 2), люки и бортовое оборудование на мнемосхеме МКС и т.д.), имитируя действия реального экипажа МКС. Экипаж поддержки для таких тренировок может комплектоваться специалистами, знающими порядок действий и особенности работы экипажа МКС.

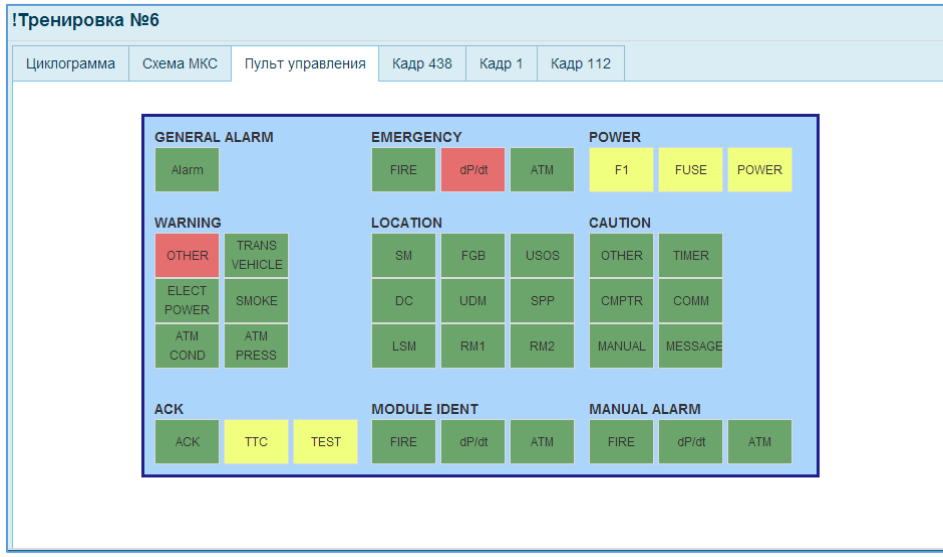


Рисунок 2 - Мнемосхема пульта автоматической противоаварийной сигнализации

Жизненный цикл тренировки строится следующим образом. Инструктор создает сценарий будущей тренировки. При этом он выбирает конфигурацию МКС, то есть модель из онтологии, на основании которой будет строиться тренировка. Затем на циклограмму развития тренировки Инструктор добавляет:

- процессы, которые будут запускаться в выбранный момент времени (процессы создаются отдельно посредством задания для них основных параметров, например, процесс «Разгерметизация» характеризуется начальным давлением, темпом падения давления и аварийным отсеком);
- события, которые также будут возникать неожиданно для Обучаемого в заданный момент (например, «Темп падения давления изменился», «Блок наддува переносной (БНП) вышел из строя»).

Полученный сценарий сохраняется в базе данных и может быть использован впоследствии многократно. Затем Инструктор создает тренировку, выбирая из базы данных сохраненный сценарий, дату и время проведения тренировки, состав участников и их роли (для групповой тренировки).

Инструктору доступны для просмотра и редактирования все созданные тренировки, их статус и состав участников, для просмотра – результаты завершенных тренировок.

Обучаемым доступны только те тренировки, участником которых они могут являться. Некоторые тренировки предназначены только для обучения, а некоторые – только для проверки знаний. Тренировки на обучение пользователь может проходить неограниченное количество раз. В процессе прохождения тренировки на обучение пользователь может пользоваться подсказками системы. Тренировка на проверку знаний назначается Инструктором, проводится в строго запланированное время с участием назначенных специалистов. В процессе прохождения тренировки на проверку знаний участники могут пользоваться подсказками системы, только если это было разрешено (указано в настройках тренировки) Инструктором.

При запуске тренировки создается сцена, которая описывает текущее состояние станции, инициализируется агентная модель. В течение всей тренировки агенты ситуаций мониторят сцену на предмет появления ситуаций, требующих планирования действий. При идентификации нештатных ситуаций и аварийных ситуаций система строит план парирования, исходя из заданных в онтологии алгоритмов. Пример плана изображен на Рисунке 3. В процессе тренировки Обучаемый при фиксировании аварийной или нештатной ситуации должен вводить в Систему рекомендации по парированию для выполнения их условным экипажем. Роль экипажа при этом может выполнять система или экипаж поддержки. Условный экипаж может выполнить полученные от тренирующихся специалистов рекомендации или отклонить их (не принять к выполнению) по каким-либо причинам.

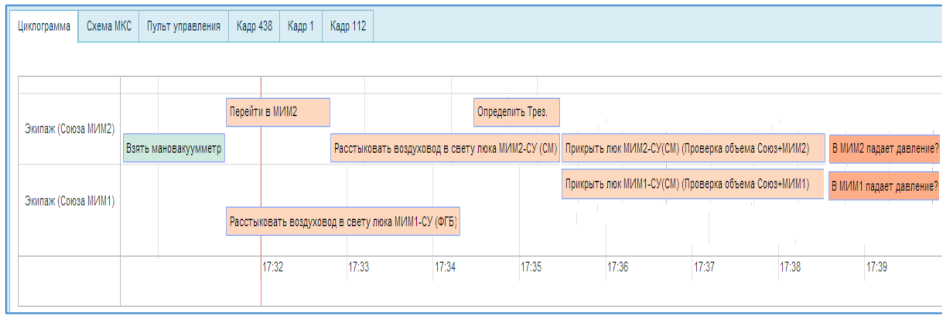


Рисунок 3 - Предлагаемый план парирования

Взаимодействие пользователей и системы происходит через коммандер (Рисунок 4). Обучаемые вводят команды, которые должны выполнить другие участники тренировки или

экипаж. Эти рекомендации сравниваются с построенным системой планом, оценивается их правильность. Доступные команды предлагаются пользователю в коммандере в виде списка. Возможность такого взаимодействия пользователей и системы является одним из шагов в развитии коммуникации и создании коллективной онтологии.

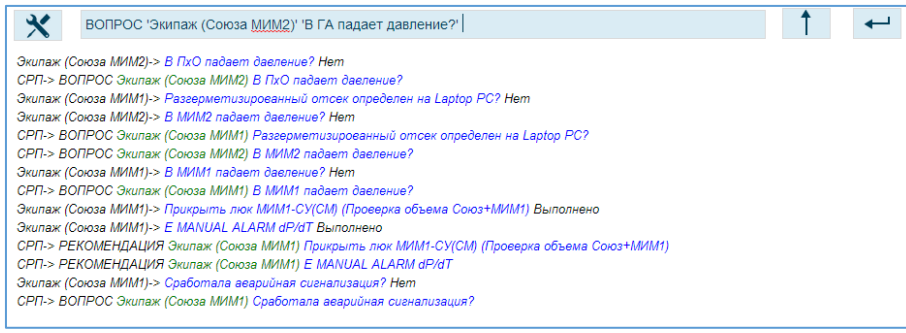


Рисунок 4 - Коммандер

По окончании тренировки Обучаемый и Инструктор могут просмотреть ее результаты. Качество выполнения оценивается по нескольким критериям: во-первых, парировал ли Обучаемый аварийную ситуацию, и во-вторых, насколько близко к плану, построенному системой, Обучаемый выдавал свои команды.

Таким образом, проходя обучающие тренировки, специалист может проверять и наращивать свои знания в части парирования НШ и АС, а участвуя в групповых тренировках на проверку знаний – поддерживать навыки оперативного реагирования, диагностики и парирования АС.

4 Перспективы развития тренажера

На данный момент определен ряд приоритетных задач в части развития тренажера:

1) Разработка нового способа представления знаний о парировании аварийных и нештатных ситуаций.
2) Выработка коллективной онтологии парирования посредством коммуникативных взаимодействий.
3) Разработка агентной модели, которая позволит формировать коллективную онтологию парирования.

Существующие алгоритмы по выполнению тех или иных процедур выглядят как набор жестких правил, привязанных к некому описанию текущей ситуации на станции (блок-схемы действий). Данный подход гарантирует верную последовательность действий, в случае если реальная ситуация на МКС будет в точности совпадать с описанием ситуации, для которой конструировались алгоритмы. При возникновении новых неописанных в алгоритмах факторов, алгоритмы теряют свою актуальность.

Концепция адаптивного планирования предлагает другой подход к построению плана действий.

- определение систем, их приоритетов и потребностей;
- определение физической структура систем;
- определение процессов, в которых могут быть задействованы системы;
- определение НШС.

При возникновении фактов, нарушающих нормальное функционирование систем (неудовлетворение потребностей), инициируется поиск решения удовлетворения потребностей для возврата к состоянию нормы.

Данный подход сможет обеспечить парирование нескольких НШС одновременно. Для этого проводится процедура определения наиболее опасной из них и требующей первичного устранения. Для этого проводится поиск устройств и систем, которые она затрагивает (здесь под системой может подразумеваться эксперимент, установка или параметр среды МКС и т.п., не обязательно система обеспечения работы станции), и дальнейшее сравнение значимости этих систем, а также показателей приоритетов потребностей систем, на которые может повлиять НШС. После определения наиболее приоритетной потребности самой значимой системы, для которой есть опасность, проводится обратный переход к НШС, создающей эту опасность. Она считается наиболее опасной и требующей первичного парирования. После её устранения признак, связанный с ней, пропадает, и сцена онтологии переходит в другое состояния, идентифицируя следующую по степени опасности нештатную ситуацию.

Для использования подхода, основывающегося на адаптивном планировании, необходимо расширить онтологию знаний, описав приоритеты и правила принятия решений, по которым впоследствии агенты смогут выстраивать задачи в нужной последовательности. С другой стороны, специалисты должны иметь возможность разрабатывать планы парирования и пополнять корпоративную онтологию путем переговоров и совместного принятия решений. В процессе выполнения тренировок могут отрабатываться различные нештатные и аварийные ситуации, по которым даже на текущий момент не было сформировано четкого алгоритма парирования. Однако на основе концепциии адаптивного планирования и коммуникационного взаимодействия такие алгоритмы могут вырабатываться в процессе прохождения тренировки.

Параллельным направлением является разработка конструктора алгоритмов, который позволит пользователю, не имеющему опыта «инженера знаний», оперативно создавать алгоритмы парирования, используя все описанные выше наработки.

Заключение

Необходимость использования адаптивного тренажера для поддержки и развития навыков специалистов ГОГУ и СПР в части парирования нештатных и аварийных ситуаций является очевидной. Существующая система уже сейчас предоставляет большой спектр возможностей по проверке и наращиванию знаний. А планируемые работы по расширению его функциональности позволят, во-первых, более глубоко и детально проверять знания специалистов, а во-вторых, наращивать их в онтологии для использования, возможно, в других системах.

Список литературы

[1] Скобелев П.О. Ситуационное управление и мультиагентные технологии: Коллективный поиск согласованных решений в диалоге // Онтология проектирования. 2013. №2(8). – С. 26-48.

[2] Матюшин М.М., Вакурина Т.Г., Котеля В.В., Скобелев П.О., Лахин О.И., Кожевников С.С., Симонова Е.В., Носкова А.И. Методы и средства построения онтологий для визуализации связанных информационных объектов произвольной природы в сложных информационно-аналитических системах // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2(69). – С. 9-17.

[3] Вакурина Т.Г., Котеля В.В., Лахин О.И., Матюшин М.М., Скобелев П.О.Онтология российского сегмента Международной космической станции и ее практическое использование в интеллектуальных аэрокосмических приложениях // Труды IV Международной научно-технической конференции «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2014) (20 – 22 февраля 2014 г., Минск, Республика Беларусь). – 2014. – С. 221-226.

[4] Скобелев П.О. Онтология деятельности для ситуационного управления предприятиями в реальном времени // Онтология проектирования. – 2012. № 1(3). – С. 6 – 38.

[5] Виттих В. А., Скобелев П. О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. 2009. Т.45. № 2. – С. 78-87.

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Н.В. Мишурова

ОАО РКК «Энергия»
141070, Московская область, Королев, ул. Ленина, д. 4а

***Ключевые слова**: пилотируемые космические аппараты, контроль, бортовые системы, мультиагентные системы*

Abstract

This article address existing and emerging methods of condition monitoring systems on board piloted space-craft, as well as the work of software tools for control of manned spacecraft as a whole, using the elements of artificial intelligence. The main advantages of the new methods and tools used to maintain a high degree of readiness of operators to detect abnormal situations during dynamic operations.

Введение

В настоящее время развитие и модернизация пилотируемых космических аппаратов (ПКА) и усложнение решаемых ими задач приводят к усложнению управления полётом ПКА. Количество параметров состояния и работы ПКА, контролируемых в ходе полёта, составляет в настоящее время более 1000 на ПКА «Союз» и более 40000 на Международной космической станции (МКС). На рисунке 1 представлен график увеличения количества контролируемых параметров за последние 30 лет. Последнее время просматривается тенденция к модернизации и динамических возможностей ПКА, например, «быстрая стыковка» (в течение достаточно короткого времени после старта активного ПКА), апробация новых динамических операций на ПКА «Союз» для последующего внедрения в перспективный транспортный корабль (ПТК). Это, в свою очередь, существенно увеличивает количество непрерывно контролируемых параметров. Также, в силу независимых обстоятельств, в процессе контроля состояния и работы бортовых систем (БС) ПКА в настоящий момент присутствует большое количество рутинных операций, таких, например, ручная сверка параметров текущего состояния ПКА со значениями предшествующего состояния и др. Указанные факторы приводят к увеличению времени на выдачу рекомендаций, ослаблению внимания специалиста и увеличению возможности возникновения аномальных ситуаций.

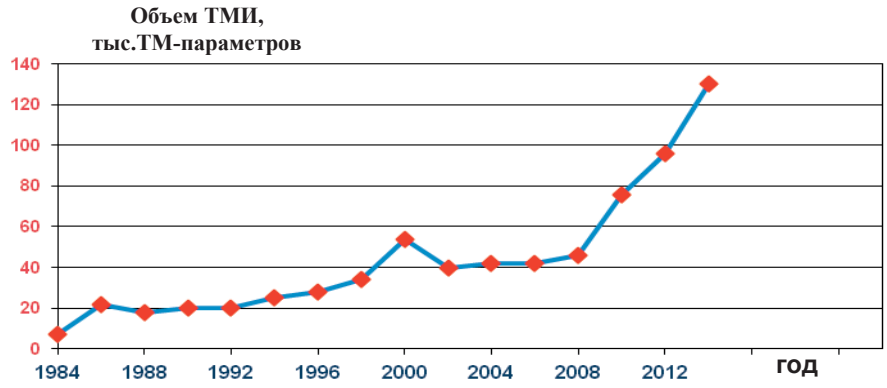


Рисунок 1 - График изменения объемов контролируемых параметров

1 Особенности контроля пилотируемых космических аппаратов

Контроль полёта пилотируемого космического аппарата (ПКА) осуществляется для определения текущей готовности ПКА к выполнению намеченной программы с соблюдением предъявляемых требований по безопасности экипажа и работоспособности бортовых систем.

При этом, в общем случае, контролируются:

- параметры состояния и функционирования ПКА как объекта управления, а также его реакции на управляющие воздействия – по информации, поступающей с его бортовых систем;
- движение ПКА в пространстве – по данным внешнетраекторных и автономных бортовых навигационных измерений;
- внешние условия (среда), в которых осуществляется полёт ПКА –по данным телеметрических, внешнетраекторных и других специальных измерений;
- объёмы фактического выполнения задач полёта.

Для контроля общего объема параметров состояния ПКА устанавливается определенная иерархическая структура очередности проведения их анализа и использования в задачах контроля полета. Основной уровень в этой иерархии параметров используется для оценки условий безопасности экипажа, обеспечения работоспособности ПКА, для своевременного обнаружения возникающих аномальных ситуаций, для контроля выполнения текущих полетных операций. Этот уровень обрабатывается и анализируется в первую очередь. В состав его параметров всегда входят параметры, позволяющие обнаружить возникновение или тенденцию к возникновению тех аномальных ситуаций, которые способны привести к тяжелым последствиям. Уточняющий уровень используется совместно с параметрами основного уровня для диагностики причин отклонений от нормы и распознавания картины складывающейся нештатной ситуации. Заключительный уровень, совместно с параметрами основного и уточняющего уровней, используется для углубленного анализа функционирования бортовых систем.

Характерной особенностью контроля полета современных пилотируемых космических аппаратов является наличие большого количества взаимосвязей между параметрами состояния ПКА и взаимовлияние параметров. Это приводит к необходимости использования в ходе полета ПКА сложных методов и алгоритмов комплексной оценки параметров состояния ПКА и диагностики их отклонений от нормы. Очень часто, когда возникает ситуация, в которой заранее разработанные методы и алгоритмы контроля неприменимы, их приходится разрабатывать

оперативно, привлекая методы экспертных оценок, выдвижения и проверки гипотез, и в случае необходимости, применяя моделирование ситуаций [1].

Важной задачей, решаемой в процессе контроля полёта, является выявление тенденций к неблагоприятному изменению контролируемых параметров, установление причин, которыми вызваны обнаруженные тенденции, и прогнозирование динамики развития ожидаемых отклонений от нормы в случае, если эти причины не будут устранены. Видом отклонения состояния ПКА от нормы может быть такой, при котором все наблюдаемые параметры находятся в установленных пределах, а сочетание текущих фактических значений некоторых из них является аномальным, способным привести к недопустимым последствиям. Это возможно, например, когда на ПКА идут одновременно два процесса, но ещё не наступила стадия их развития, приводящая к выходу каких-либо параметров состояния ПКА за границы нормы. Методы обнаружения и идентификации таких ситуаций, является трудоемким и длительным процессом

Одной из задач, является установление причин, которыми вызваны аномальные ситуации и прогнозирование динамики развития ожидаемых отклонений от нормы в случае, если эти причины не будут устранены. Эта задача решается путём накопления и анализа в течение некоторого времени данных, характеризующих состояние контролируемых параметров.

Контроль состояния и функционирования ПКА осуществляется экипажем, бортовым цифровым вычислительным комплексом и наземным комплексом управления (НКУ). В данной статье рассматривается контроль, выполняемый НКУ в центре управления полётами (ЦУП) специалистами подгруппы контроля, входящей в состав оперативной группы управления.

Задачей подгруппы контроля является оценка поступающей информации, в том числе оценка состояния и работы бортовых систем, и в случае обнаружения отклонения от нормы – подготовка рекомендации по дальнейшему управлению ПКА. Для выработки своевременных и безошибочных рекомендаций по управлению ПКА специалистам подгруппы контроля необходимо иметь доступ к информации по техническим решениям, принимаемым в ходе полёта, замечаниям по системам конкретного ПКА и к другой технической документации.

В настоящее время по ряду объективных причин не существует единой базы знаний, с помощью которой специалист может в любой момент получать информацию, необходимую для оперативного контроля ПКА т.к. техническая информация во многом не структурирована, к тому же не вся она находится на электронных носителях.

Для упрощения поиска требуемой информации необходимо разработать электронную базу данных и комплекс программного обеспечения взаимодействия с ней специалистов, которая позволит повысить качество выдаваемых рекомендаций и накопить в электронном виде материал для создания базы знаний (онтологии) - программы помощи специалистам в подготовке и принятии решения.

2 Метод решения поставленной задачи

Для автоматизации контроля, представляется целесообразным использовать мультиагентные системы. Это активно развивающееся направление искусственного интеллекта, которое в настоящее время еще находится в стадии становления. Для примера на рисунке 2 отображен фрагмент физической части КА «Прогресс». Запрограммированные на языках высокого уровня, мультиагентные системы имеют возможность использовать для анализа гибкие алгоритмы, сравнивать промежуточные значения контролируемых параметров и настраиваться на изменяющиеся условия [2]. Применяемая для этой цели мультиагентная система использует системы из взаимодействующих автономных программных объектов (агентов), которые способны анализировать ситуацию, принимать решения, взаимодействовать с другими такими же объектами, вести обмен информацией друг с другом для разрешения возникающих конфликтов и затем информировать систему и пользователя о результатах своих действий.

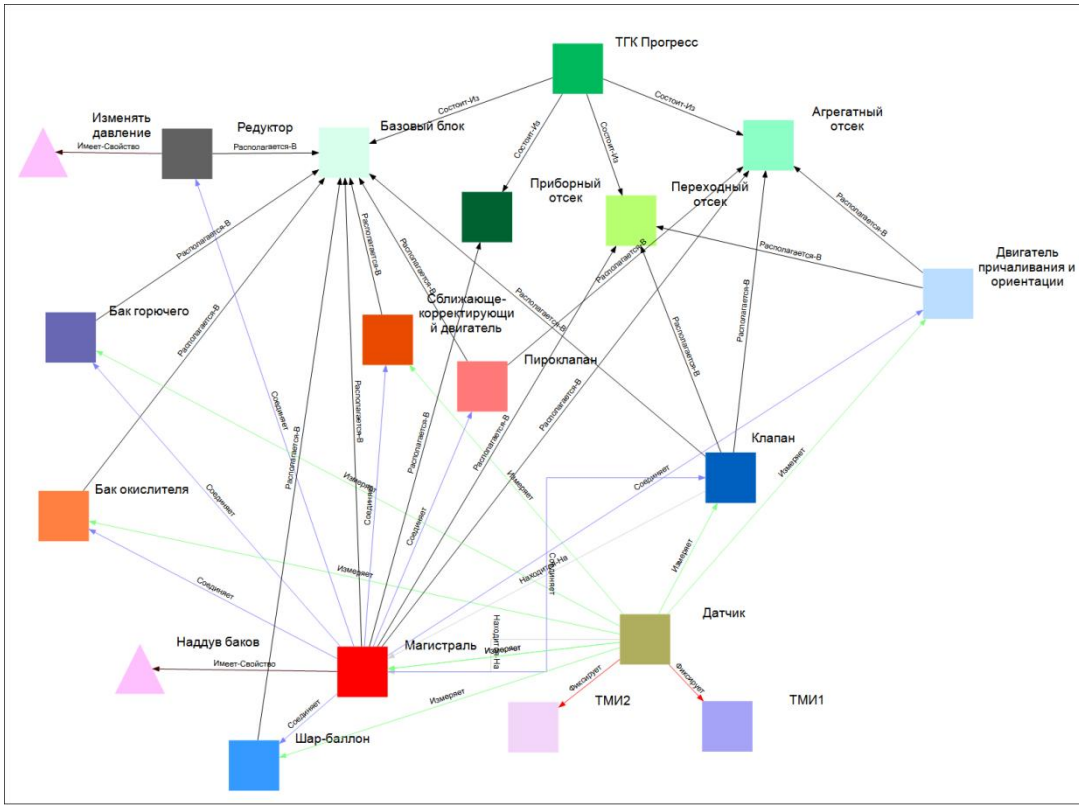


Рисунок 2 - Вид физической части онтологии КА «Прогресс»

Ключевым звеном мультиагентной системы является база знаний [3]. Специализированная база знаний (онтология) включает описание в целом знания об объекте управления и об аномальных ситуациях, которые могут возникать в процессе его эксплуатации, а также способы парирования аварийных ситуаций. Представление этих знаний в онтологии позволит описать семантические связи между аномальными ситуациями и действиями по их устранению, использовать эти знания при выборе или формировании методов противодействий развития нештатных ситуаций и обеспечить выработку правильных рекомендаций в реальном времени.

Набор классификаций является основой онтологии, с помощью которых КА может быть описан. Примером такой онтологии, касающейся конструктивного деления КА «Прогресс» показан на рисунке 3.

Конструктивное деление КА «Прогресс» на отсеки является первой рассмотренной классификацией, основывается на принципе функциональности и включает в себя:

- грузовой отсек (ГрО), в котором осуществляется доставка «сухих» грузов для орбитальной станции;
- отсек компонентов дозаправки (ОКД), в котором размещаются доставляемые топливо, вода и газ;
- приборно-агрегатный отсек (ПАО), обеспечивающий размещение основных служебных приборов и агрегатов бортовых систем.

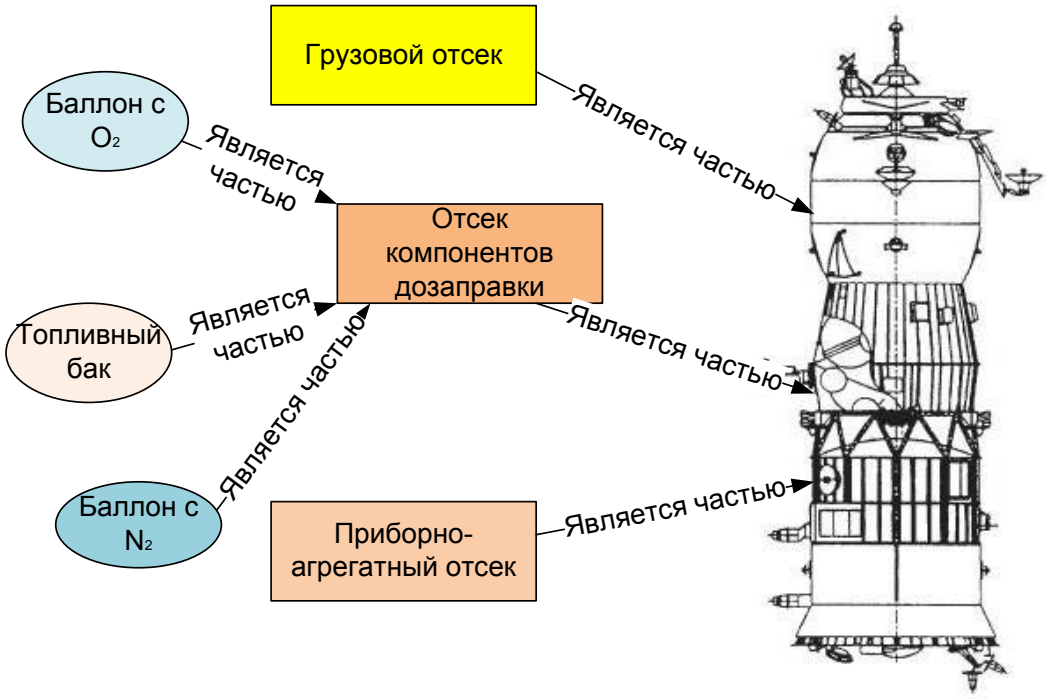


Рисунок 3 - Конструктивное деление КА «Прогресс»

В качестве второй классификации может быть выбрано представление КА «Прогресс» как совокупности связанных бортовых систем. На рисунке 4 показана схема КА «Прогресс» как технической системы и взаимное влияние систем. В состав КА «Прогресс» входят различные бортовые системы:

- система управления движением и навигации – обеспечивает проведение динамических операций перемещения центра масс корабля и его движение вокруг центра масс в соответствии с планом полета;
- система управления бортовым комплексом – обеспечивает выдачу управляющих воздействий на бортовые системы КА в соответствии с логикой управления;
- система обеспечения теплового режима – обеспечивает температурные условия, необходимые для штатного функционирования бортовых систем и грузов;
- система электропитания – обеспечивает выработку электроэнергии солнечными батареями, хранение электроэнергии в аккумуляторных батареях и распределение электроэнергии бортовым потребителям;
- бортовой радиотехнический комплекс – обеспечивает обмен КА с Землей всеми видами служебной информации – командно-программной информацией, телеметрической информацией и др.

Рисунок 4 - Представление КА «Прогресс» как совокупности связанных бортовых систем

Практически все системы связаны друг с другом и оказывают влияние друг на друга. Взаимосвязи существую не сами по себе, а через определенные составные элементы этих систем (блоки и агрегаты).

Состав систем и месторасположение определяет различные виды модификации КА «Прогресс». Данный факт учитывается на уровне онтологии и позволяет говорить, что онтология является системным комплексным описанием КА «Прогресс» [4]. На рисунке 5 рассматривается взаимосвязь отдельного блока с классификациями КА.

Аккумуляторная (буферная) батарея входит в состав системы электропитания КА и, соответственно, входит в состав классификации КА «Прогресс» как совокупности связанных бортовых систем и одновременно расположена в приборно-агрегатном отсеке, т.е. входит в состав классификации конструктивного деления КА «Прогресс» (см. рис.5). Т.е. связь приведенных в качестве примера классификаций обеспечивается, в том числе, с помощью данных об аккумуляторной (буферной) батареи.

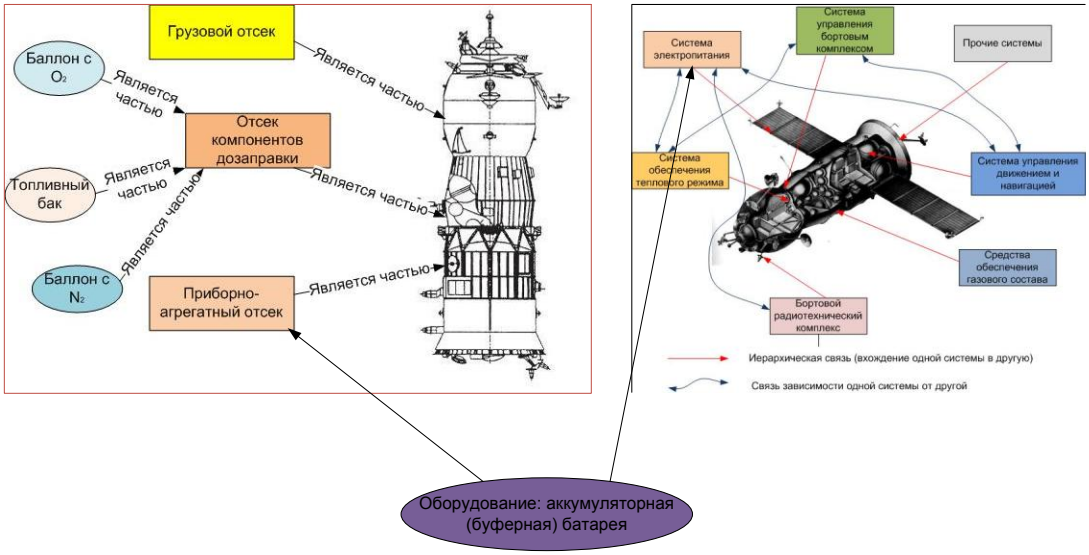


Рисунок 5 - Пример взаимосвязи отдельного блока с построенными классификациями

Заключение

Таким образом, в настоящее время появляется возможность существенно усовершенствовать методологию контроля полёта ПКА за счёт автоматизации ряда его рутинных операций, что даст возможность высвободить специалиста для эвристической работы, связанной с оценкой состояния и работы бортовых систем ПКА и с поиском эффективных рекомендаций по устранению выявляемых аномалий.

Список литературы

[1] Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. Ч. 1. – 476 с.

[2] [Матюшин М.М., Черленяк Н.Н., Волков О.В., Скобелев П.О., Сюсин И.А., Карбовничий В.П., Соллогуб А.В., Царев А.В., Симонова Е.В. Применение мультиагентных технологий для прогнозирования и парирования нештатных и аварийных ситуаций на МКС // // Труды XIV Международной конференции “Проблемы управления и моделирования в сложных системах”, Самара, 22-25 июня 2012г. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. – С. 710-717.

[3] Матюшин М.М., Мишурова Н.В., Донсков А.В. Структуризация и использование знаний в процессе оперативного контроля состояния пилотируемыми космическими аппаратами. Наука и образование, 10 октября 2012г.

[4] Матюшин М.М., Мишурова Н.В., Донсков А.В. Состояние и основные направления автоматизации при решении задач контроля полёта в процессе эксплуатации транспортных кораблей «Союз» и «Прогресс»» // // Труды XXXVII Академических чтений, МГТУ им. Баумана 01.13 – Москва: МГТУ им. Баумана, 2013. – С.

НАСТРОЙКА МОДЕЛИ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХСТАДИЙНОГО МЕТОДА ДЕКОМПОЗИЦИИ

Д.В. Павлов, Д.С. Петров

ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва
141070, М. О., Королёв, ул. Ленина, 4«А», Россия
post@rsce.ru
тел: +7(495)513-86-55 факс: +7(495)513-86-20

Ключевые слова: *имитационное моделирование, космический аппарат, управление полетом, структурная декомпозиция, язык моделирования, настраиваемая модель*

Abstract

Tuneability, one of the main feature of three-stage decomposition based method of spacecraft simulation is presented. Using three-stage decomposition method set of unprovided settings were implemented to previously created spacecraft propulsion system simulation model. Simplicity and robustness of such operation demonstrated. Following settings implemented: leaks of liquid and gaz, incorrect characteristics of reduction valve and reverse valve. Math description of the settings, sufficient spacecraft propulsion system model modifications and simulation results are presented. Conclusion about benefits of three-stage decomposition based simulation method for space mission control tasks is made.

Введение

В процессе разработки и эксплуатации космических систем (КС) в настоящее время активно используется математическое и, в частности, имитационное моделирование. Имитационная модель (ИМ) есть компьютерная программа, которая рассчитывает выходные параметры КС как динамической системы [1].

Для разработки моделей различных вариантов КС и для имитации нештатных ситуаций (НШС) с помощью ранее разработанной ИМ производится процесс настройки модели, т. е. внесение в модель изменений — регулировок, — соответствующих особым условиям функционирования или особой конфигурации КС. Регулировки представляются в виде числовых или логических параметров. Как правило, оказывается невозможным предусмотреть все необходимые регулировки на этапе проектирования модели. В связи с этим актуальной становится задача добавления регулировок по мере необходимости, причем такая модификация модели должна, во-первых, производиться за возможно меньшее время и, во-вторых, минимизировать вероятность появления алгоритмических ошибок.

В работе [2] авторами был проведен краткий анализ некоторых известных концепций имитационного моделирования, рассмотрены их достоинства и недостатки, в частности относящиеся к настройке модели, а также предложен собственный метод разработки настраиваемых имитационных моделей, основанный на трехстадийной декомпозиции. Предполагается, что изложенный метод позволяет добавлять в модель не предусмотренные ранее регулировки быстрее и корректнее, чем другие перечисленные концепции моделирования.

В данной работе демонстрируется возможность добавления различных регулировок в предложенную в [2] модель двигательной установки (ДУ) космического аппарата (КА). Набор регулировок модели выбирался на основании технической документации транспортных кораблей «Союз» и «Прогресс», а также известной литературы (см., например [3, 4]). Аналогич-

но [2], в данной работе стохастические явления рассматривались как внешние по отношению к исследуемой системе воздействия.

1 Модель двигательной установки

1.1 Описание двигательной установки

ДУ предназначена для построения ориентации КА и сообщения ему импульса по командам системы управления (СУ). Построение ориентации производится при помощи шести двигателей малой тяги (ДМТ), сообщение импульса — с помощью маршевого двигателя (МД).

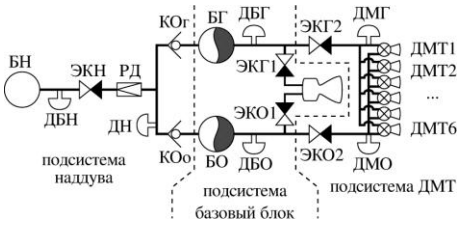


Рисунок 1.Пневмогидросхема ДУ, рассмотренной в [2]

Пневмогидросхема ДУ приведена на рис. 1. Топливная пара подается под давлением в ДМТ и МД из топливных баков БО и БГ. Каждый топливный бак разделен на жидкостную и газовую полости при помощи эластичной мембраны. Подсистема наддува осуществляет подачу рабочего тела в газовые полости баков БО и БГ под давлением, заданным характеристикой редуктора РД. Предусмотрены обратные клапаны КОо, КОг. Наддув блокируется управляемым клапаном ЭКН. Управляемые клапаны ЭКО1, ЭКО2, ЭКГ1, ЭКГ2 обеспечивают подачу топлива в МД и ДМТ.

Для контроля функционирования ДУ установлены датчики давления ДБН, ДН, ДБГ, ДБО, ДМГ, ДМО, как показано на рис. 1. Сигналы датчиков поступают в СУ.

1.2 Краткое описание метода моделирования

Изложенный в [2] метод использует трехстадийную структурную декомпозицию модели: на первом этапе — разбиение на компоненты (модели составных частей исходного объекта) в соответствии со схемой деления КА вплоть до уровня элементов, на втором — разделение компонентов, соответствующих уровню элементов схемы деления, на модели реальных деталей (простых моделей — ПМ) и на последнем — разделение ПМ на фрагменты. ПМ является моделью детали элемента (например, железного болта или электрического медного кабеля), а фрагмент ПМ описывает участие ПМ в определенном физическом взаимодействии (например, электрическом или механическом). Такая декомпозиция позволяет раздельно рассматривать модели элементов, схему определенных физических взаимодействий (ФВ) в целом, а также связи между различными ФВ. Пары ПМ могут соединяться друг с другом с помощью объектов-связей. Каждый объект-связь обеспечивает передачу значений параметров от одного ПМ другому.

Каждый компонент содержит набор интерфейсных и внутренних ПМ. Интерфейсные ПМ соединяются с интерфейсными ПМ других компонентов, а внутренние описывают поведение прототипа компонента. Компоненты уровня элементов схемы деления соединяются в компоненты более высоких уровней — модели подсистем и систем.

Каждый фрагмент описывается набором коротких уравнений, связывающих параметры ПМ, которые соответствуют определенному ФВ. Каждая ПМ представляется уравнениями агрегированных фрагментов, каждый из которых относится к своему ФВ, и уравнениями, связывающими параметры, соответствующие различным ФВ. Каждый компонент, агрегирующий ПМ, объекты-связи и компоненты низшего уровня иерархии, при необходимости дополняется уравнениями, определяющими зависимости между параметрами перечисленных объектов.

Вся модель в итоге описывается системой уравнений логических, нелинейных алгебраических и дифференциальных первого порядка. На базе перечисленных уравнений разрабатываются подпрограммы, вычисляющие для явных уравнений параметры, а для неявных — не-

вязки (см. [2]). Представленная таким образом система решается с помощью известных алгоритмов. В данной работе использовалась реализация алгоритма Бройдена, описанная в [5].

1.3 Моделирование двигательной установки

Для моделирования ДУ в работе [2] авторами были разработаны модели ФВ — интеракции, включая объекты-связи и классы фрагментов. Список интеракций и классов фрагментов приведен в табл. 1.

Таблица 1 — Классы фрагментов

Интеракция	Сокращение	Класс фрагмента
Командно-сигнальная	Ки	Источник/приемник
	Кп	Передатчик
Пневматическая	Пб	Баллон
	Пп	Проводник газа
Гидравлическая	Гу	Узловая точка
	Гп	Проводник жидкости
Тепловая	Та	Аккумулятор
	Тк	Контактный проводник тепла
	Тр	Радиационный проводник тепла
Электрическая	Эу	Узел
	Эр	Резистор

Под проводником газа или жидкости подразумевается элемент, обладающий пропускной способностью к указанному типу вещества. Примером проводника газа или жидкости является трубопровод или клапан.

2 Настройка модели

В данной статье рассматривается моделирование следующих специальных ситуаций:

- нерасчетная тяга ДМТ1;
- нерасчетная проводимость клапана ЭКО1;
- нерасчетная характеристика датчика ДБГ;
- утечки из пневмо- и гидромагистралей;
- незакрытие редуктора наддува РД;
- нештатная характеристика обратного клапана КОо.

2.1 Виды регулировок

Регулировки, рассмотренные в п.п. 1–3, были реализованы путем изменения значений существующих параметров модели:

Нерасчетная тяга ДМТ1 моделировалась путем увеличения проводимости клапана пуска горючего. Для моделирования изменялось значение параметра $\rho_г$ ДМТ1.

Нерасчетная проводимость клапана ЭКО1 задавалась с помощью изменения значения параметра $\rho_о$ ЭКО1.

Нерасчетная характеристика датчика ДБГ задавалась с помощью изменения значений параметров α и β ДБГ.

Для реализации регулировок, рассмотренных в п. 4, в компонент «ДУ» были добавлены дополнительные ПМ, содержащие фрагменты классов Гп и Пп. Данные ПМ являются моделями отверстий в трубопроводах, соединителях и баллонах. Агрегированные фрагменты присоединялись с одной стороны к Гу и Пб компонентов подсистемы наддува и с другой стороны к Гу и Пб, агрегированных в специальные ПМ компонента «вселенная». Схема модели утечки из баллона «оН» приведена на рис. 2. Остальные утечки моделировались аналогично.

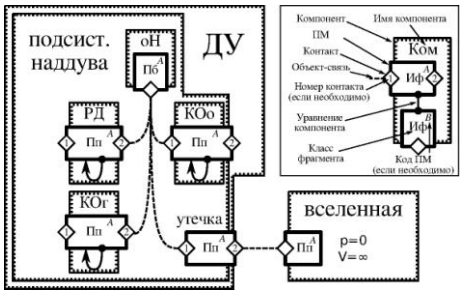


Рисунок 2. Структура модели утечки из баллона «оН»

Для реализации регулировок, рассмотренных в п.п. 5 и 6 были модифицированы классы компонентов «редукционный клапан» и «обратный клапан». Перечисленные классы компонентов были разработаны авторами в работе [2]; краткое их описание, а также описание модификаций, приведено в табл. 2.

2.2 Результаты моделирования

На рис. 3 приведены результаты моделирования РД с учетом негерметичности. В момент времени t_1 давление в объеме «оН» достигло величины p_0 (см. табл. 2), однако вследствие негерметичности РД не закрылся. Наддув был отключен в момент времени t_2 по команде из СУ на закрытие клапана ЭКН, когда значение $p_{\text{оН}}$ достигло p_1. После закрытия ЭКН давление $p_{\text{оН}}$ выросло до значения $p^\star$, поскольку газ из объема «оВ» перетекал в БО и БГ через негерметичный РД.

На рис. 4 приведены результаты моделирования КОо с характеристикой, предложенной в табл. 2. При первоначальном наддуве величина $\rho_{\text{КОо}}$ достигла некоторого близкого к нулю значения $\rho_{\text{нач}}$. Затем по командам СУ были открыты ЭКО1, ЭКГ1, включился МД. На графике, приведенном на рис. 4, отрезками I и II показано изменение величины $\rho_{\text{КОо}}$ после включения МД до значения $\rho^\star$, характерного для работы МД. Через некоторое время по командам СУ клапаны ЭКО1 и ЭКГ1 были закрыты, МД выключился. Изменение величины $\rho_{\text{КОо}}$ после отключения МД показано отрезками III и IV.

Таблица 2. Модифицированные классы компонентов

ПМ	доп. парам.	расчетные формулы
«редукционный клапан» («РД»)		
Моделирует элемент «проводник газа», поддерживающий постоянное давление p_0 на выходе. Для этого в зависимости от выходного давления изменяется величина проводимости ρ. Включает дополнительную расчетную формулу, обеспечивающую изменение ρ.		
Модификация включает задание проводимости $\rho_{\text{з}}$ в закрытом состоянии клапана.		
A: Пп	p_0 Δp $\rho_{\text{о}}$, $\rho_{\text{з}}$	вспомогательная: $\delta p = p_0 - A.p_2$ $A.\rho = \begin{cases} \rho_{\text{з}}, & \delta p < 0 \\ \rho_{\text{з}} + (\rho_{\text{о}} - \rho_{\text{з}})\frac{\delta p}{\Delta p}, & 0 < \delta p < \Delta p \\ \rho_{\text{о}}, & \delta p > \Delta p \end{cases}$
«обратный клапан» («КОо», «КОг»)		
Моделирует элемент «проводник газа», поддерживающий разницу давлений между входом и выходом δp не ниже заданной величины Δp_1. Для этого изменяется величина проводимости ρ. Включает дополнительную расчетную формулу, обеспечивающую изменение ρ.		
Модификация включает задание характеристики $\rho(\delta p)$ с гистерезисом. Гистерезис получается путем сдвига характеристики $\rho(\delta p)$ на величину $\pm\Delta p_{\text{г}}$. Знак «+» соответствует росту δp, т. е. открытию клапана, «−» — падению δp, т. е. закрытию клапана.		
A: Пп	$\rho_{\text{о}}$ Δp_1 Δp_2 $\Delta p_{\text{г}}$	$A.\rho = \begin{cases} 0, & \delta p < \Delta p_1' \\ \rho_{\text{о}}\frac{\delta p - \Delta p_1'}{\Delta p_2' - \Delta p_1'}, & \Delta p_1' < \delta p < \Delta p_2' \\ \rho_{\text{о}}, & \delta p > \Delta p_2' \end{cases}$ вспомогательные: $\delta p = A.p_1 - A.p_2$, $\Delta p_1' = \Delta p_1 \pm \Delta p_{\text{г}}$, $\Delta p_2' = \Delta p_2 \pm \Delta p_{\text{г}}$

Рисунок 3. Рост давления в «оН» при негерметичности РД

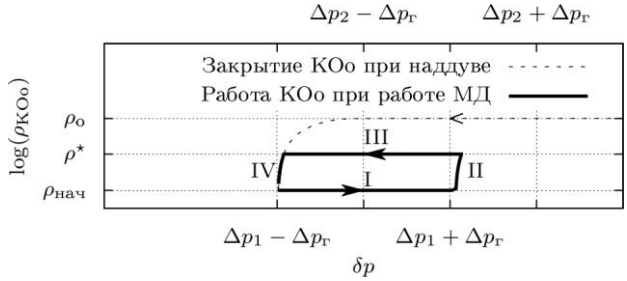


Рисунок 4. Изменение проводимости КОо при наддуве и последующей работе МД

Заключение

Настраиваемые ИМ применяются для решения задач управления КА на различных этапах работы. При подготовке к полету настройка используется для проверки работы контура управления в потенциально возможных особых, например, нештатных ситуациях, а во время полета — для уточнения имеющейся модели с целью повышения адекватности прогноза, выдаваемого моделью.

Ценность метода имитационного моделирования, с помощью которого разрабатывается модель КА, во многом определяется трудозатратами, необходимыми для последующей модификации модели. Рассмотренный метод позволяет вносить разнообразные регулировки в модель. При этом, в отличие от существующих методов, вручную модифицируются структура модели и подпрограммы, реализующие расчетные формулы необходимых элементов, а объединение всех элементов модели в общую программу осуществляется при помощи стандартных алгоритмов, что значительно уменьшает количество ручных операций, необходимых для настройки модели.

Список литературы

[1] Соловьев В. А., Лысенко Л. Н., Любинский В. Е. Управление космическими полетами. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 902 с.

[2] Петров Д. С. Имитационное моделирование двигательной установки космического аппарата при помощи трехстадийного метода декомпозиции // Вестник Московского Авиационного Института. — 2014. — Т. 21, No 1. — С. 43–57.

[3] Пневмогидравлические системы двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями / В. Н. Челомей, Д. А. Полухин, Н. Н. Миркин и др. ; Под ред. В. Н. Челомея. — М.: Машиностроение, 1978. — 240 с.

[4] Беляев Н. М., И. Уваров Е., М. Степанчук Ю. Пневмогидравлические системы. Расчет и проектирование: Учебное пособие для технических вузов / Под ред. Н. М. Беляева. — М.: Высшая школа, 1988. — 271 с.

[5] van de Rotten B., Lunel S. A limited memory Broyden method to solve high-dimensional systems of nonlinear equations. — The Netherlands : Mathematisch Instituut, Universiteit Leiden, 2003.

БОРТОВЫЕ ТРЕНИРОВКИ ПО ДЕЙСТВИЯМ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ КАК ВАЖНАЯ ЧАСТЬ ПОДДЕРЖАНИЯ УРОВНЯ ПОДГОТОВЛЕННОСТИ ЭКИПАЖА

И.А. Рожкова, В.Ю. Никишов

ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева
141070, г. Королёв, ул. Ленина, 4а, Московская обл., Россия
post@rsce.ru

Ключевые слова: *безопасность экипажа, аварийная ситуация, тренажер, бортовые тренировки, космонавт, уровень подготовленности, моделирование, анализ результатов, модульная структура*

Abstract
This article is devoted to features of International Space Station crew emergency on-board training. Authors represent general directions of on-board emergency training development for recovery/maintenance of necessary crew proficiency level.

Введение

Безопасность экипажа в космическом полете определяется не только надежностью бортовых систем, но и надежностью деятельности экипажа в аварийных ситуациях. При возникновении аварийной ситуации экипаж может спасти себя, если будет действовать быстро и правильно. Экипаж должен выполнить соответствующие процедуры и операции без ошибок, с требуемым качеством, за располагаемое время [1]. Поэтому, обеспечение подготовленности экипажа к действиям в аварийной ситуации является актуальной проблемой.

Деятельность экипажа по парированию аварийной ситуации является достаточно сложной, содержит действия, включающие выдачу команд, выполнение операций с оборудованием, а также, решение сложных мыслительных задач по идентификации нештатной ситуации, выбору стратегии действий, координацию деятельности между членами экипажа.

Особенностями операций по ликвидации аварийных ситуаций (разгерметизации, пожара, выброса токсических веществ) и эвакуации экипажа являются:

- жесткие временные ограничения;
- необходимость выполнения операторами определенных заранее процедур;
- повышенные требования по надежности выполнения всех действий;
- стрессовая ситуация.

Отсюда следует необходимость специальной подготовки к действиям в аварийных ситуациях. Для успешного выполнения такой деятельности экипажи должны обладать необходимыми знаниями, навыками и умениями, позволяющими эффективно и надежно действовать в аварийных ситуациях, обеспечивать безопасность полета и живучесть комплекса. Основной целью подготовки космонавтов к действиям в аварийных ситуациях является формирование итогового уровня профессиональной подготовленности, требуемого для обеспечения безопасности экипажа, сохранения работоспособности станции и выполнения программы полета [2].

На этапе подготовки в составе экипажа у космонавтов вырабатываются:

- комплексные знания образа объекта;
- знания возможных причин возникновения аварийных ситуаций и стратегии действий при их устранении;
- навыки выполнения типовых операций и восприятия информации с использованием средств отображения;

- навыки выдачи управляющих воздействий с использованием органов управления;
- навыки самостоятельного комплексного управления объектом при возникновении аварийной ситуации, т.ч. в условиях дефицита времени;
- навыки групповой работы при выполнении действий по парированию аварийной ситуации;
- умения эффективно приспосабливаться к условиям экологически замкнутой среды космического объекта;
- умения ориентироваться в предметном пространстве орбитального комплекса, в информационном пространстве взаимодействия с бортовым контуром управления и наземным контуром управления;
- умения адекватно организовать свою деятельность при возникновении аварийной ситуации в условиях информационной неопределенности;
- умения четко оценивать изменения параметров объекта при развитии аварийной ситуации и оперативно принимать правильные решения.

Таким образом, в результате профессиональной подготовки у космонавта формируются необходимые знания, навыки и умения, которые позволяют ему уверенно осуществлять самостоятельную деятельность при возникновении аварийной ситуации. Однако, имеющиеся различия между тренажерными средствами, используемыми при наземной подготовке экипажей и реальной орбитальной станцией, а также, комплексное влияние факторов космического полета вызывают необходимость проведения дополнительной отработки действий в аварийных ситуациях на борту.

1 Общие положения по отработке действий в аварийных ситуациях на борту

В процессе длительного космического полета происходит снижение уровня подготовленности экипажа - ухудшается эффективность выполнения экипажем полетных операций, требующих сложных психомоторных навыков. В результате проведенных исследований индивидуальных особенностей регулирования психофизиологического состояния и надежности профессиональной деятельности космонавта в наземных условиях и в процессе длительных космических полетов было установлено, что после 25-30-дневного перерыва наблюдается снижение точности регулирования операторами параметров управления динамическим объектом, а после 75-90-дневного перерыва в тренировках отмечаются уже более серьезные нарушения, затрагивающие структуру деятельности [3].

Ухудшение навыков влечет за собой снижение необходимого уровня подготовленности экипажа, вследствие чего увеличивается возможность возникновения ошибочных действий экипажа, особенно в условиях аварийной ситуации. Действия в аварийных ситуациях требуют большой концентрации внимания на выполнении полетных процедур по их ликвидации, поэтому навыки космонавтов должны непрерывно поддерживаться.

Задача обеспечить высокий уровень готовности экипажа к выполнению действий при возникновении аварийной ситуации и по выходу из неё является очень важной, поскольку аварийная ситуация может возникнуть в любой момент полета, а в период отсутствия связи с Землей экипаж должен принимать решения самостоятельно. Экипаж имеет возможность восстановить и поддержать свою готовность к действиям в аварийных ситуациях. Для обеспечения надежности профессиональной деятельности экипажа, предупреждения снижения его физической и психической работоспособности проводятся бортовые тренировки [4]. Впервые бортовые тренировки по действиям в аварийных ситуациях на Международной Космической Станции (МКС) были проведены в 2000 году. В настоящее время тренировки по действиям в аварийных ситуациях входят в состав обязательных полетных операций.

В процессе выполнения бортовых тренировок экипаж адаптируется к условиям работы на станции, проверяет готовность оборудования к использованию в аварийных ситуациях, прора-

батывает сценарии аварийных ситуаций (разгерметизации, пожара, выброса аммиака). Тренировки проводятся с определенной периодичностью, учитывающей процесс снижения уровня подготовленности.

На рисунке 1 представлен график поддержания уровня подготовленности экипажа (восстановление навыка) с помощью бортовых тренировок.

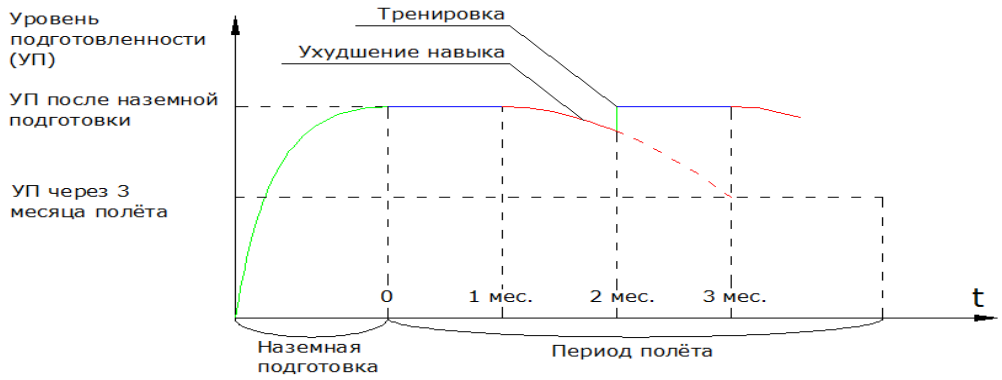


Рисунок 1 - График поддержания уровня подготовленности экипажа

Своевременное проведение бортовой тренировки позволяет поддержать и/или восстановить навык, процесс ухудшения которого начался и, таким образом, обеспечить профилактику ошибочных действий экипажа, что повышает эффективность и безопасность полета в целом. Поэтому, во время полета должна периодически проводиться подготовка, которая включает поддержание и восстановление сформировавшихся у экипажа в процессе наземной подготовки навыков и умений при выполнении действий в аварийных ситуациях.

Анализ результатов проведенных бортовых тренировок по действиям в аварийных ситуациях показал, что в ходе тренировок выявляются вопросы, предложения и замечания экипажа по существующей стратегии действий, бортовой документации, по доступности и состоянию оборудования систем МКС, используемого в аварийных ситуациях, работе средств связи. Кроме того, в результате тренировок выявляются особенности деятельности экипажей, вызванные снижением уровня подготовленности. Процентное соотношение замечаний экипажа, полученных в период полета, начиная с экспедиции МКС-3 до настоящего времени (экспедиция МКС-39), представлено на рисунке 2.

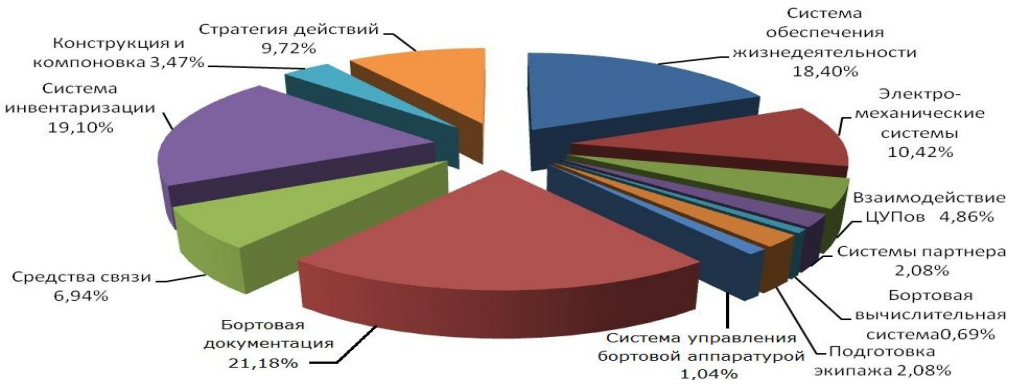


Рисунок 2 – Процентное соотношение замечаний экипажей МКС

По результатам всех полученных от экипажа замечаний проводится анализ необходимости их реализации. Реализация полученных на тренировках замечаний от экипажа способствует доработке проектной и бортовой документации, устранению выявленных неисправностей оборудования систем, уточнению местоположения оборудования и обеспечению его доступности.

2 Методы отработки действий в аварийных ситуациях на борту

Начиная с 2000 года, тренировки космонавтов по действиям в аварийных ситуациях на борту МКС проводились без использования тренажеров, т.е. идеомоторным методом.

В ходе проведения таких тренировок экипаж перемещался по объекту и мысленно выполнял все предписанные инструкцией действия (выдавал команды, закрывал/открывал люки, клапаны и т.п.). Экипаж использовал сценарий тренировки, в котором содержались контрольные точки действий экипажа, влияющие на изменение параметров (например, операции по закрытию люков при разгерметизации).

В целом, идеомоторная подготовка позволяла выработать фиксированную установку на воображаемую ситуацию и создать такое отношение к ней, какое бы имело место, если бы эта ситуация была реальной. Однако, этот метод имел ряд недостатков. Яркое представление какого-либо движения, концентрация на нем внимания может вызвать непроизвольное осуществление этого движения. При проведении бортовых тренировок были случаи несанкционированного нажатия аварийной сигнализации, активации оборудования.

Отзывы экипажей по бортовым тренировкам на послеполетных разборах подтвердили, что использование данного метода не позволяет членам экипажа эффективно скоординировать свои действия и способствует выполнению ошибочных действий в ходе тренировки. Кроме того, использование идеомоторного метода подготовки не позволяло оценить реакцию объекта на выполняемые экипажем действия.

По мере усложнения деятельности и появления современных персональных компьютеров начали разрабатываться интерактивные компьютерные обучающие системы и тренажеры для бортовых тренировок.

Современный этап развития бортовых тренажеров характеризуется созданием мобильного бортового тренажера. В процесс тренировки включается реальный объект – МКС. Мобильный бортовой тренажер содержит математическую, информационную и виртуальную модель систем и оборудования, используемых при ликвидации аварийных ситуаций. Используется существующая беспроводная связь МКС для объединения на борту портативных устройств (терминалов тренажера). Члены экипажа имеют возможность, «погружаясь в виртуальную среду», «перемещаться» по модели МКС и осуществлять управление бортовыми системами. В соответствии с выданными экипажем управляющими действиями, в тренажере воспроизводится ответная реакция систем. Таким образом, программное обеспечение тренажера позволяет имитировать аварийную ситуацию на борту МКС [5].

Дальнейшее развитие тренажера позволило интегрировать бортовую (для отработки действий экипажа) и наземную (для операторов наземных групп в центрах управления полетом) части тренажера. Использование наземной части тренажера обусловлено необходимостью получения экипажем рекомендаций от наземных групп управления в процессе выполнения тренировки, т.к. наземные группы должны ориентироваться в имитируемой ситуации. Наземная часть тренажера имеет интерфейс с динамическими моделями основных телеметрических форматов, которые используются при аварийном реагировании. Эти форматы являются уникальными для каждого центра управления.

Данные с тренажера распределяются через бортовой и наземный серверы. При проведении тренировки экипаж перемещается по реальному объекту, выполняет предписанные действия на виртуальных пультах тренажера и ведет радиообмен как в реальной ситуации. Ис-

пользуемая методика проведения бортовых тренировок позволяет восстановить концептуальную модель и отработать последовательность действий при аварийных ситуациях с различными начальными условиями. Персонал центров управления взаимодействует с экипажем и оперативно выдает необходимые указания в соответствии со сценарием. Специалисты разных центров управления отрабатывают взаимодействие в ходе тренировки, имитируя свои действия как в реальной ситуации.

На рисунке 3 представлена схема распределения данных между участниками бортовых тренировок.

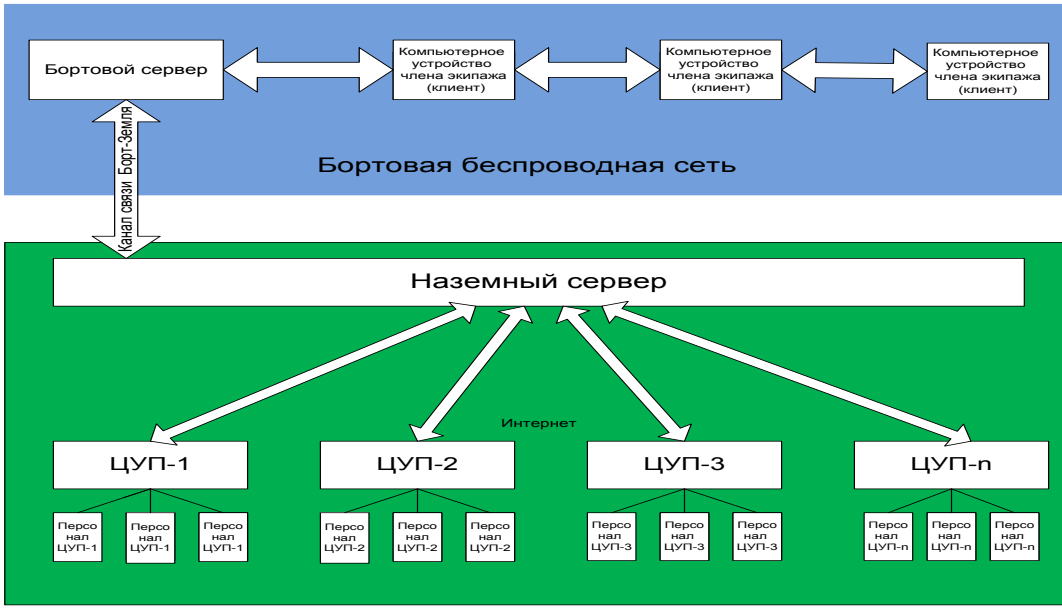


Рисунок 3 - Схема распределения данных между участниками бортовых тренировок

Так как члены экипажа во время тренировки могут находиться в разных отсеках и выполнять операции параллельно, в качестве терминалов тренажера используется определенное количество портативных компьютерных устройств, которые синхронизированы друг с другом через бортовой сервер в реальном времени.

Тренажер строится по модульной структуре, что позволяет легко дорабатывать, в случае необходимости, его отдельные блоки, не затрагивая при этом содержания остальных модулей. Гибкость структуры тренажера и способность к наращиванию позволяют обеспечить более длительный жизненный цикл. Таким образом, создаются возможности для совершенствования и развития новых модификаций тренажера.

Использование бортового тренажера по действиям в аварийных ситуациях позволяет:

- обеспечить предоставление экипажу информации и параметров, необходимых для анализа моделируемой ситуации и для принятия решения о действиях при реагировании на аварийную ситуацию, что повысит эффективность тренировочного процесса;
- обеспечить подготовку персонала центров управления;
- обеспечить интеграцию подготовки экипажа и центров управления.Таким образом, бортовая подготовка обеспечивает выполнение следующих задач в части поддержания и восстановления действий экипажа в аварийных ситуациях:
- отработка навыков выполнения действий при аварийных ситуациях на МКС с проигрыванием ролей членов экипажа и центров управления;

- визуальная отработка умения ориентироваться в предметном пространстве орбитального комплекса в части выполнения операций с оборудованием, используемым в аварийной ситуации и интерфейсами станции;
- проработка бортовых процедур и принятия соответствующих решений на основании имитируемых тренажером проявлений ситуации;
- отработка практических навыков использования средств индивидуальной защиты в условиях невесомости;
- отработка практических навыков ведения связи и координации действий с центрами управления;
- отработка навыков групповой работы при выполнении действий по сценарию аварийной ситуации;
- отработка умения оценивать изменения параметров объекта при развитии аварийной ситуации и оперативно принимать правильные решения.

Заключение

Своевременное проведение бортовых тренировок по отработке действий в аварийных ситуациях с использованием адекватного тренажерного средства позволяет восстановить и поддержать уровень подготовленности экипажа в полете и, тем самым, повысить эффективность и безопасность полета в целом.

Список литературы

[1] Береговой Г.Г, Тищенко А.А., Шибанов Г.П., Ярополов В.И. Безопасность космических полетов. Машиностроение, 1977.

[2] Тренажерные комплексы и тренажеры. Технологии разработки и опыт эксплуатации: монография / В. Е. Шукшунов [и др.].; Под ред. В.Е. Шукшунова. - М.: Машиностроение, 2005.

[3] Сальницкий В.П., Мясников В.И., Бобров А.Ф., Шевченко Л.Г., Дудукин А.В. Исследование надежности деятельности космонавта на различных этапах длительного космического полета (эксперимент «Пилот») / Орбитальная станция “Мир”. Космическая биология и медицина. Т.2. Медико-биологические эксперименты. Москва: ГНЦ РФ-ИМБП РАН, 2002. С.285-300.

[4] ГОСТ Р 50804-95 Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования, раздел 7.4.

[5] Тищенко А.А., Ярополов В.И. Моделирование при обеспечении безопасности космических полетов. Машиностроение, 1981.

МУЛЬТИАГЕНТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ СЕАНСОВ СВЯЗИ МЕЖДУ МИКРОСПУТНИКАМИ И СЕТЬЮ НАЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ

П.О. Скобелев[1], А.Б. Иванов[2], Е.В. Симонова[3], В.С. Травин[3], А.А. Жиляев[3]

[1]Институт проблем управления сложными системами РАН

443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия,

тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

petr.skobelev@gmail.com,

[2]École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Route Cantonale, 1015 Lausanne, Switzerland

anton.ivanov@epfl.ch,

[3]Научно-производственная компания «Разумные решения»

443013, Самара, Московское шоссе, 17, офисный центр «Вертикаль», офис 1201

simonova@smartsolutions-123.ru

Ключевые слова: *микроспутник, наземная станция, мультиагентная система, сеанс связи, онтологии, планирование потоков данных, агент*

Abstract

The problem of constructing an effective mechanism for rapid transmission of data between microsatellites and network of ground stations in the dynamically changing environment is considered. Multiagent approach to solving this class of problems is proposed. The ontology, agents, interaction protocols and key benefits of proposed system are discussed.

Введение

Достижения последних лет в области микроэлектроники и микроэлектромеханики позволили снизить массу космических аппаратов, сохранив при этом их целевые характеристики. В результате появился новый класс космических аппаратов, называемых малоразмерными (МКА). За рубежом сложилась устойчивая классификация МКА по их весовым характеристикам: пико-спутники до 1 кг, нано-спутники 1 – 10 кг, микроспутники 10 – 100 кг, миниспутники 100 – 500 кг, малые спутники 500 – 1000 кг. Уменьшение стоимости и времени, требуемого на разработку и изготовление МКА, обеспечивает создание целых спутниковых систем, способных осуществлять непрерывный мониторинг земной поверхности, решать вопросы навигации и телекоммуникации. Создание группировок МКА способно радикально изменить установившееся представление о роли и месте космических систем и значительно расширить нишу потребительских сервисов по сравнению с реализуемыми в настоящее время [1]. С другой стороны, увеличение числа МКА в орбитальной группировке влечет за собой перегрузку систем управления и необходимость обработки больших объемов целевой информации. В этих условиях наиболее актуальной становится задача планирования своевременной передачи данных с космических аппаратов на наземные станции.

В предлагаемой статье рассматривается содержательная постановка задачи о построении коммуникационной среды для передачи данных от системы микроспутников на наземную территориально распределенную инфраструктуру средств приема и обработки и предлагается ее решение на основе мультиагентных технологий.

1 Постановка задачи

Пусть задан набор микроспутников, принадлежащих различным типам пользователей (например, нескольким университетам, операторам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и др.), ориентирующихся на получение информации от микроспутников, а также на прием и передачу данных на наземные станции. Число микроспутников может меняться с течением времени (часть космических аппаратов выходят из строя, запускаются новые космические аппараты и т.д.). Каждый микроспутник может иметь ограничения технического, организационного, финансового или какого-либо другого характера на передачу информации на наземные станции, принадлежащие разным разработчикам. Таким образом, существует группа доступных для передачи информации станций и группа постоянно (или временно) недоступных станций.

Кроме того, у некоторых наземных станций есть возможность передавать полученную информацию другой станции или использовать ресурсы интернета для доступа заинтересованных потребителей к этой информации. Задание на сброс данных состоит в передаче заданного объема данных с определенного микроспутника в течение заданного интервала времени. Передаче информации на наземную станцию должна предшествовать процедура согласования расписания сеансов связи. Это необходимо для выполнения ряда подготовительных работ на станции, в том числе, для расчета целеуказаний для наведения антенного комплекса на конкретный космический аппарат, подготовки к работе программно-технических средств обработки поступающей информации.

Суть предлагаемой разработки – создать механизм, обеспечивающий микроспутникам возможность передавать данные на систему наземных станций с учетом ограничений, в том числе, возникающих внепланово. Длительность сеансов связи микроспутников с наземными станциями в значительной мере является одним из определяющих факторов, влияющих на производительность наблюдения и оперативность доставки информации. Поэтому оптимизация программы доставки информации на станции непосредственно влияет на эффективность системы в целом.

Задача системы – обеспечить эффективный сброс данных с группировки микроспутников так, чтобы он произошел в требуемое время, с минимальной задержкой от момента получения информации на борту и с учетом текущих ограничений станции по приему. При этом система должна адаптивно корректировать построенное для каждой станции расписание с учетом возникающих событий: изменения расписания съемки на борту микроспутника, выхода его из строя, поломки оборудования станции, запроса от другого потребителя на прием данных от одного из микроспутников и т. п. Если на одной из наземных станций возникли непредвиденные события, его задачи должны быть перераспределены между другими станциями сети.

Задача планирования передачи данных между множеством микроспутников и наземных станций может быть сформулирована следующим образом. Требуется обеспечить максимизацию потока данных Ф в системе N микроспутников на горизонте времени T для M станций:

$$\Phi = \sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N}\int_{0}^{T} rate_{ij}(t)\cdot link_{ij}(t)\cdot schedule_{ij}(t)dt,$$

где $rate_{ij}(t)$ – скорость передачи данных от i-го микроспутника j-й наемной станции, $link_{ij}(t)$ – взаимная эффективность передачи данных от микроспутника к станции, $schedule_{ij}(t)$ – расписание передачи данных, построенное с учетом взаимной видимости станций и микроспутников.

Таким образом, решение поставленной задачи требует согласованного планирования работ в сети станций и микроспутников.

2 Описание мультиагентного подхода к решению задачи

Основой для решения поставленной задачи могут выступать мультиагентные технологии, позволяющие решать сложные проблемы за счет самоорганизации конкурирующих и кооперирующихся агентов [2, 3].

При планировании сеансов связи используется концепция сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей), в которой любой план строится как гибкая (перестраиваемая по событиям) сеть связей агентов потребностей (задач) и возможностей (ресурсов). В основе лежит принцип совместной заинтересованности всех участников в решениях, выгодных как для каждого из них, так и для системы в целом. При этом ухудшение положения одного из участников может, в интересах группы, компенсироваться за счет других участников, если оно приводит к выигрышу группы в целом.

Основные принципы предлагаемого мультиагентного подхода адаптивного планирования могут быть сформулированы следующим образом:

- Поток данных для передачи на землю от каждого микроспутника можно представить в виде задачи с определенным временем начала, предельным временем завершения, объемом и приоритетом.
- Каждая задача и наземная станция получают своих программных агентов, у которых ведется собственное расписание.
- Агент задачи определяет требования и ограничения на планирование в соответствии со своей трудоемкостью и предпочтительными сроками исполнения.
- Если при попытке планирования подходящая наземная станция оказывается занятой другой задачей, фиксируется конфликт и начинаются переговоры по его разрешению путем подвижек во времени или перемещения задач на другие станции.
- Решающим правилом для утверждения изменения плана является условие превосходства суммы всех улучшений над суммой всех ухудшений, вызванных новым событием, в интересах сети в целом по выполнению большего числа работ.
- Даже после решения своей задачи каждый агент не останавливается, а продолжает пытаться улучшить свое положение (пока есть время для решения задачи).

Таким образом, итоговый план строится как динамическое равновесие интересов агентов задач и станций, которые ведут переговоры о своем положении в расписании сети и планируют свою работу за счет сдвигов, исходя из допустимых отклонений моментов начала выполнения задач от предпочитаемого времени.

3 Разработка мультиагентной системы планирования

Для учета специфики предметной области и особенностей задачи планирования потоков данных между множеством микроспутников и наземных станций была разработана структура онтологии, фрагмент которой приведен на рисунке 1. Согласно этой структуре, каждая наземная станция обладает собственным расписанием, в котором отражаются уже запланированные сеансы связи с микроспутниками и график работы станции. Каждый сеанс связи характеризуется приоритетом, продолжительностью, статусом выполнения и интервалом времени, в течение которого он должен быть осуществлен. Проведение сеансов связи возможно только в определенные временные интервалы, в течение которых между микроспутником и станцией сохраняется прямая видимость.

Каждой наземной станции сопоставляется агент ресурса. Цель агента ресурса – наиболее плотное планирование работ с предпочтением планирования задач «своих» микроспутников и обеспечение минимизации простоя оборудования. Каждому сеансу связи ставится в соответствие агент задачи. Цель агента задачи – разместиться на лучшей для него наземной станции, параметры которой удовлетворяют ограничениям задачи. Агент задачи способен реагировать на события добавления/удаления новых наземных станций и отмены размещения других за-

дач. Регистрация и отмена задач производится специальным агентом сцены, отвечающим за взаимодействие с пользователем системы.

Для учета стоимостной компоненты вводится виртуальный рынок агентов, в котором все характеристики процессов выражаются через виртуальные денежные эквиваленты. У каждого агента задается целевая и штрафная функция. Целевая функция отражает удовлетворенность агента в зависимости от достижения поставленной перед ним цели. Штрафная функция задает денежную премию или санкцию за то или иное значение целевой функции. Она позволяет также задать допустимые для планирования интервалы значений, где это необходимо, путем выставления заведомо неприемлемой величины штрафа в областях недопустимых значений.

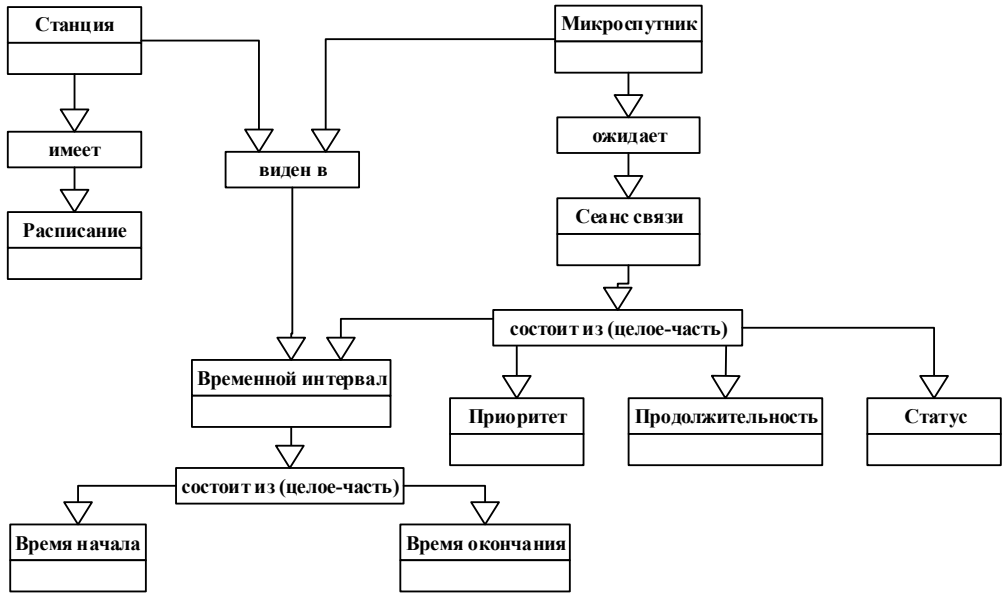


Рисунок 1 – Фрагмент онтологии мультиагентной системы планирования сеансов связи

Каждый агент пытается максимизировать свою удовлетворенность и увеличивает прибыль, которую может тратить как «энергию» для подвижки других агентов, в случае возникновения конфликтов, которые он пытается разрешить в интересах системы в целом. Задача планирования решается итерационно, за счет постепенного возрастания (локального улучшения) значений целевых функций каждого агента.

При инициализации задачи ей выдается начальная, соответствующая ее приоритету, сумма виртуальных средств. Эти средства могут быть использованы в качестве платы за размещение на выбранном ресурсе, а также для компенсации издержек сдвигаемых при размещении задач. Целевая функция (ЦФ) и штрафная функции агента задачи строятся с учетом временных ограничений на сроки ее выполнения, агента ресурса – с учетом его загруженности на рассматриваемом интервале планирования (рисунок 2).

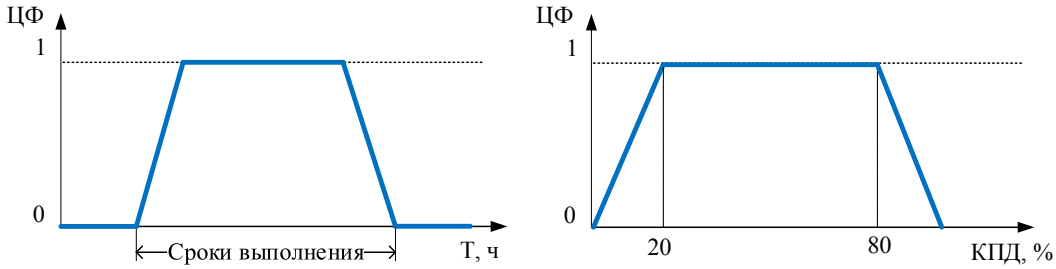


Рисунок 2 – Пример целевой функции задачи (слева) и ресурса (справа)

Процесс планирования включает два этапа:

1) Первоначальная инициализация размещения задач на ресурсах с учетом предпочтений и временных ограничений;
2) Проактивное улучшение прибыли со стороны задач за счет перепланирования.

Протокол взаимодействия агентов при первоначальной инициализации размещения задачи показан на рисунке 3. Данный протокол является реализацией Contract Net Interaction Protocol, специфицированного стандартом FIPA [4]. Агент появившейся задачи определяет список агентов доступных и подходящих для размещения наземных станций, после чего отправляет каждому из них сообщение-запрос *CFP (Call for Proposal)*, в котором указывается имя спутника и интервал времени, в течение которого необходимо запланировать сеанс связи.

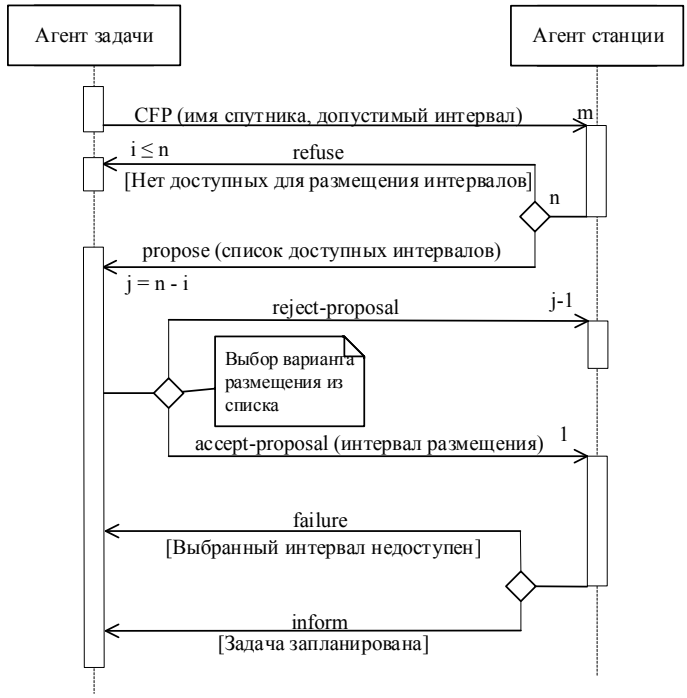


Рисунок 3 – Протокол взаимодействия агентов при появлении новой задачи

Каждый агент наземной станции, получивший это сообщение, производит анализ интервалов видимости указанного микроспутника в рамках указанного интервала времени. Так как вычисление интервалов видимости между микроспутником и станцией является достаточно ресурсоемкой операцией, расчет производится только по соответствующему запросу. Из полученного списка возможных интервалов размещения задачи вычитаются те промежутки времени, в течение которых станция занята выполнением других задач в соответствии со своим расписанием. Если доступные для размещения интервалы не найдены, агент станции отправляет ответное сообщение *refuse*, в противном случае – сообщение *propose*, содержащее список доступных интервалов.

Дождавшись всех ответных сообщений, агент задачи определяет лучший в соответствии со своей целевой функцией вариант размещения, после чего отправляет предложившему этот вариант агенту станции сообщение *accept-proposal*. Это сообщение содержит определяемый задачей интервал планирования, зависящий от времени начала и продолжительности сеанса связи. Всем остальным агентам станций отправляется сообщение *reject-proposal*.

Получив сообщение *accept-proposal*, агент станции производит проверку указанного в нем интервала планирования на занятость другими задачами. Если интервал свободен, отправляется ответное сообщение *inform*, агент ресурса получает плату за размещение, а информация о задаче заносится в расписание. В противном случае отправляется сообщение *failure*, получив которое, агент задачи пытается разместиться на другом ресурсе.

Далее в действие вступает алгоритм проактивного улучшения удовлетворенности агентов задач. Первым процесс улучшения начинает агент задачи с наименьшим значением целевой функции. Проактивная задача опрашивает подходящие ей ресурсы, определяя стоимость размещения на отдельных участках расписания. Среди задач, запланированных на рассматриваемом интервале времени, выбираются две ближайшие: с левой и правой стороны от середины интервала планируемой задачи. Агентам этих задач отправляется запрос сдвига на указанное время. Рекурсивное перемещение затрагиваемых сдвигом задач продолжается до тех пор, пока очередная сдвигаемая задача не сможет беспрепятственно переместиться на новую позицию, у вытесняющей задачи остаются средства на компенсацию всех издержек, или не станет равным нулю счетчик, ограничивающий глубину рекурсии. Из всего множества возможных точек размещения исключаются те варианты, утверждение которых не позволит улучшить значение целевой функции системы, из оставшихся вариантов выбирается наилучший.

Задача, оставшаяся незапланированной, помещается в очередь ожидающих планирования задач. Очередная попытка планирования этих задач будет предпринята в случае возникновения событий добавления новых или изменения расписания уже существующих ресурсов.

Разрабатываемая система развивает модели, методы и алгоритмы, разработанные ранее для мультиагентной системы управления группировкой МКА [5], в которой поступающие задачи ДЗЗ адаптивно распределялись между МКА с различными техническими возможностями.

Заключение

Предложенный подход к планированию сеансов связи позволит добиться высокой оперативности, гибкости и эффективности в работе сети микроспутников и станций, в особенности, при априорной неопределенности в изменениях спроса и предложения на услуги микроспутников и наземных станций и высоком уровне динамики в возникновении непредвиденных событий. Динамическое формирование и поддержание адекватного согласованного всеми участниками расписания в процессе переговоров агентов задач и станций позволит учитывать меняющиеся внешние условия, связанные с изменением условий передачи данных, параметров орбит, отказом оборудования микроспутников, перегрузкой каналов связи и др. Кроме того, работа микроспутников и станций станет прозрачной для всех участников, позволит сократить трудоемкость планирования и уменьшить ошибки, вызванные человеческим фактором, повысит надежность создаваемой техники.

Список литературы

[1] Л.А. Макриденко, К.А. Боярчук. Микроспутники. Тенденции развития. Особенности рынка и социальное значение. – Режим доступа: http://jurnal.vniiem.ru/text/102/2.pdf

[2] Виттих В. А., Скобелев П. О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. 2009. № 2. С. 78-87.

[3] П.О. Скобелев. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Приложение к теоретическому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии». – 2013. №1. – С. 1–32.

[4] Foundation for Intelligent Physical Agents – Режим доступа: http://www.racurs.ru/?page=710

[5] Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Степанов М. Е., Жиляев А.А. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. – 2013. №1(62). – С. 16–26.

КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СЕРВИСНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПРИ ПОСТРОЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ МИКРОСПУТНИКОВ

П.О. Скобелев[1], А.Б. Иванов[2], Е.В. Симонова[3], В.С. Травин[3], А.А. Жиляев[3]

[1]Институт проблем управления сложными системами РАН

443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия,

тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

petr.skobelev@gmail.com,

[2]École Polytechnique Fédérale de Lausanne
Route Cantonale, 1015 Lausanne, Switzerland
anton.ivanov@epfl.ch,

[3]Научно-производственная компания «Разумные решения»
443013, Самара, Московское шоссе, 17, офисный центр «Вертикаль», офис 1201
simonova@smartsolutions-123.ru

Ключевые слова: *сервисно-ориентированный подход, космическая система, архитектура, микроспутник, наземная станция*

Abstract

The service-oriented approach to the implementation of space microsatellites systems is considered. The main components of the system and possible interaction protocols are described. The advantages of service-oriented architecture in comparison with their conventional counterparts are presented.

Введение

В настоящие время для проведения научных экспериментов широко используются специализированные малые космические аппараты (МКА), на которые может быть установлена разнообразная научно-исследовательская и коммерческая аппаратура. Большой спрос на их использование продиктован сравнительно низкой стоимостью эксплуатации. Применение МКА позволило вовлечь в космические исследования большее количество людей. Интерес к данной области демонстрируют различные зарубежные и отечественные университеты и предприятия, запускающие МКА. Важной технической особенностью малых космических аппаратов является замена в их конструкции специализированных космических компонентов на электронные компоненты повсеместного использования. Данный фактор уменьшает время существования космического аппарата на орбите, но существенно снижает затраты на его эксплуатацию и запуск. В настоящее время широкое распространение получили проекты, основанные на использовании микроспутников [1].

Одной из проблем, возникающих при использовании микроспутников, является планирование их загрузки в условиях, когда эксплуатирующие организации используют эти аппараты лишь в течение ограниченного периода времени, необходимого для решения собственных задач. В оставшееся время оборудование космических аппаратов (КА) простаивает. С другой стороны, имеется постоянная потребность в проверке новых идей и проведении экспериментов, для которых запуск специального космического аппарата был бы нецелесообразен, так как для этих целей могут быть использованы существующие КА. Применение сервисно-

ориентированного подхода в этом случае позволило бы организовать работу с имеющейся группировкой КА более эффективным образом.

1 Постановка задачи

Пусть задан динамически изменяемый набор космических аппаратов с различной полезной нагрузкой (фотообъектив, датчик магнитного поля Земли, другое научное оборудование). Для получения услуги от любой полезной нагрузки (сервиса) необходимо выполнить некоторую последовательность действий, требующих определенных затрат времени и ресурсов. Каждая услуга характеризуется определенным набором операций, которые могут быть запланированы и выполнены в строго определенные моменты времени. При этом каждое оборудование может одновременно участвовать в предоставлении множества услуг различным пользователям, число которых и их требования заранее также не известны. Между составляющими услугу операциями есть связи и зависимости, позволяющие задавать ограничения на последовательность и возможность параллельного выполнения операций. Каждая услуга имеет себестоимость и цену для потребителя, которая может меняться динамически, в зависимости от загрузки оборудования. Некоторые услуги могут потребовать согласованного распределенного выполнения множества операций на нескольких космических аппаратах с различной полезной нагрузкой (например, выполнение съемки участка поверхности Земли в различных диапазонах длин волн). Будем считать, что в систему в любой момент времени может поступать неограниченное количество запросов на выполнение услуг. Услуга может быть выполнена с различным качеством, стоимостью и в разные сроки, в зависимости от указанных потребителем приоритетов. При этом потребителю может быть предоставлен выбор из альтернативных вариантов. Количество аппаратов и интервалов доступности их оборудования может изменяться в реальном времени и заранее также не устанавливается.

Необходимо обеспечить адаптивное планирование поступающих заказов, перераспределяя их между КА с целью повышения производительности космической системы, получения наибольшей выгоды, минимизации сроков выполнения отдельных заказов или обеспечения выполнения других динамически изменяющихся критериев. При этом пользователь не должен указывать, как и где следует выполнить его заказ. Система должна самостоятельно распределять заказы по космическим аппаратам, вести учет времени использования их оборудования и формировать итоговую стоимость услуги для потребителя, который, как предполагается, должен иметь возможность получать в ответ на свой запрос стоимость и сроки выполнения услуги, после чего решать, согласен ли он на предлагаемые условия.

2 Описание сервисно-ориентированного подхода к решению задачи

Сервисно-ориентированная архитектура (Service Oriented Architecture (SOA)) – это прикладная архитектура, в которой все функции определены как независимые сервисы с вызываемыми интерфейсами [2]. Обращение к этим сервисам в определенной последовательности позволяет реализовать тот или иной бизнес-процесс. Другими словами, SOA – это компонентная модель, в которой разные функциональные единицы приложений, называемые сервисами, взаимодействуют в сети посредством интерфейсов.

Необходимо отметить, что в качестве сервиса может выступать как целое приложение, так и его отдельные функциональные модули. Сервисы являются независимыми друг от друга. Интерфейс сервиса определяет суть сервиса, а не технологию его реализации, и является нейтральным к специфике реализации сервиса, которая определяется аппаратной платформой, операционной системой, языком программирования. Способ обращения к сервису не зависит от его местонахождения. SOA – это технология, которая направлена на интеграцию и повышение доступности имеющихся вычислительных, информационных и аппаратных ресурсов. Основной идеей SOA является предоставление функциональности приложений в виде серви-

сов и обеспечение доступа к ним независимо от используемых операционных платформ и языков программирования. Одним из ключевых понятий в SOA является интероперабельность, т.е. способность двух или более информационных систем или их компонентов к взаимодействию. Выделяют семантическую интероперабельность (свойство информационных систем, обеспечивающее взаимную употребимость полученной информации на основе общего понимания ее значения) и техническую интероперабельность (совместимость систем на техническом уровне, включая протоколы передачи данных и форматы представления данных). Техническая интероперабельность обеспечивается применением таких технологий, как DCE, CORBA, DCOM, RMI. Методы обеспечения сематической интероперабельности на данный момент не стандартизованы. Наиболее популярные из них предполагают применение онтологии (сети понятий и отношений предметной области), с помощью которой информационные системы смогут самостоятельно идентифицировать все необходимые им для выполнения требуемых задач компоненты и связываться с ними, в ходе работы адаптируясь к техническим интерфейсам и преобразуя форматы данных [3].

Для реализации SOA предлагается использовать технологии и стандарты Web, позволяющие в настоящее время наиболее полноценно реализовать SOA-архитектуру.

Использование для создания платформы сервисно-ориентированной архитектуры является оправданным в связи с тем, что компоненты космической системы имеют различную организацию и поэтому связь и взаимодействие между ними не должны зависеть от их реализации. Использование онтологий и технологий семантического Web позволит создать инструмент для описания и редактирования услуг и операций, из которых они состоят.

Для объединения оборудования КА в информационную сеть предлагается использовать технологии «интернета вещей» (Internet Of Things), позволяющие объединять различные физические устройства, способные взаимодействовать друг с другом или с внешней средой. Одним из примеров такой технологии является протокол передачи данных MQTT, описывающий порядок действия для обмена сообщениями между устройствами.

3 Разработка сервисно-ориентированной архитектуры

Основными компонентами космической системы микроспутников, реализующей сервисно-ориентированную архитектуру, являются:

- пользователи, потребители сервисов;
- облачная инфраструктура, обеспечивающая взаимодействие пользователей с системой;
- база знаний космических аппаратов, услуг и составляющих их операций;
- система управления, обеспечивающая бесперебойное функционирование космической группировки микроспутников, контроль за их состоянием и формирование управляющих воздействий;
- подсистема планирования, отвечающая за построение и динамическое изменение плана выполнения заказов;
- подсистема моделирования, предоставляющая математический аппарат для расчета условий, определяющих возможность выполнения заказа конкретным микроспутником в заданный момент времени (например, условие видимости при предоставлении услуг дистанционного зондирования Земли);
- сеть наземных станций, отвечающая за взаимодействие системы управления и группировки микроспутников;
- микроспутники, непосредственно выполняющие запланированные на них операции посредством имеющегося целевого оборудования.

При оформлении заказа пользователи через Web-сервис выбирают необходимые услуги из перечня, предоставляемого базой знаний системы. На основании поступивших заказов в

системе управления формируется список текущих незапланированных задач, который передается в подсистему планирования. Из базы знаний поступают сведения о составе и возможностях имеющейся группировки микроспутников, а также требуемые для выполнения задач операции. На основании этих данных, а также полученной при анализе телеметрии информации о состоянии группировки микроспутников, строится план выполнения заказов, который в виде команд доводится через сеть наземных станций до конечных исполнителей – группировки микроспутников. Выполнив требуемые операции, микроспутники ретранслируют полученные данные на Землю, после чего они становятся доступными пользователю посредством облачного сервиса (рисунок 1).

Рисунок 1 – Сервисно-ориентированная архитектура космической системы микроспутников

Одним из перспективных подходов при реализации подсистемы планирования является использование мультиагентных технологий, позволяющих решать сложные проблемы за счет самоорганизации конкурирующих и кооперирующихся агентов [4,5]. Решение любой сложной задачи в такой системе формируется эволюционным путем за счет взаимодействия агентов, непрерывно конкурирующих и кооперирующих друг с другом. В мультиагентном подходе решение строится через согласованное взаимодействие асинхронно и параллельно работающих небольших автономных программ, действующих в интересах своих владельцев, но всегда способных идти на уступки ради достижения ключевых показателей эффективности (Key Performance Indicators (KPI)) системы при коллективном решении задачи [6].

4 Основные преимущества сервисно-ориентированного подхода

Предлагаемый подход позволит придать космическим системам микроспутников ряд новых качеств:

- Космические услуги предоставляются интересующимся гражданам и организациям в виде сервиса, внешне напоминающего портал www.gosuslugi.ru. Владельцы спутников и оборудования смогут организовать доступ к ним в режиме онлайн, что, само по себе, создает уникальные возможности по информатизации космоса.

- Производители и владельцы малых космических аппаратов будут иметь возможность сдавать оборудование КА в аренду с целью получения дополнительной прибыли и повышения рентабельности миссии космических аппаратов.
- Пользователи системы будут иметь дело с «облаком» космических аппаратов, что избавит их от необходимости самостоятельного планирования исполнения заказа и, как следствие, упростит взаимодействие с эксплуатирующими организациями. Пользователи смогут сосредоточить свое внимание только на конечном результате, не вникая в детали внутренней реализации функционирования космической системы. Планирование будет осуществляться ситуационно, в реальном времени.
- Разработчики нового оборудования получат возможность устанавливать свое оборудование на вновь проектируемые космические аппараты и впоследствии получать часть прибыли от его использования. Это позволит снизить порог входа для разработчиков нового оборудования, сократив «расстояние» между производителями и потребителями целевого оборудования.
- Владельцы КА будут избавлены от необходимости заниматься обработкой потока заявок по использованию оборудования их космических аппаратов и смогут сосредоточиться на поддержании общей работоспособности системы. При этом у них сохраняется возможность ограничивать доступ к КА, например, для проведения собственных исследований или регламентных работ, пересматривать стоимость своих услуг, гибко реагируя на изменения рынка.
- Все знания о типах и последовательностях операций, которые необходимо выполнить для предоставления услуги, хранятся в расширяемой базе знаний системы, разделяемой всеми КА. Это позволит унифицировать процессы формирования и исполнения заказов на услуги.
- Динамическое построение планов позволит гибко, по ситуации, реагировать на происходящие события поступления новых заказов, добавления/удаления ресурсов и т.д.
- Полученные ранее результаты могут быть предоставлены различным научным сообществам в открытом доступе. В дальнейшем система сможет обучаться на этих результатах и предоставлять еще более умные сервисы.

Заключение

Описанная концепция может быть использована для развертывания в сети Internet распределенной системы, предназначенной для предоставления различных услуг на оборудовании группировки микроспутников. Применяемый при этом сервисно-ориентированный подход позволит создать удобную для всех участников рынка космических услуг платформу взаимодействия.

Список литературы

[1] Л.А. Макриденко, К.А. Боярчук. Микроспутники. Тенденции развития. Особенности рынка и социальное значение. – Режим доступа: http://jurnal.vniiem.ru/text/102/2.pdf

[2] Understanding Service-Oriented Architecture. – Режим доступа: http://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa480021.aspx

[3] А.В. Черноусов, Е.С. Черноусова Преимущества использования SOA при построении мультиагентных систем // Информационные и математические технологии в науке и управлении / Труды XII Байкальской всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении», 4.2. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2007. – С. 59-65.

[4] Виттих В. А., Скобелев П. О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. 2009. № 2. С. 78-87.

[5] П.О. Скобелев. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Приложение к теоретиче-

скому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии». – 2013. №1. – С. 1–32.
[6] Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Степанов М. Е., Жиляев А.А. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. – 2013. №1(62). – С. 16–26.

Control in Complex Technical Systems
Управление в сложных технических системах

О НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ И АЛГОРИТМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ СТАЛИ

А.В. Банникова[1], А.А. Корнеева[1], М. Е. Корнет[2]

[1]Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий
660150, Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия
stasy144@yandex.ru, anna.korneeva.90@mail.ru
тел: + 7 (923) 206-09-09, + 7 (960) 755-52-60

[2]Сибирский Государственный Аэрокосмический Университет имени академика М.Ф. Решетнева
660014, Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, Россия
maria4business@mail.ru
тел: + 7 (923) 206-09-09

Ключевые слова: *идентификация дискретно-непрерывных процессов, непараметрическая регрессия, непараметрическая идентификация процесса кислородно-конвертерной плавки*

Abstract

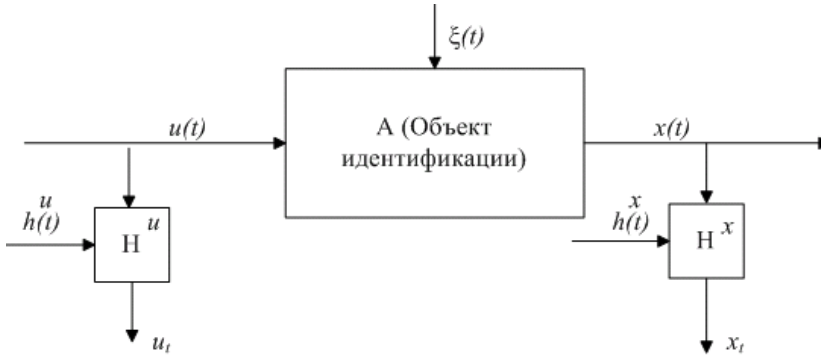
The paper considers the problem of nonparametric identification of the discrete and continuous process of the basic oxygen steel melting. The identification peculiarities in conditions of parametric and nonparametric uncertainty are pointed out. The appropriateness of the nonparametric methods use in conditions of small a priori information is emphasized. Some non-parametrical models of the process of basic oxygen steel melting are built according to the key output variables determining the chemical composition of metal at turndown: carbon (C), sulfur (S), phosphorus (P) and manganese (Mn). Some results of the modeling process of basic oxygen steel melting showed that the process is conducted in the framework of technological order, however, it is not enough for the qualified control by the melting process.

Введение

Проблема моделирования, идентификации надолго останется одной из центральных проблем теории управления. Постановка задачи идентификации во многом зависит от класса исследуемого процесса (статические, динамические, линейные, нелинейные и др.) и от объема априорной информации. Эта проблема продолжает оставаться актуальной для различных реальных процессов дискретно-непрерывного типа. В докладе приводятся некоторые результаты моделирования процесса кислородно-конвертерной плавки стали.

1 Постановка задачи

Рассмотрим процесс, общая схема которого представлена на рисунке 1. Данный процесс относится к классу дискретно-непрерывных. Сам процесс является непрерывным, однако контроль «входных-выходных» переменных $u(t)$, $x(t)$ здесь осуществляется через дискретный интервал времени Δt. Таким образом, мы имеем выборку «входных-выходных» переменных $\left\{x_i, u_i, i = \overline{1, s}\right\}$, где s – объем выборки.



A – оператор объекта, $x(t) \in \Omega(x) \subset R^1$ – выходная переменная процесса, $u(t) \subset R^m$ – входные воздействия, $\xi(t)$ – векторная случайная помеха, (t) – непрерывное время, H^u, H^x – блоки контроля, $h^u(t)$, $h^x(t)$ – случайные помехи измерений в блоках контроля

Рисунок 1 – Общая схема исследуемого процесса и контроля переменных

Описываемый процесс является динамическим. Однако вследствие большой дискретности контроля переменных мы вынуждены рассматривать его как статический с запаздыванием. В общем случае процессы с запаздыванием могут быть представлены в виде:

(1) $x(t) = A\big(u(t-\tau), \xi(t)\big)$,

где τ – запаздывание объекта, вообще говоря, отличающееся по различным каналам связи.

Итак, стоит задача идентификации, т.е. необходимо восстановить зависимости между «входными-выходными» характеристиками процессами. Постановка и решение задачи идентификации зависит от уровня имеющейся априорной информации об исследуемом объекте. В зависимости от уровня априорной информации об объекте различают идентификацию в «узком» и «широком» смыслах.

2 Идентификация в «узком» и «широком» смыслах

Параметрическая идентификация (идентификация в «узком» смысле) состоит из двух этапов: идентификация параметрической структуры модели и идентификация параметров в модели выбранной структуры [1]. Данный класс идентификации требует высокого уровня априорной информации об исследуемом объекте. Но зачастую имеющихся априорных сведений не достаточно для выбора параметризованной структуры модели исследуемого объекта, однако, мы можем иметь информацию о его качественных свойствах. В этих случаях целесообразно воспользоваться методами идентификации в «широком» смысле (методами непараметрической идентификации).

О процессе идентификации в «широком» смысле пишет Н.С.Райбман в предисловии к книге П.Эйкхоффа [2], [3]. Эти методы более универсальны, так как используют только исходную статистическую выборку «входных-выходных» переменных исследуемого процесса и некоторые описательные характеристики объекта (статистический или динамический объект, линейный или нелинейный и др.). К таким методам относится непараметрическая оценка функции регрессии по наблюдениям, которую мы использовали в своей работе.

3 Непараметрическая оценка функции регрессии по наблюдениям

Пусть даны наблюдения $\{x_i, u_i, i = \overline{1,s}\}$ случайных величин x, u распределенных с неизвестными плотностями вероятности $p(x,u), p(u) > 0 \; \forall u \in \Omega(u)$. Для восстановления $\tilde{x} = M\{x \mid u\}$ используются непараметрические оценки [2], [3]:

$$(2) \quad x_s(u) = \sum_{i=1}^{s} x_i \prod_{j=1}^{m} \Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right) \Big/ \sum_{i=1}^{s} \prod_{j=1}^{m} \Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right),$$

где $\Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)), i = \overline{1,s}, j = \overline{1,m}$ – ядерная колоколообразная функция и коэффициент размытости ядра c_s удовлетворяют некоторым условиям сходимости [2], [3].

В данной работе в качестве колоколообразной функции $\Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j))$ было использовано треугольное ядро вида:

$$(3) \quad \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) = \begin{cases} 1 - \left|c_s^{-1}(u^j - u_i^j)\right|, \text{если } \left|c_s^{-1}(u^j - u_i^j)\right| \le 1, \\ 0, \text{если } \left|c_s^{-1}(u^j - u_i^j)\right| > 1. \end{cases}$$

Параметр размытости c_s определяется путем решения задачи минимизации квадратичного показателя соответствия выхода объекта и выхода модели, основанного на «методе скользящего экзамена», когда в модели (2) исключается *i*-я переменная, предъявляемая для экзамена:

$$(4) \quad R(c_s) = \sum_{k=1}^{s} \left(x_k - x_s(u_k, c_s)\right)^2 = \min_{c_s}, k \ne i.$$

Если же входная переменная u представляет собой вектор, то для каждой компоненты u необходимо найти свой параметр размытости c_s. Однако если предварительно привести выборку значений вектора u к одному интервалу, используя операции центрирования и нормирования, то параметр размытости можно принять скалярной величиной.

4 Моделирование процесса кислородно-конвертерной плавки стали

Кислородно-конвертерная плавка представляет собой процесс изготовления стали из жидкого чугуна без затраты топлива путем продувки чугуна в конвертере технически чистым кислородом, подаваемым через фурму, которая вводится в металл сверху. Процесс является весьма быстротечным и время всего процесса плавки не превышает 40-50 минут. Управляет процессом кислородно-конвертерной плавки оператор. Измерения переменных процесса осуществляются в начале процесса плавки стали и по его завершению. В ходе плавки идет контроль лишь незначительного числа параметров, а именно состава и температуры конвертерных газов. Процесс кислородно-конвертерной плавки стали является динамическим, однако вследствие сложности контроля переменных процесса в работе мы рассматриваем его как безынерционный процесс с запаздыванием.

Основная задача процесса плавки в сталеплавильном агрегате заключается в получении определенной запланированной марки стали с заданным химическим составом и температурой [4]. Для решения данных производственных задач необходима модель расчета основных параметров плавки. Различают детерминированные, статистические и эвристические модели конвертерной плавки [5]. Эвристические модели построены на основе нечёткой логики и логических правил условного вывода, нейронных сетей [6], [7]. Существенную роль в таких моделях играет человеческий фактор, кроме того, необходимо длительное время для настройки моде-

лей, что лимитирует их использование в металлургии. Статистические модели плавки [8] используются для целей статического управления, основными предпосылками успешного применения таких моделей, является стабильность условий работы конвертера. Детерминированная физико-химическая модель плавки строится на базе фундаментальных законов сохранения массы и энергии. Передовые достижения в теории сталеплавильных процессов основаны на термодинамике Дж. У. Гиббса [9]. Термодинамические модели плавки включают в себя модель фаз и на ее основе модель системы металл-шлак-газ. Здесь результат моделирования определяется выбором вида уравнения состояния и расчетом равновесия. Факт неравновесности реального процесса, а также действие неопределенных факторов и особенности состояния конвертера, учитываются коррекцией констант равновесия по массиву экспериментальных данных. Разработки адекватной модели конвертерной плавки, с приемлемой вычислительной сложностью, предназначенной, прежде всего, для ее использования в системе управления, продолжаются в научном мире.

Сталеплавильный процесс характеризуется сложными, многофакторными взаимодействиями и связями, возникающими по его ходу. Так, на кинетику окисления примесей оказывают влияние возмущения и управляющие воздействия, имеющие место во время продувки. Колебания извести и шлакообразующих, состава чугуна, состава и количества металлолома, стойкости и разрушения футеровки, заметалливание сопел и т.п., усложняют разработку детерминированной модели плавки. В такой ситуации приемлемым решением может быть непараметрическая стохастическая аппроксимация некоторых связей «вход-выход» [10].

Общая схема идентификации процесса кислородно-конвертерной плавки стали представлена на рисунке 2 [11].

Входные контролируемые переменные можно разделить на управляемые по ходу процесса и неуправляемые. Применительно к процессу кислородно-конвертерной плавки контролируемыми управляемыми переменными являются: u_1 (расход кислорода на продувку, м^3), u_2 (расход кислорода на прогрев, м^3), расход материалов, т. (u_3 – известь, u_4 – электродный бой, u_5 – флюс ФОМИ, u_6 – ФМ-1, u_7 – агломерат офлюсованный, u_8 – уголь ССО), u_9 – продолжительность продувки, мин., u_{10} – расстояние между кислородной фурмой и уровнем ванны конвертора. В качестве контролируемых неуправляемых по ходу плавки переменных $\mu(t)$ выступают: μ_1 (расход чугуна, т.), химический состав заливаемого чугуна, (%) (μ_2 – кремний Si, μ_3 –магний Mn, μ_4 – сера S, μ_5 – фосфор P), μ_6 (температура чугуна, С°), μ_7 (расход лома, т.). К помехам $\xi(t)$, действующим на процесс, относят различные трудно формализуемые факторы. К таким факторам можно отнести состояние сталевыпускного отверстия, тепловое состояние футеровки ковша перед постановкой на выпуск, угар, усвоение присадок и др.

Векторная выходная переменная $x(t)$ характеризует качество конечного продукта кислородно-конвертерной плавки, а именно: химический состав металла на повалке, (%) (x_1 – углерод C, x_2 – магний Mn, x_3 – сера S, x_4 – фосфор P), химический состав конечного шлака на повалке, (%) (x_5 – Cao, x_6 – SiO2, x_7 – FeO, x_8 – MgO, x_9 – Al2O3, x_{10} – S, x_{11} – MnO, x_{12} – P2O5, x_{13} – TiO2, x_{14} – V2O5), x_{15} (температура металла на повалке, С°).

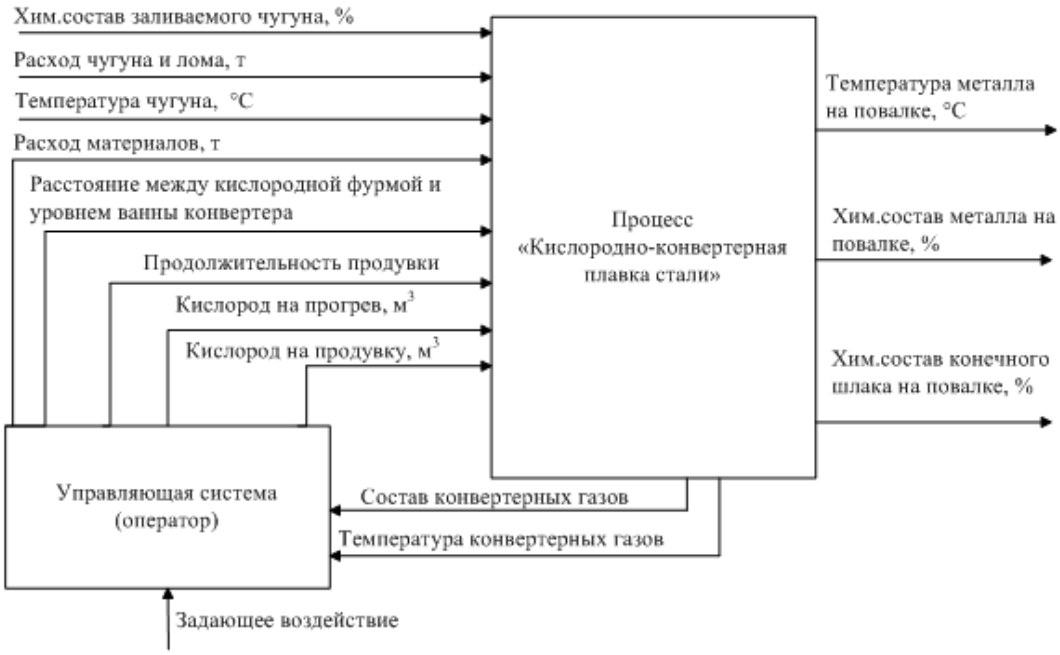


Рисунок 2 – Схема идентификации процесса кислородно-конвертерной плавки стали

Векторная переменная $\omega(t)$ представляет собой дополнительные сведения о ходе процесса, которые оператор использует для управления: ω_1 (состав конвертерных газов) и ω_2 (температура конвертерных газов, С°).

Для вычислительного эксперимента использовалась выборка реальных данных по процессу кислородно-конвертерной плавки, которая включали в себя следующие переменные: $u_1 - u_8$, $\mu_1 - \mu_7$, $x_1 - x_{15}$. Объем выборки был равен s=35. Важнейшей выходной переменной процесса кислородной-конвертерной плавки является векторная переменная «Химический состав металла на повалке» (%), которая включает в себя четыре переменные: $x_1(u)$ (углерод С), $x_2(u)$ (марганец Mn), $x_3(u)$ (S сера), $x_4(u)$ (фосфор Р). Для прогноза этих переменных было построено 4 непараметрические модели вида

$$(5)\quad x_s^l(u) = \frac{\sum_{i=1}^{35} x_i^l \prod_{j=1}^{8} \Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right) \prod_{k=1}^{7} \Phi\left(c_s^{-1}\left(\mu^k - \mu_i^k\right)\right)}{\sum_{i=1}^{35} \prod_{j=1}^{8} \Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right) \prod_{k=1}^{7} \Phi\left(c_s^{-1}\left(\mu^k - \mu_i^k\right)\right)},$$

где $l = \overline{1,4}$.

Для оценки полученных моделей была использована квадратичная ошибка вида:

$$(6)\quad R_s = \frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s}\left(x_i - x_i^s\right)^2,$$

где x_i – измеренное значение выходной переменной, x_i^s – полученная оценка, R_s – квадратичная ошибка.

Непараметрические модели были построены в режиме «скользящего среднего» для выходных переменных x_1, x_2, x_3, x_4. Полученные результаты представлены в таблице 1. В таблице показаны: квадратичная ошибка моделирования R_s (13), оценка дисперсии D_s выхода объекта x_i, а также отношение $W = R_s / D_s$.

Таблица 1. Результаты вычислительного эксперимента

Показатель / Элемент	Ошибка R_s	Оценка дисперсии D_s выходной переменной x_i	Отношение W
Углерод, C (x_1)	0.00019778	0.000234	0.845
Марганец, Mn (x_2)	0.0004301358	0.0005404	0.85
Сера, S (x_3)	0.00000755	0.00001183	0.64
Фосфор, P (x_4)	0.00004077	0.000041137	0.99

Как видно из таблице 1 ошибка прогнозирования достаточно велика (W близко к 1). Это говорит о том, что полученный прогноз является достаточно грубым.

На рисунке 2 показан характер зависимости концентрации углерода C (%) в металле на повалке от содержания лома (т.) в расходных материалах.

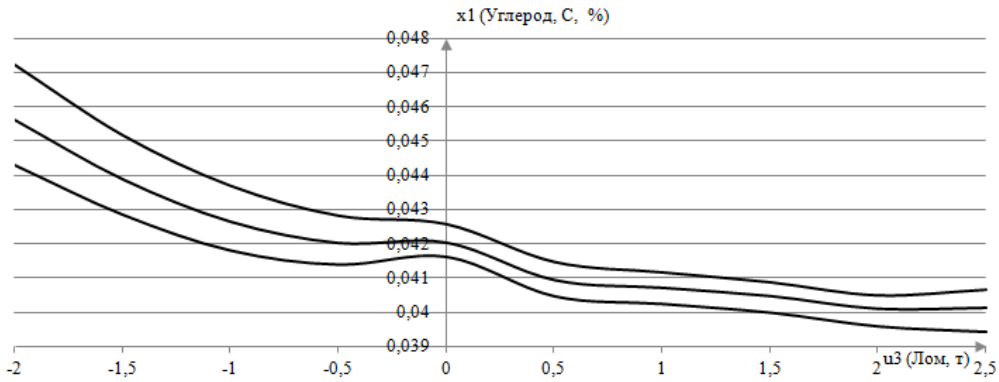


Рисунок 3 – Характер зависимости концентрации углерода C на повалке от содержания лома (т.) в расходных материалах лома

Содержание лома в данном случае является величиной нормированной. Графики представляют собой срезы при 14 фиксированных входных переменных u_1, u_2, u_4,…, u_8, μ_1, μ_2,…, μ_7, а переменная u_3 (содержание лома) изменяется в границах [-2; 2.5]. Кривая «1» соответствует случаю, когда все фиксированные переменные принимали свое среднее значение. Кривая «2» соответствует сдвигу фиксированной переменной μ_1 (расход чугуна) на 0.3 от своего среднего значения, кривая «3» – сдвиг на величину -0.3 от среднего значения. Из приведенного рисунка следует, что характер зависимости нелинейный и достаточно точно описывает канал «расход материала (чугун, лом, известь, электродный бой, флюс, ФМ-1, агломерат офлюсованный, угль ССО), кислород на продувку, кислород на прогрев, химический состав заливаемого чугуна (кремний Si, марганец Mn, сера S, фосфор P), температура чугуна – углерод (C) в металле на повалке». А это означает, что использование подобных моделей может оказаться полезным для управления процессом конвертерной выплавки стали.

Заключение

В докладе рассмотрена задача идентификации дискренто-непрерывных процессов в условиях параметрической и непараметрической неопределенности. Анализируется вопрос идентификации в «узком» и «широком» смыслах. Приводятся непараметрические модели для многомерных дискретно-непрерывных процессов.

Построены непараметрические модели для следующих важнейших выходных переменных процесса, определяющих содержание основных химических элементов в металле на повалке: углерод (C), марганец (Mn), сера (S), фосфор (P). Приводятся результаты предварительных расчетов. Вычислительные эксперименты показали, что управление процессом кислородно-конвертерной плавки ведется неудовлетворительно, но, тем не менее, соответствует технологическому регламенту. Иными словами, в рамках технологического регламента управляемый процесс представляет собой «облако», т.е. переменные процесса могут принимать произвольные значения из всей области определения переменных, регламентируемой технологической картой. На нынешних предприятиях технологический регламент чаще всего достаточно широк и если процесс ведется в рамках технологического регламента, но не рациональным образом, то ожидать конечного продукта высокого качества не следует. Полученные непараметрические модели требуют дальнейшего исследования.

Благодарности

Выражаем благодарность профессору Медведеву А.В. за помощь при проведении исследований.

Список литературы

[1] Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука. 1968. 400 с.
[2] Надарая Э.А. Непараметрические оценки плотности вероятности и кривой регрессии. Изд. Тбил. ун-т. 1983. 194 с.
[3] Медведев А.В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск: Наука. 1983. 174 с.
[4] Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. М.: Металлургия. 1998. 768 с.
[5] Желдак Т.А., Воловенко Д.А. Подходы к построению интеллектуальной системы, управляющей кислородным конвертером // Научный вестник НГУ. 2011. №5. С. 133-136.
[6] Kubat C.H., Taskin Bofy-fuzzy logic control for the Basic Oxygen Furnace (BOF) // Robotics and Autonomous System. 2004. Vol. 49. P. 193-205.
[7] Sarita Chauhan, Mahendra Singh, Vivek Kumar Meena. Comparative study of BOF Steelmaking Process based on ANFIS and GRNN Model // International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT). 2013. Vol. 2 (9). P. 198-202.
[8] Гулыга Д.В., Сущенко А.В. Модель расчета параметров кислородно-конвертерной плавки // Сталь. 2003. №12. С. 19-24.
[9] Пономаренко А.Г., Окоукони П.И., Храпко С.А., Иноземцева Е.Н.. Управление сталеплавильными агрегатами на основе современных физико-химических представлений // Труды 4-го конгресса сталеплавильщиков. Москва, 1997, с. 35-40.
[10] Корнеева А.А. Корнет М.Е. Непараметрическое моделирование конвертерной плавки // Черная металлургия. Новокузнецк. 2013. №10. С.24-28.
[11] Корнет М.Е. О непараметрической идентификации системы управления конвертерной плавкой // Вестник Сибирского Государственного Университета им.ак. М.Ф. Решетнева. 2013. № 4. С. 72-76.
[12] Wille R., Ganter B. Formale Begriffsanalyse. – Springer-Verlag, 1996.

О НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ И АЛГОРИТМАХ УПРАВЛЕНИЯ МАКРООБЪЕКТОМ

А.В. Банникова[1], А.А. Корнеева[1], М. Е. Корнет[2]

[1]Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий
660150, Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия
stasy144@yandex.ru, anna.korneeva.90@mail.ru
тел: + 7 (923) 206-09-09, + 7 (960) 755-52-60

[2]Сибирский Государственный Аэрокосмический Университет имени академика М.Ф. Решетнева
660014, Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, Россия
maria4business@mail.ru
тел: + 7 (923) 206-09-09

***Ключевые слова**: дискретно-непрерывный процесс, дуальное управление, непараметрические методы, адаптивное управление, априорная информация, макрообъект*

Abstract

The article discusses a new class of control problems static objects discrete-continuous type. The two-step procedure for constructing non-parametric control is presented. The procedure includes the construction of non-parametric model of macro object and the synthesis of non-parametric controller itself. The dual-contour scheme of control assumes preservation of analog means of local automatic equipment that does it reliable at failure of a digital contour of management. Focuses on the construction of non-parametric system of dual control. In this regard, a summary on the nonparametric estimation of probability density function and regression of the available real samples. The problem of dualism in the management of discrete continuous process. In some detail the results of computational experiments , as expected , the introduction of an external circuit to enhance the quality control process.

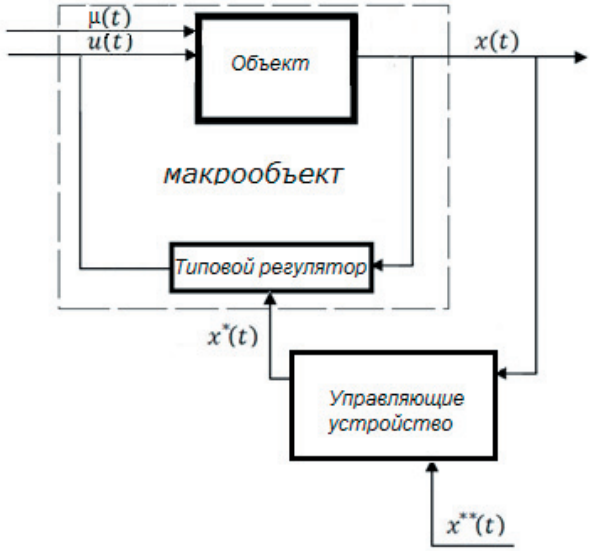
Введение

В настоящие время, при управлении дискретными непрерывными процессами в разных отраслях промышленности, часто используют стандартные типовые законы регулирования (П, ПИ, ПИД регуляторы). В частности, они эффективно используются при управлении хорошо контролируемыми техническими объектами, в частности, плавильными печами, реакторами, турбинами и др. Совершенно ясно, что качество регулирования различного рода зависит от настроек соответствующих регуляторов, и в ряде случаев оказывается недостаточно эффективными. Отметим еще одно обстоятельство, что типовые регуляторы, используемые в промышленности, не являются обучающими (адаптивными). Это значит, что при повторном переводе объекта из одного состояния в другое, регулятор функционирует таким же образом, как и ранее. Предметом исследования настоящей статьи является построение обучающегося, адаптивного управляющегося устройства, которое в процессе функционирования, улучшает рабочие свойства управляющей системы. На этом пути естественно использование теории адаптивных управляющих систем [1], но параметрическая теория адаптивных систем предполагает предварительную параметризацию объекта. В случае недостатка априорной информации о параметрической структуре исследуемого объекте, естественно использовать теорию непараметрической системы управления [2, 3]. Непараметрическая теория предполагает, что известны только качественные характеристики системы, что позволяет полностью уйти от вопроса определения параметрической структуры объекта. В настоящей

статье сделан акцент на исследование непараметрического алгоритма дуального управления дискретными непрерывными процессами.

1 Постановка задачи

Для изложения дальнейшего нам понадобится анализ следующей блок-схемы, представленной на рисунке 1:



x(t) –выходная переменная процесса, *u(t)* –входное управляющее воздействие, *μ(t)* –входное неизвестное, но контролируемое воздействие, *x*(t)* – задающее воздействие регулятора, *x**(t)* – задающее воздействие программируемого управляющего устройства, *t* – непрерывное время

Рисунок 1 – Общая схема исследуемого процесса и контроля переменных

Контроль *u(t)*, *μ(t)*, *x(t)* осуществляется через интервал времени Δt. Таким образом, мы имеем выборку «входных-выходных» переменных $\{x_i, u_i, \mu_i, i = \overline{1,s}\}$, где *s* – объем выборки.

Примечательно, что в выше описанной схеме, что встроенный в систему управления типовой регулятор сохранен, но добавлен внешний контур управления, несущий в себе черты обучаемости и дуализма. Для него объект и регулятор являются своеобразным макрообъектом.

Очевидно, что управляющие устройство является внешним контуром управления, который позволяет улучшить качество управления объекта. При этом замена типовых регуляторов, которые находятся в производстве (П, ПИ, ПИД), не предполагается . Это связанно с тем, что стандартные регуляторы – аналоговые, и часто более надежные в работе, чем цифровые, которые в большей степени подвержены воздействию внешней среды (резкий перепад температур, вибрации, агрессивной среды, воздействия различного рода излучениям).

2 Непараметрические оценки кривой регрессии

Пусть имеется статически независимые наблюдения двух случайных величин $(x,y) = (x_1,y_1),\ldots,(x_n,y_n)$ распределенных с неизвестной плотностью вероятности $P(x,y)$ [4]. Предполагается, что $p(x) > 0 \forall x \in \Omega(x)$. При аппроксимации неизвестных стохастических зависимостей *y* от *x* часто используют регрессию *y* по *x*:

(1) $y(x) = f(x) = \left(\int_{\Omega(y)} P(x,y)dy\right)^{-1} \int_{\Omega(y)} yP(x,y)dy$

непараметрическая оценка, которой, как известно, имеет вид:

(2) $y_n(x) = f_n(x) = \left(\sum_{i=1}^{n} \Phi\left[\frac{x-x_i}{C_n}\right]\right)^{-1} \sum_{i=1}^{n} y_i \Phi\left[\frac{x-x_i}{C_n}\right]$

Оценку (2) можно получить из (1) подстановкой в нее непараметрической оценки двумерной плотности вероятности $P(x,y)$ при условии, что

(3) $C_n^{-1} \int_{\Omega(y)} y\Phi\left(C_n^{-1}(y - y_i)\right)dy = y_i, i = \overline{1,n}.$

Выполнение последнего требования всюду в дальнейшем предполагается.

Многомерный аналог (2) в случае, когда $x = (x_1, \dots, x_k)$ и $y = (y_1, \dots, y_m)$ векторы, будет иметь вид:

(4) $y_n^j = \pi((\sum_{i=1}^{n} \prod_{j=1}^{k} \Phi(C_j^{-1}(n)\left(x^j - x_i^j\right)))^{-1} \sum_{i=1}^{n} \prod_{j=1}^{k} y_i^j \Phi(.)), j = \overline{1,m}.$

Можно получить и другие оценки $y(x)$ если воспользоваться непараметрическими оценками плотности (2), (4).

Непараметрическая оценка кривой регрессии (4) является сходящейся в среднеквадратическом и асимптотически несмещенной, т.е.

(5) $\lim_{n\to\infty} M\left\{\left(f(x) - f_n(x)\right)^2\right\} = 0, \quad \forall x \in \Omega(x)$

(6) $\lim_{n\to\infty} M\{f_n(x)\} = f_n(x), \quad \forall x \in \Omega(x)$

Следует добавить, оценка регрессии свободна от параметрической структуры объекта.

3 Дуальное управление

Недостаток априорной информации об объекте приводит к необходимости совмещать изучение объекта и управление им. При таком управлении управляющие воздействия носят двойственный характер. Они служат средством изучения, познавания объекта, но также и средством приведения объекта к требуемому состоянию. Такое управление, при котором управляющие воздействия носят двойственный характер, называют дуальным управлением [5]. При этом оказывается, что управляющая и познавательная стороны этих воздействий противоречивы. Действительно, нельзя качественно управлять объектом, не зная его характеристик, но выяснение этих характеристик требует длительного изучения объекта.

Дуальное управление было открыто А.А.Фельдбаумом и развито на основе теории статистических решений [5]. Такой путь предполагает знание априорной плотности распределения случайных возмущений и параметров управляемого объекта. Если же эти плотности распределения неизвестны, то нужно искать, видимо, новые пути решения задач.

Из изложенного видно, что обучающиеся системы управления являются системами «с памятью» т.е. они не только способны изучать характеристики объекта, но и сохраняя их в памяти, вырабатывать оптимальные управляющие воздействия. Теория непараметрических систем управления достаточно подробна изложена в [2].

Непараметрический алгоритм дуального управления, как следует из [2] имеет вид:

(7) $u_{s+1} = u_s^* + \Delta u_{s+1},$

где u_s^* сосредоточены «знания» об объекте, а Δu_{s+1} – «изучающие» поисковые шаги:

(8) $\Delta u_{s+1} = \varepsilon(x_{s+1}^* - x_s)$

В этом и состоит дуализм алгоритма (7).

В качестве оценки объекта $x = f(u, \mu)$ примем оценку функции регрессии по наблюдениям $\{x_i, u_i, \mu_i, i = 1, s\}$:

(9) $$x(u) = \frac{\sum_{i=1}^{s} x_i \Phi\left(\frac{u-u_i}{C_s}\right)\Phi\left(\frac{\mu_s-\mu_i}{C_s}\right)}{\Phi\left(\frac{u-u_i}{C_s}\right)\Phi\left(\frac{\mu_s-\mu_i}{C_s}\right)}$$

где колоколообразные функции $\Phi(\cdot)$ и параметр размытости C_s удовлетворяют некоторым условиям сходимости [4], $u = f^{-1}(x)$ где $f^{-1}(x)$ – функция, обратная $f(u)$, а u_s^* из (7) будет равно:

(10) $$u_s^* = \frac{\sum_{i=1}^{s} x_i \Phi\left(\frac{x^*-x_i}{C_s}\right)\Phi\left(\frac{\mu_s-\mu_i}{C_s}\right)}{\Phi\left(\frac{x^*-x_i}{C_s}\right)\Phi\left(\frac{\mu_s-\mu_i}{C_s}\right)}$$

где x^* – задающее воздействие.

Проанализируем характер дуализма алгоритма (7). На начальной стадии управления основная роль принадлежит второму слагаемому Δu_{s+1} формулы (7). Это случай активного накопления информации в системе дуального управления, который начинается с появления первого наблюдения входной и выходной переменных объекта. По мере процесса обучения (накопления информации) всё возрастающую роль при формировании управляющего воздействия u_{S+1} начинает играть первое слагаемое, т.е. u_s^* Таким образом, в процессе дуального управления объектом фигурируют как этап изучения объекта, так и этап приведения его к цели.

4 Вычислительный эксперимент

Приведем некоторые результаты вычислительных экспериментов. Для имитации реального объекта была принята следующая функция:

$x(t) = au^2(t) + bu + \zeta(0, \sigma_\zeta^2)$, где $\zeta(0, \sigma_\zeta^2)$ - центрированная аддитивная помеха, с нулевым математическим ожиданием, и ограниченной дисперсией.

В качестве коэффициентов была приняты значения: $a = 2$, $b = 1{,}5$.

Контролируемое входное воздействие пусть задается в виде ступенчатого воздействия:

В качестве алгоритма управления был выбран П – алгоритм, который описывается следующей формулой: $u_s = K_p(x_s^* - x_{s-1})$, где K_p - пропорциональный коэффициент, который взят равным K_p = 0,1. Значения k, α в непараметрическом алгоритме управления были приняты равными: k =0.2, α = 1.2. Объем выборки равный 300.

Приведем работу системы управления макрообъектом при ступенчатом воздействии и при отсутствии помехи, (рисунок 2):

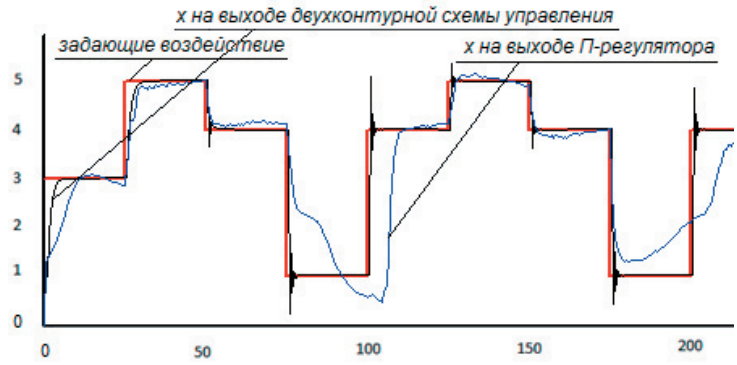


Рисунок 2 – Результат работы системы управления при отсутствии помехи

Обучение управлению начинается с первой дриады наблюдений x_1, u_1, μ_1. На начальной стадии управления необходимо некоторое время (накопление выборки) для приведения объекта в заданное состояние.

Рассмотри случай, представленный на рисунке 3, когда входное неизвестное управляемое воздействие имеет траекторию $\mu(t) = 1.25 + \sin(0.5t)$.

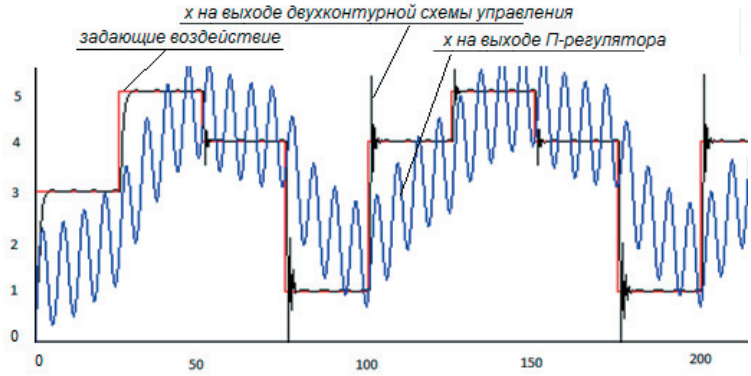


Рисунок 3 – Результат работы системы при увеличении частоты колебаний неизвестного входного воздействия μ(t), задающие воздействие – ступенчатое, помеха отсутствует

Как можно заметить из рисунка 3, непараметрический алгоритм управления, при учащении колебаний входного контролируемого воздействия μ(t), справляется с задачей управления лучше, чем П - регулятор, который в свою очередь выдает управления плохого качества.

Представим задающие воздействие в виде траектории, имеющей вид: $x^*(t) = 4 + 2\sin(0.1t)$, результат данного эксперимента представлен на рисунке 4:

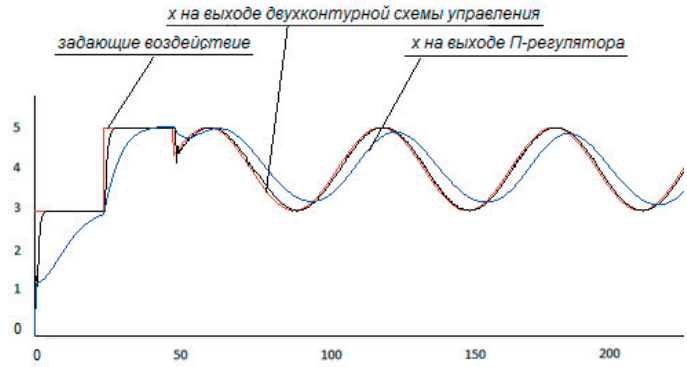


Рисунок 4 – Результат работы системы при задающем воздействии в виде траектории

Как мы можем заметить из рисунка 4, П - регулятор, «не успевает» подстраиватся под x^*, вследствие того, что оно имеет вид траектории, но как только мы добавляем контур, содержащий адаптивный регулятор, мы можем наблюдать, что после «обучения»,происходящего на первых тактах, объект мгновенно переходит к заданию.

Представим случай, когда x^* задается случайным образом (рисунок 5):

Рисунок 5 – Результат работы системы при случайном задании

Здесь мы представили случай, когда двухконтурная система управления, явно превосходит схему, включающую один П-регулятор. В данном примере, x^* – задается случайно, и, разумеется, стандартные алгоритмы регулирования не успевают подстроится под задание, в то время как адаптивный алгоритм, «запомнив», как достигнуть нужний результат, справляется с задачей управления.

Заключение

В настоящей статье рассматривается новый класс задач управления, ориентированных на управление дискретными непрерывными процессами. Актуальность этой задачи обусловлена тем, что при управлении техническими процессами, типовые регуляторы сохраняются, но добавляется внешний контур управления, что существенно улучшает качество управления системы в целом.

Основное внимание уделяется построению непараметрической системы дуального управления. В этой связи даются краткие сведения о непараметрической оценки функции

плотности распределения вероятностей и регрессии по имеющимся реальным выборкам. Обсуждается проблема дуализма при управлении дискретным непрерывным процессом. Достаточно подробно изложены результаты вычислительного эксперимента, как и следовало ожидать, введение внешнего контура позволяет повысить качество регулирования процессом. Следует также заметить, что важность задачи управления безынерционным объектами обусловлена, прежде всего, средствами контроля выходным переменных объекта, так как следует учитывать, что контроль доступен не электрическими средствами, а соответствующей методикой лабораторного контроля, и зачастую оказывается, что время, затраченное на измерение переменных, может значительно превышать постоянной времени объекта. Изложенные непараметрические алгоритмы дуального управления легко распространяются на безынерционные системы с запаздыванием.

Благодарности

Огромная благодарность выражается нашему научному руководителю Медведеву Александру Васильевичу за постоянную поддержку и труд, вложенный в нас.

Список литературы

[1] Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. Изд. «Наука», 1968г. – 400с.
[2] Медведев А.В. Непараметрические системы адаптации. – Новосибирск, Наука, 1983. – 174с.
[3] Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Моделирование // Вестник СибГАУ. 2010. № 4 (30). С. 4–9.
[4] Надарая Э.А. Непараметрические оценки плотности вероятности и кривой регрессии, изд. Тбил. ун-т, 1983. – 194 с.
[5] Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. Москва. Изд. Физматгиз, 1963г. - 552с.

УПРАВЛЕНИЕ КВАДРОКОПТЕРОМ AR.DRONE ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ С ОБХОДОМ ПРЕПЯТСТВИЙ

С.А. Белоконь, Ю.Н. Золотухин, К.Ю. Котов, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, М.А. Соболев, М.Н. Филиппов, А.П. Ян

Институт автоматики и электрометрии СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Коптюга 1, Россия
kotov@idisys.iae.nsk.su
тел: +7 (383) 333-26-25

Ключевые слова: *испытательный стенд, сервопривод, идентификация*

Abstract
This paper describes the method of trajectory control quadrocopter motion while avoiding obstacles. The results of modeling with quadrocopter AR. Drone control system confirm efficiency of the proposed algorithm.

Введение

При перемещении робота в заранее неизвестной или сложной среде осуществляется непрерывное планирование и построение траектории движения [1]. Удобным в этом случае является задание траектории опорными точками и дальнейшее представление траектории в параметрическом виде [2]. В случае необходимости соблюдения требований ограниченности производных по времени координат целевого положения или гладкости вырабатываемых управляющих воздействий используются различные методы интерполяции желаемой траектории, например, аппарат сплайнов [3].

В последнее десятилетие значительно возрос интерес к управлению компактными беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) мультироторных конфигураций, что объясняется простотой и гибкостью конструкции, надежностью и управляемостью таких аппаратов [4].

Данная работа посвящена траекторному управлению квадророторным БПЛА (далее квадрокоптером) с одновременным обходом препятствий. Для управления квадрокоптером мы используем разработанный нами и успешно примененный в ряде приложений метод организации вынужденного движения по желаемой траектории в пространстве состояний объекта [5],[6]. В данной работе представлен простой алгоритм перепланирования желаемой траектории при обходе препятствий. Алгоритм основан на широко используемом аппарате B-сплайнов [7], [8].

1 Описание объекта и алгоритма управления

В качестве объекта управления используется квадрокоптер AR.Drone, разработанный компанией Parrot (Франция) и построенный по классической четырехвинтовой схеме. Выбор этого устройства в качестве платформы для экспериментов обусловлен приемлемым соотношением цена – технические характеристики, а также полноценной программной поддержкой со стороны производителя и пользователей.

Аппарат AR.Drone обладает собственной многоконтурной системой управления, обеспечивающей движение аппарата с заданной "пилотом" ориентацией $\psi_{ref}, \phi_{ref}, \theta_{ref}$. Стабилизация по высоте выполняется посредством подачи команды на изменение вертикальной скорости $\dot{z}_{ref}$ [9]. Положение квадрокоптера в пространстве характеризуется координатами *x, y, z*

центра масс аппарата в неподвижной декартовой системе координат и тремя углами поворота вокруг осей связанной системы координат.

По причине того, что управление $\dot{z}_{ref}$ по высоте аппарата всегда направлено вдоль оси *z*, движение аппарата может быть рассмотрено в виде проекции траектории движения на плоскость *(x,y)*[9]. Упрощенные уравнения динамики, описывающие движение квадрокоптера в координатах *(x,y)* имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = c_1 \cdot (\cos\psi \cdot \sin\phi \cdot \cos\theta - \sin\psi \cdot \sin\theta) - c_2 \cdot \dot{x}; \\ \ddot{y} = c_1 \cdot (\sin\psi \cdot \sin\phi \cdot \cos\theta - \cos\psi \cdot \sin\theta) - c_2 \cdot \dot{y}. \end{cases}$$

Здесь c_1, c_2 – постоянные коэффициенты, определенные экспериментально. Точками над знаками переменных обозначаются производные по времени.

В работе [10] предложена методика определения управляющих параметров и углов ориентации аппарата ψ_{ref}, ϕ_{ref}, θ_{ref}, гарантирующих движение квадрокоптера по траектории, определяемой уравнением:

$$l(x(t) - x_0(t), y(t) - y_0(t)) = 0$$

со скоростью

$$v = [\dot{x}, \dot{y}] = v_{ref}(x, y) = [\dot{x}_{ref}, \dot{y}_{ref}].$$

Здесь функция *l* определяет величину отклонения аппарата от целевого положения $(x_0(t), y_0(t))$.

Для параметрического и гладкого представления траектории используется алгоритм сглаживания N-мерной пространственной кривой однородными B-сплайнами [11]. Следует отметить, что данный алгоритм позволяет использовать сплайны со степенью выше 3, что обеспечивает гладкость первой и второй производных. По причине отсутствия возможности задания извне для данного алгоритма граничных условий на значения производных, необходимо дополнительно управление скоростью объекта. Для этого воспользуемся параметризацией полученной траектории по времени:

$$x_0(\gamma(t)) = X(\gamma(t)); \; y_0(\gamma(t)) = Y(\gamma(t)).$$

Здесь $\gamma(t)$ – некоторый параметр. С учетом (4) запишем

$$|v_0| = \sqrt{\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2} = \dot{\gamma}\sqrt{X_\gamma^2 + Y_\gamma^2},$$

где X_γ, Y_γ соответствующие частные производные.

Закон управления, предложенный в [12], определяет динамику параметризованного целевого положения $(x_0(\gamma(t)), y_0(\gamma(t)))$ следующим образом:

$$\dot{\gamma} = \frac{v_{not} \exp(-\alpha p)}{\sqrt{X_\gamma^2 + Y_\gamma^2}},$$

где $v_{not} > 0$ – предписанная скорость движения целевой точки, $p = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$, $\alpha > 0$.

2 Алгоритм обхода препятствий

Будем полагать, что мобильный робот оборудован системой получения дальнометрической информации, позволяющей обнаруживать специальные ориентиры на местности. Такие системы могут быть представлены ультразвуковыми датчиками, 2D и 3D лазерными сканерами, а также видеокамерами. Для выделения элементов местности будем использовать геометрические примитивы – линии и применим алгоритм RANSAC [13].

Для возможности моделирования задачи обнаружения препятствия разработан программный модуль, имитирующий работу лазерного сканера в 2D плоскости. Положение ска-

нера определялось положением модели (1), имитирующей движение реального робота согласно алгоритму управления, изложенному в работе [14].

После обнаружения пересечения предписанной траектории **AB** движения с препятствием, выполнялось добавление новых опорных точек и перестроение сплайна. Добавление опорной точки **C** может выполняться согласно правилу обхода видимого препятствия с одной стороны относительно направления движения робота, например правой, при этом опорная точка может быть выбрана как точка касания окружности заданного радиуса с центром на правом краю препятствия и линии проведенной из текущего положения робота (точка **A)**, рисунок 1.

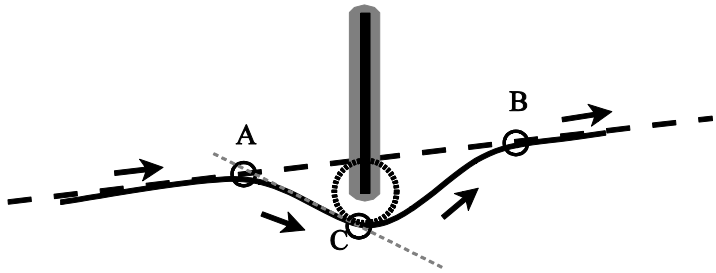


Рисунок 1 – Движение робота по предписанной траектории с обходом препятствий с использованием метода B-сплайнов

Несмотря на то, что такой обход препятствия может привести к неоптимальному, с точки зрения длины пройденного пути, обходу, это гарантирует отсутствие зацикливания алгоритма перестроения маршрута на препятствиях сложной формы.

3 Экспериментальные результаты

На рисунке 2 представлены результаты моделирования. Рассматривается движение объекта вдоль спланированной траектории, построенной по фиксированному набору опорных точек. Данный набор точек, может быть получен с помощью одного из известных методов планирования пути. Спланированный путь (пунктирная кривая) проходит через стационарные препятствия различной формы. Обнаружение и построение формы препятствия осуществляется с использованием лазерного сканера. Угловое разрешение сканера составляет 0.5° и на каждом шаге квантования сканируется сектор равный 180°. При приближении объекта к препятствию выполняется деформация ранее построенного пути (сплошная кривая) с помощью предложенного метода. Траектория пройденного пути роботом обозначена штрих-пунктирной кривой. Введенное дополнительное управление скоростью объекта обеспечивает точное отслеживание желаемой траектории даже при существенной деформации ранее спланированного пути.

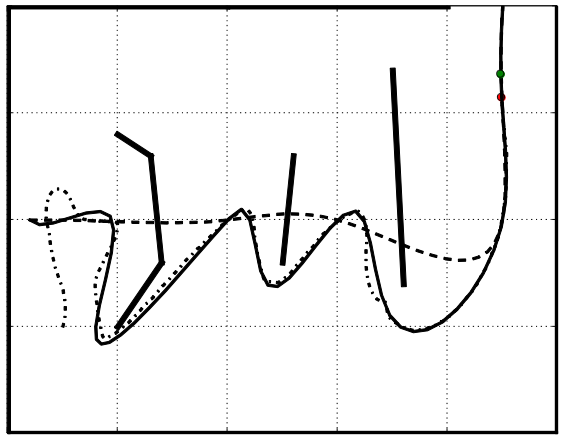


Рисунок 2 – Перепланирование маршрута движения робота при обходе препятствий

Заключение

В данной работе представлен метод перепланирования предписанной траектории при обходе препятствий с использованием аппарата B-сплайнов. Данный подход использован совместно с ранее предложенным методом управления квадрокоптером, предназначенным для реализации движения по заданной траектории с заданной скоростью. Результаты моделирования показывают эффективность алгоритма перестроения маршрута на препятствиях сложной формы.

Список литературы

[1] Brock Oliver, Khatib Oussama. Real-time replanning in high-dimensional configuration spaces using sets of homotopic paths // ICRA. – IEEE, 2000. – Pp. 550-555.

[2] S. Thrun, M. Montemerlo, H. Dahlkamp, D. Stavens, A. Aron, J. Diebel, P. Fong, J. Gale, M. Halpenny, G. Hoffmann, K. Lau, C. Oakley, M. Palatucci, V. Pratt, P. Stang, S. Strohband, C. Dupond, L.-E. Jendrossek, C. Koelen, C. Markey, C. Rummel, J. van Niekerk, E. Jensen, P. Alessandrini, G. Bradski, B. Davies, S. Ettinger, A. Kaehler, A. Nefian, P. Mahoney. Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge.// Journall of Field Robotics. 01/2006, 23. Pp. 661-692.

[3] J. Connors, G. Elkaim. Analysis of a Spline Based, Obstacle Avoiding Path Planning Algorithm. // IEEE Vehicle Technology Conference, IEEE VTC 2007, Dublin, Ireland, Apr. 22-25, 2007. Pp. 2565-2569.

[4] Mellinger D., Kumar V. Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors // Proc. Of the IEEE Intern. Conference on Robotics and Automation (ICRA). – Shanghai, China: IEEE, May 9-13, 2011. Pp. 2520-2525.

[5] С.А. Белоконь, Ю.Н. Золотухин, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, М.Н. Филиппов, А.П. Ян. Управление параметрами полета квадрокоптера при движении по заданной траектории // Автометрия, 2012, 5. С. 32-41.

[6] С.А. Белоконь, Ю.Н. Золотухин, К.Ю. Котов, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, В.Я. Пивкин, М.А. Соболев, М.Н. Филиппов, А.П. Ян. Использование фильтра Калмана в системе управления траекторным движением квадрокоптера // Автометрия, 2013, 6. С. 14-24.

[7] J. Connors, G. Elkaim. Manipulating B-Spline Based Paths for Obstacle Avoidance in Autonomous Ground Vehicles // Proceedings of the 2007 National Technical Meeting of The Institute of Navigation. San Diego, CA, January 2007. Pp. 1081-1088.

[8] Р.Ф. Гилимьянов, Л.Б. Рапопорт. Метод деформации пути в задачах планирования движения роботов при наличии препятствий // Проблемы управления. 2012. № 1. С. 70-76.
[9] J. Engel, J. Sturm, D. Cremers. Accurate figure flying with a quadrocopter using onboard visual and intertial sensing // Proc. Of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/RJS Inern. Conference on Intelligent Robot Systems (IROS). Vilamoura, Algarve, Portugal, oct. 11, 2012. Pp. 43-48.
[10] С.А. Белоконь, Ю.Н. Золотухин, К.Ю. Котов, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, М.А. Соболев, М.Н. Филиппов, А.П. Ян. Управление полетом квадрокоптера при параметрическом задании траектории движения // Материалы XII Всероссийское совещание по проблемам управления. Россия, Москва, ИПУ РАН, 16-19 июня 2014 г. (в печати).
[11] P. Dierckx. Algorithms for smoothing data with periodic and parametric splines // Computer Graphics and Image Processing, 20 (1982). Pp. 171-184.
[12] M. Egerstedt, X. Hu, A. Stotsky. Control of mobile platforms using a virtual vehicle approach // IEEE Transactions on Automatic Control. 2001, Vol. 46, no. 11. Pp. 1777-1782.
[13] Fischler M, Bolles R. Random sample consensus: A paradigm for model fitting application to image analysis and automated cartography // Communications of the ACM, 1981, 24(6). Pp. 381-395.
[14] К.Ю. Котов, А.С. Мальцев, М.А. Соболев. Метод решения задачи одновременной локализации и построения карты при движении автономного мобильного робота // Труды и пленарные доклады участников конференции УКИ'12 / Научное издание. Электрон. текстовые дан. - М.:ИПУ РАН, 2012 - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) - ISBN 978-5-91450-100-3 - С. 1281-1287.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МУЛЬТИПАРАМЕРИСКОЙ МОДУЛЯЦИИ

А.В. Волынская[1], И.В. Сапожников[2]

[1]Уральский государственный университет путей сообщения
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, Россия
Anna-Volinskaya@mail.ru
тел. +7(922) 205-95-92
[2]Уральский технический институт связи и информатики
620109, Екатеринбург, ул. Репина, 15, Россия

Ключевые слова: *модуляция, шумоподобное несущее колебание, свертка, моделирование*

Abstract

Results of computer modeling of multiparametrical modulation of difficult noise fluctuation by its convolution with a modulating signal are given. Thus each value of a signal at the exit of the modulator contains information on all modulating a signal. Such signal possesses high noise stability.

Информативность сигналов, переносящих сообщения и количественно определяемая энтропией, тем больше, чем сложнее сигнал [1]. Сложность сигнала, в свою очередь, определяется его базой

$B = 2FT$,

где F – ширина спектра сигнала; T – длительность сигнала.

Сложные шумоподобные сигналы также лучше противостоят помехам [2]. В классических видах модуляции в качестве несущего сигнала применяется простое гармоническое колебание ($B \approx 1$).

Ранее предлагались варианты использования шумоподобной несущей с модуляцией какого либо одного ее параметра, например амплитуды (точнее, дисперсии) или средней частоты [3].

В работах [4, 5, 6] показаны преимущества мультипараметрической модуляции шумоподобной несущей, когда каждое отсчетное значение несущего колебания содержит информацию обо всем достаточно длинном отрезке передаваемого сообщения. Для этого надо провести свертку (convolution) сигналов. На рисунке 1 приведена функциональная схема устройства, реализующего эту процедуру. Управляющий сигнал $s(t)$ разбивается на фрагменты длительностью Ts, которые записываются в регистр. Несущее колебание $y(t)$ представляет собой шумоподобное псевдослучайное колебание с периодом T. Форму этого колебания можно выбирать произвольно, исходя из тех или иных требований, диктуемых конкретным физическим каналом связи, прежде всего, помехами. Единственное ограничение, накладываемое на $y(t)$, это соблюдение неравенства

$2FT \geq 2FsTs,$

где F и Fs – ширина спектра $y(t)$ и $s(t)$ соответственно.

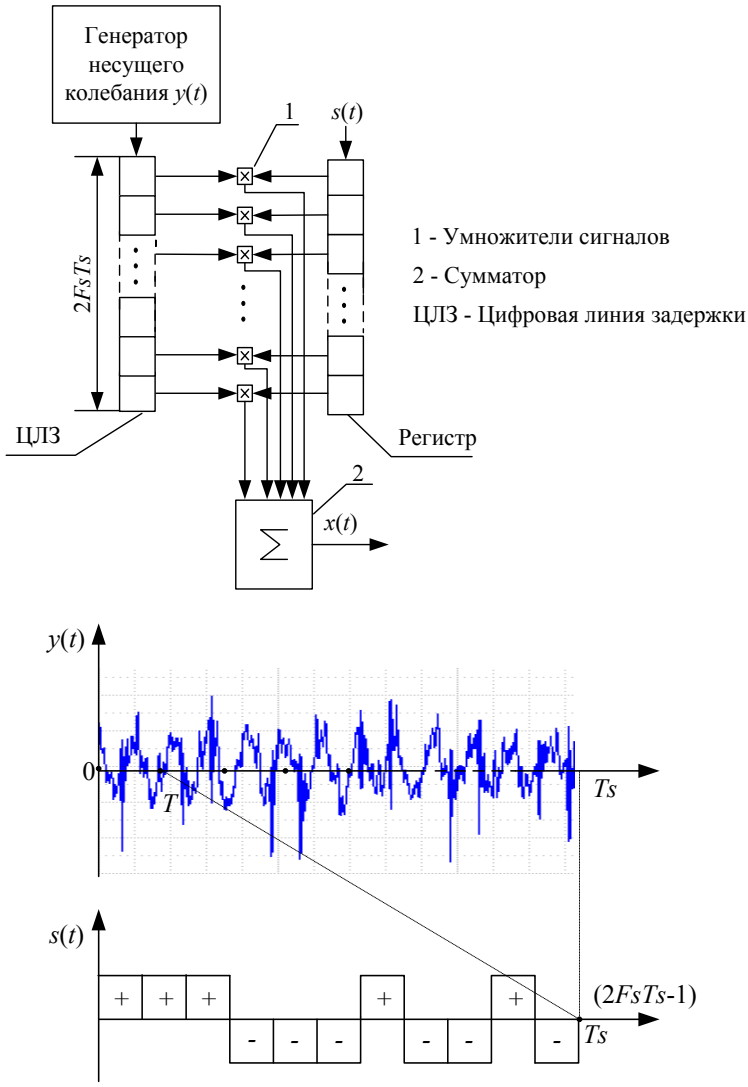


Рисунок 1 – К пояснению процесса мультипараметрической модуляции

Для демодуляции следует сформировать шумоподобное колебание, полученное из несущего путем конвертирования матриц, и произвести его свертку с входным сигналом, т.е. развертку (deconvolution) с помощью схемы, содержащей сканирующий коммутатор [7], как показано на рисунке 2.

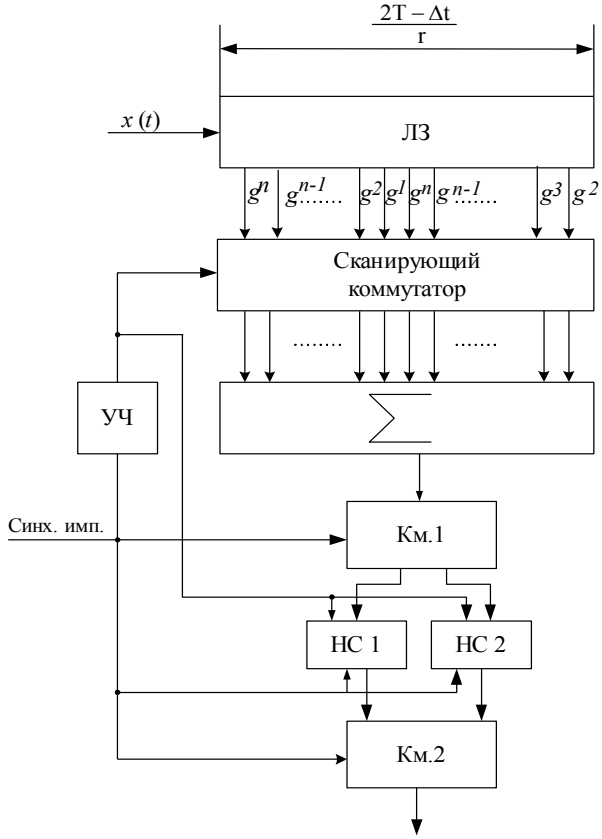


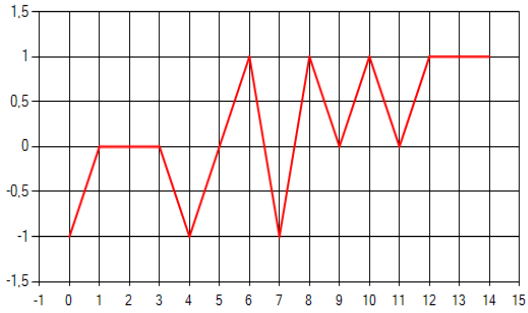
Рисунок 2 – Демодулятор мультипараметрического модема со сканирующим коммутатором

Высокая помехоустойчивость алгоритма мультипараметрической модуляции обеспечивается тем, что:

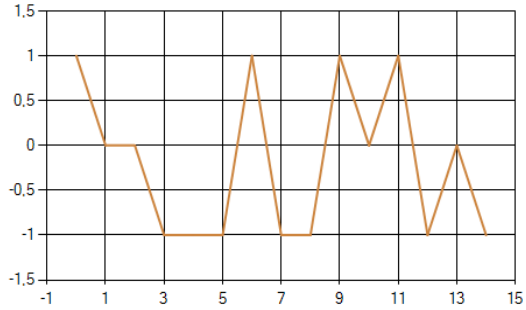
- каждое отсчетное значение сигнала в канале – есть результат линейного взаимодействия всех отсчетных значений несущего колебания со всеми отсчетными значениями фрагмента передаваемого сообщения;
- спектр сигнала в канале может быть адаптирован к спектру помех;
- алгоритм позволяет реализовать адаптивное накопление полезного сигнала, устойчивое к аномально большим помехам.

Для проверки корректности процедур мультипараметрической модуляции-демодуляции проведено компьютерное моделирование. Его результаты представлены на рисунках 3-4.

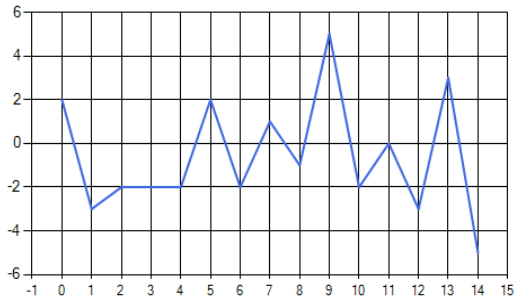
Видно, что демодулированный сигнал точно совпадает с модулирующим, что подтверждает корректность процедуры мультипараметрической модуляции.



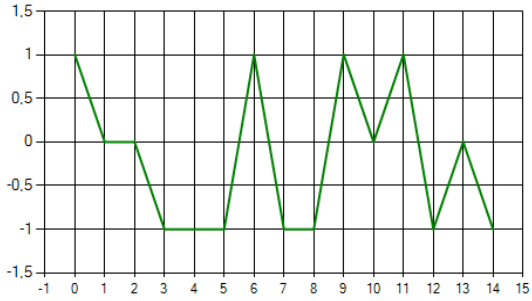
а)



б)



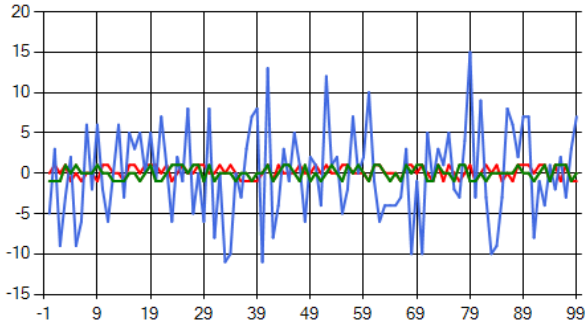
в)



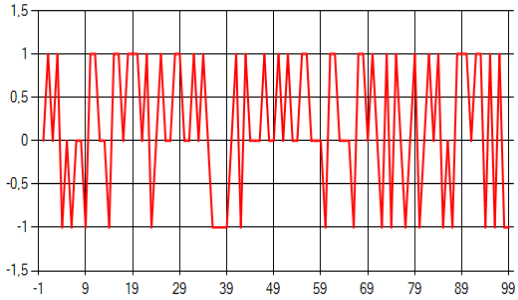
г)

а) $y(t)$ – несущее колебание; б) $s(t)$ – модулирующий сигнал (сообщение);
в) $x(t)$ – сигнал в канале; г) $s'(t)$ – сигнал после демодуляции

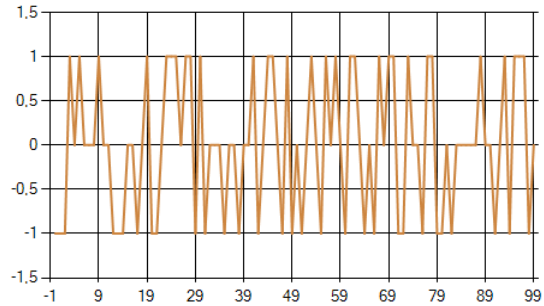
Рисунок 3 – Сигналы с базой $B = 15$



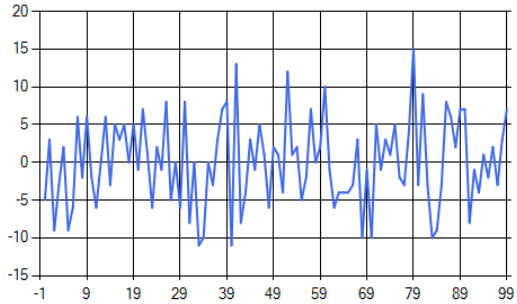
а)



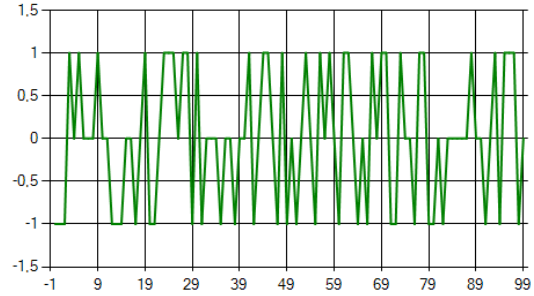
б)



в)



г)

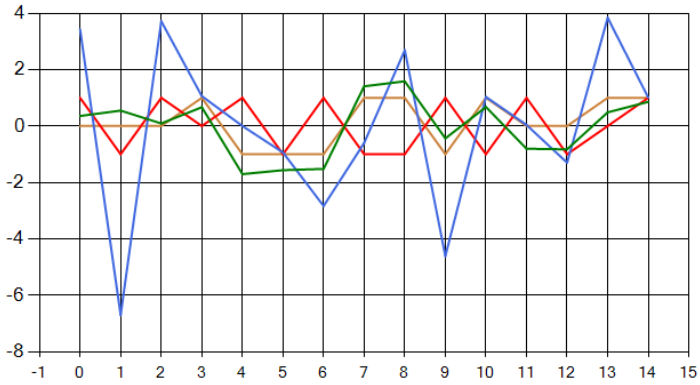


д)

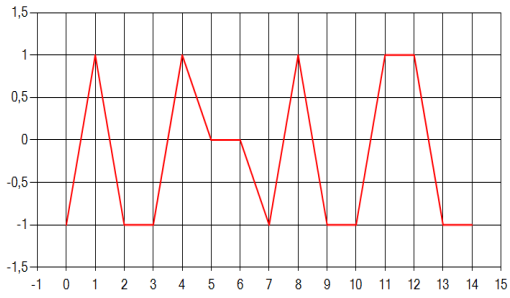
а) все сигналы; б) $y(t)$ – несущее колебание;
в) $s(t)$ – модулирующий сигнал (сообщение);
г) $x(t)$ – сигнал в канале; д) $s'(t)$ – сигнал после демодуляции

Рисунок 4 – Сигналы с базой $B = 100$

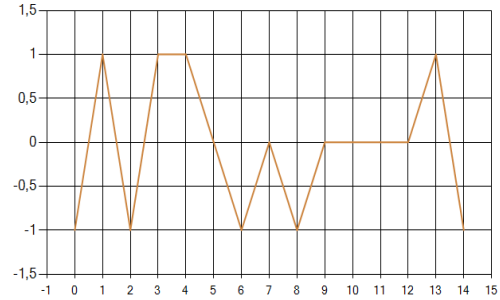
На следующих рисунках представлены результаты оценки помехоустойчивости мультипараметрической модуляции. Для этого к сигналу $x(t)$ в канале прибавлялась белая гауссова помеха. Сравнение сигналов до модуляции и после демодуляции на данном этапе исследований проведено визуально.



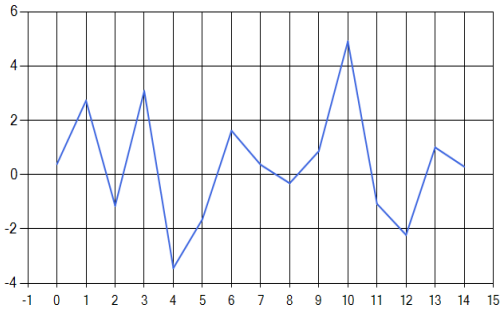
а)



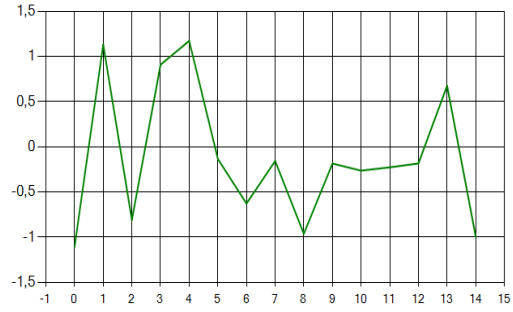
б)



в)



г)

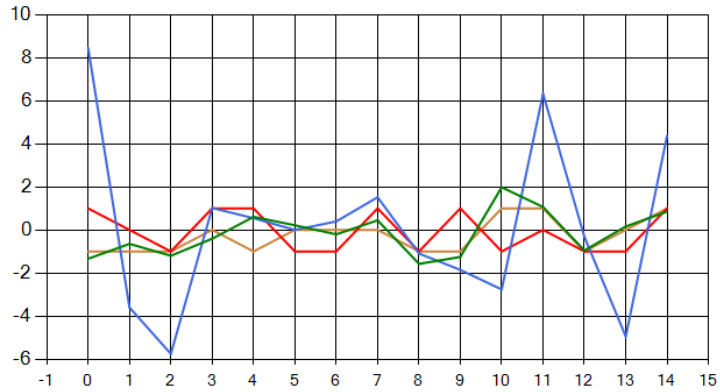


д)

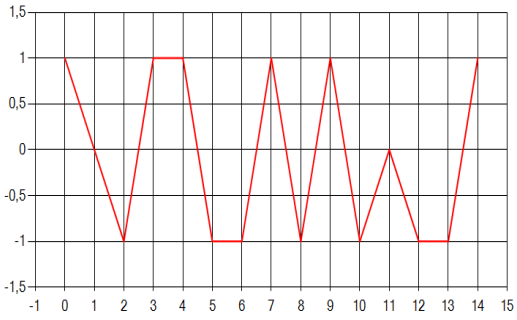
а) все сигналы; б) $y(t)$ – несущее колебание;
в) $s(t)$ – модулирующий сигнал (сообщение);
г) $x(t)$ – сигнал в канале; д) $s'(t)$ – сигнал после демодуляции

Рисунок 5 – Сигналы с базой $B = 15$; отношение сигнал/помеха = 1

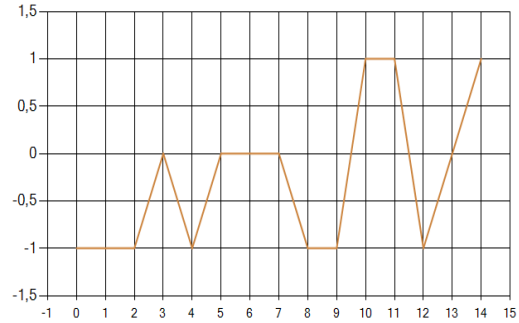
Видим, что даже при простых сигналах и отношении сигнал/помеха = 1, полученный сигнал почти не отличается от переданного.



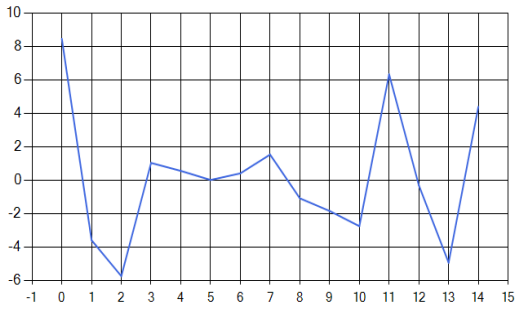
а)



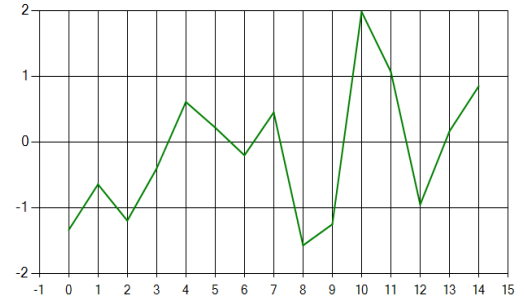
б)



в)



г)



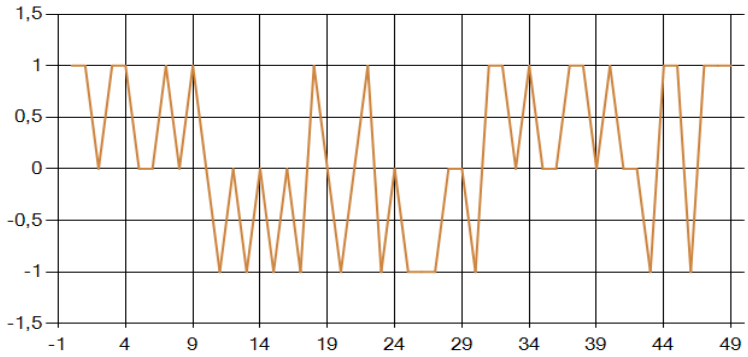
д)

а) все сигналы; б) $y(t)$ – несущее колебание;
в) $s(t)$ – модулирующий сигнал (сообщение);
г) $x(t)$ – сигнал в канале; д) $s'(t)$ – сигнал после демодуляции

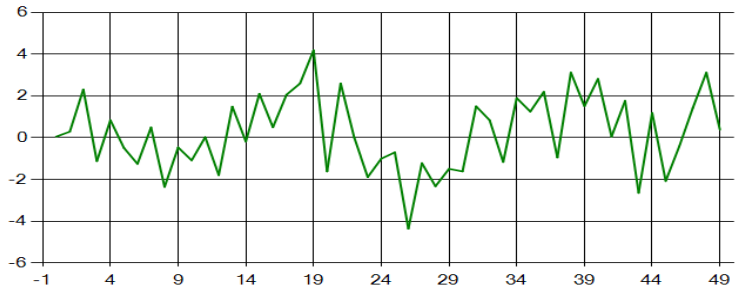
Рисунок 6 – Сигналы с базой $B = 15$; отношение сигнал/помеха = 1/3

При отношении сигнал/помеха = 1/3 искажения принятого сигнала – существенные.

Из теории известно, что чем сложнее сигнал, тем он боле помехоустойчив. На следующих рисунках представлены результаты оценки помехоустойчивости мультипараметрической модуляции для сигналов с базой 50 (рисунок 7) и с базой 300 (рисунок 8).



а)

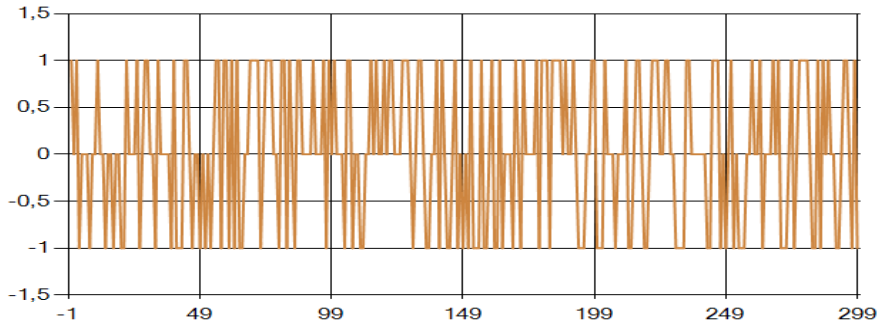


б)

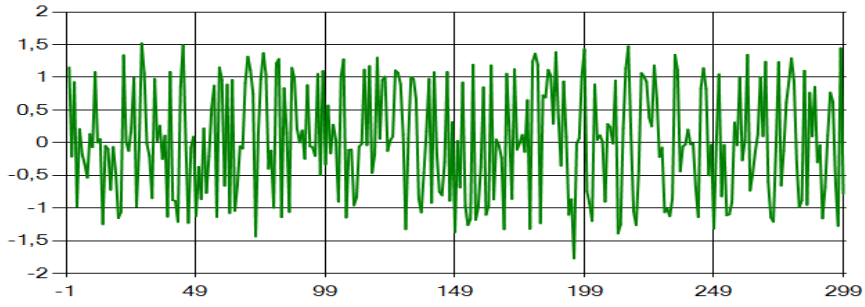
а) $s(t)$ – модулирующий сигнал (сообщение); б) $s^{/}(t)$ – сигнал после демодуляции

Рисунок 7 – Сигналы с базой $B = 50$; отношение сигнал/помеха = 1/3

Видим, что несмотря на существенные искажения, сигналы в целом похожи, и их корреляционный анализ позволит надежно идентифицировать принятый сигнал.



а)



б)

а) $s(t)$ – модулирующий сигнал (сообщение); б) $s^{/}(t)$ – сигнал после демодуляции

Рисунок 8 – Сигналы с базой B = 300; отношение сигнал/помеха = 1/3

Для сигнала с базой 300 сходство еще более сильное, при этом абсолютное отклонение не превышает 50 %.

В дальнейшем будет выполнен корреляционный анализ сигналов до модуляции и после демодуляции. Предположительно, значения коэффициентов корреляции составят не меньше 0,9.

Список литературы

[1] Голдман С. Теория информации. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1957. – С. 99.

[2] Тузов Г.И. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 256 с.

[3] Харкевич А.А. Теория информации. Опознание образов. – М.: Наука, 1973. – Т. 3. – С. 489-494.

[4] Волынская А.В., Сергеев Б.С. Оценка помехоустойчивости линейного модема для каналов передачи сигналов систем автоматики и телемеханики // Безопасность движения поездов: Материалы XI науч.-практ. конф. – М.: МГУПС, 2010. – С. 131-135.

[5] Волынская А.В., Сергеев Б.С. Предпосылки применения псевдослучайных сигналов-переносчиков в каналах телемеханики железнодорожного транспорта // Транспорт: наука, техника, управление : Научный информационный сборник РАН ВИНИТИ, 2011. – Вып. 6. – С. 39-41.

[6] Волынская А.В. Исследование способов адаптации сигналов к помехам в интеллектуальном канале телемеханики железнодорожного транспорта // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : Труды XV Международной конф. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. – С. 577-581.

[7] Волынская А.В. Интеллектуальный канал телемеханики // Транспорт: наука, техника, управление : Научный информационный сборник РАН ВИНИТИ, 2013. – Вып. 4. – С. 13-16.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА, ПИТАЕМОГО ОТ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

С.С. Воротницкий

Белорусский национальный технический университет
220013, г.Минск, пр-т Независимости, 65, Республика Беларусь
vectr20@tut.by
тел: +375-33-636-45-11

Ключевые слова: *электромобиль, электробус, электропривод, аккумуляторные батареи, рекуперативное торможение, моделирование*

Abstract
The article reviews the electric system of the passenger vehicle and analyzes using a three-phase induction motor with inverter powered by a battery, which can be used in electric vehicles. Simulation model and transient characteristics are presented here.

Введение

Многие производители по всему миру вкладывают значительные средства в разработку электромобилей, чему способствует неуклонный рост цен на нефтепродукты, необходимость снижения вредных выбросов от автомобиля, а также разработки устройств хранения энергии, технологий энергопотребления. Под термином «электрический автомобиль» или «электромобиль» понимается транспортное средство, которое приводится в движение одним или несколькими электрическими двигателями. При этом питание электромотора может осуществляться от аккумуляторной батареи, солнечной батареи или топливных элементов. Наибольшее распространение получила конструкция электромобиля с питанием от аккумуляторной батареи. Аккумуляторная батарея требует регулярной зарядки, которая может осуществляться от внешних источников тока, путем рекуперации энергии торможения, а также от генератора на борту электромобиля.

Для лучшего представления, будет приведена кинематическая схема электрического транспортного средства.

В качестве транспортного средства будет рассмотрен электробус - альтернатива имеющемуся ныне автобусу. Разработка данного вида транспорта актуальна в настоящее время.

1 Анализ технологической установки

Электробус имеет ряд преимуществ над автобусом, которые помогают решить проблемы нехватки и дороговизны топлива.

Достоинства электробуса:

- отсутствие вредных выхлопов;
- простота конструкции (в том числе и электродвигателя) и управления, высокая надёжность и долговечность в сравнении с обычным автобусом;
- возможность подзарядки от электрической сети в ночное время решило бы проблему «энергетического пика», т.е. проблему производства электроэнергии, которая не находит своего применения;
- электродвигатели имеют более высокий коэффициент полезного действия нежели двигатель внутреннего сгорания;

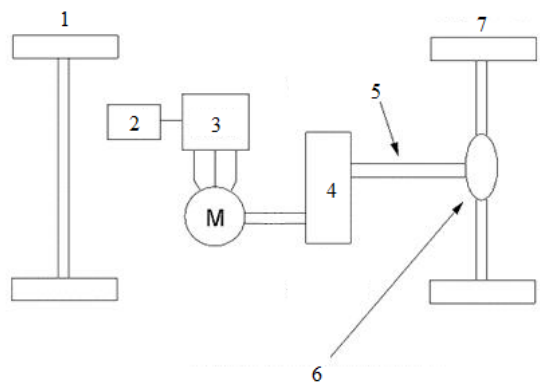
- намного меньшее количество шума за счёт меньшего количества движимых частей;
- высокая плавность хода с широким интервалом изменения частоты вращения двигателя;
- возможность подзарядки источников энергии во время рекуперативного торможения двигателем, что позволит свести к минимуму использование тормозных колодок.
- Электробус так же, как и любое устройство, имеет недостатки:
- имеющиеся высокоэнергоёмкие аккумуляторы либо слишком дороги из-за применения драгоценных или дорогостоящих металлов (серебро, литий), либо работают при слишком высоких температурах (рабочая температура натрий-серного аккумулятора >300 °С);
- аккумуляторы хорошо работают при движении электромобиля на постоянных скоростях и при плавных разгонах, при резких стартах тяговые батареи теряют много энергии; для увеличения пробега электромобиля необходимы специальные стартовые системы, например, на конденсаторах, а также применение систем рекуперации энергии (экономия до 25 %);
- часть энергии аккумуляторов тратится на охлаждение или обогрев салона автомобиля, а также питание прочих бортовых энергопотребителей (например, свет или воздушный компрессор);
- для массового применения электромобилей требуется создание соответствующей инфраструктуры для подзарядки аккумуляторов («автозарядные» станции); при массовом использовании электромобилей в момент их зарядки от бытовой сети возрастают перегрузки электрических сетей «последней мили», что чревато снижением качества энергоснабжения и риском локальных аварий сети.
- длительное время зарядки аккумуляторов по сравнению с заправкой топливом.

Таким образом, разработка данного вида транспорта является актуальной темой.

2 Составление функциональной схемы и математическое описание модели

Механическая часть электромеханической системы включает в себя все связанные движущиеся массы: двигатель, передаточное устройство и исполнительный механизм установки. К ротору двигателя при скорости ω приложен электромагнитный момент М, под действием которого механическая часть приводиться в движение и на рабочем органе установки совершается предусмотренная технологией механическая работа.

На рисунке 1 представлена кинематическая схема электробуса.

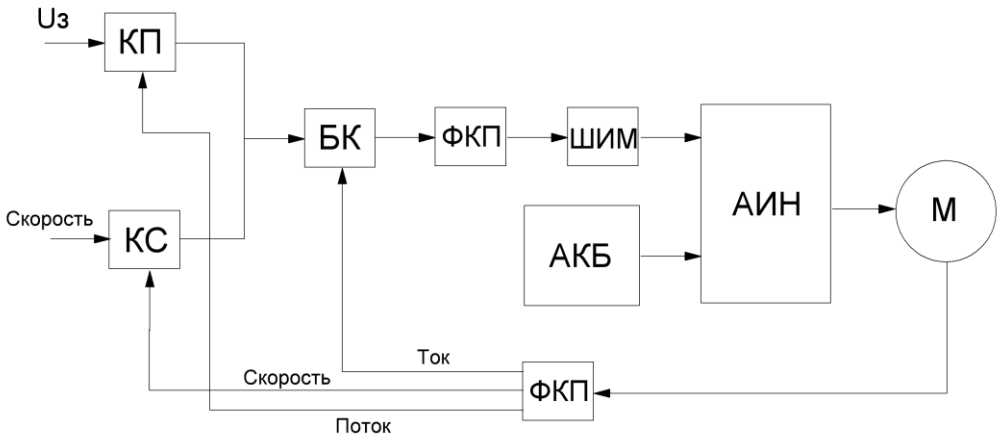


1-передняя ось, 2- аккумуляторы, 3- инвертор напряжения, 4- редуктор, 5- главная передача, 6- дифференциал, 7 – задняя ось.

Рисунок 1 – Кинематическая схема электробуса

Модель составим по принципу векторного управления тяговым асинхронным двигателем с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Это позволит нам приблизить полученные результаты к реальным, а также исследовать процессы, протекающие в электроприводе. Модель будет также включать в себя инвертор напряжения и литиевые аккумуляторные батареи. Это позволит нам проанализировать процесс рекуперации энергии и динамику транспортного средства.

Разработку модели начнем с её функциональной схемы, изображенной на рисунке 2, и составления математической модели.



КП – канал потока, КС – канал скорости, БК – блок компенсации, ФКП – фазные и координатные преобразования, ШИМ – генератор широтно-импульсной модуляции, АКБ - аккумуляторные батареи, АИН – автономный инвертор напряжения. М – асинхронный двигатель.

Рисунок 2 – Функциональная схема системы управления

При выборе мощности двигателя будем опираться на то, что он может быть установлен на пассажирский автобус МАЗ-203.

Суммарное напряжение используемых в модели батарей составит 550 В, которое будет получено из множества ячеек, номинальное напряжение каждой 3,7 В. Т.е. это порядка 149 ячеек батарей. Каждая ячейка имеет вес, равный пяти килограммам.

Несомненно, эти цифры впечатляют, но для автобуса такой выбор оправдан, т.к. здесь количество батарей будет также зависеть от энергопотребления электропривода. И приоритетом будет учет расстояния, пройденного электробусом на одном заряде батарей. В данной статье не ставится цель точного определения реального пробега автобуса, однако можно с уверенностью заявить, что с современными батареями, емкость которых может достигать 240Ач и более, электробус сможет преодолеть расстояние более, чем в 200 км на одном заряде[1, 2, 3].

Фазные и координатные преобразования выполняются в соответствии со следующими выражениями [4]:

- преобразование трёхфазной системы координат в двухфазную:

$$i_{1\alpha} = k_c \cdot \frac{3}{2} \cdot i_{1a},$$

$$i_{1\beta} = k_c \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (i_{1b} - i_{1c}),$$

$$k_c = \sqrt{\frac{2}{3}}.$$

- преобразование из неподвижной системы координат во вращающуюся систему координат:

$$i_{1x} = i_{1\alpha} \cdot \cos\varphi + i_{1\beta} \cdot \sin\varphi,$$

$$i_{1y} = -i_{1\alpha} \cdot \sin\varphi + i_{1\beta} \cdot \cos\varphi.$$

Обратные преобразования выполняются в соответствии с выражениями:
преобразователь координат (ПК2):

$$U_{1\alpha} = U_{1x}' \cdot \cos\varphi_0 - U_{1y}' \cdot \sin\varphi_0,$$

$$U_{1\beta} = U_{1x}' \cdot \sin\varphi_0 + U_{1y}' \cdot \cos\varphi_0.$$

преобразователь фаз (ПФ2):

$$U_{1a} = U_{1\alpha},$$

$$U_{1b} = -\frac{1}{2} \cdot U_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_{1\beta},$$

$$U_{1c} = -\frac{1}{2} \cdot U_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_{1\beta}.$$

Блок компенсации (БК) компенсирует перекрёстные обратные связи. Компенсирующее напряжение определяется из выражений:

$$U_{kx} = -\omega_0 \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot i_{1y},$$

$$U_{ky} = \omega_0 . (L_{1\sigma} \cdot i_{1x} + \Psi_{2x}).$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_{12}^2}{L_1 \cdot L_2}.$$

Для определения проекции вектора потокосцепления ротора Ψ_{2x} будем использовать выражение:

$$\Psi_{2x} = \frac{L_{12}}{T_2 p + 1} \cdot i_{1x}.$$

Синхронная электрическая угловая скорость определяется из выражения:

$$\omega_0 = \omega_2 \cdot p_n + \frac{L_{12} \cdot R_2'}{L_2} \cdot \frac{1}{\Psi_{2x}} i_{1y}.$$

Регуляторы потока, тока и скорости выполнены в виде ПИ-регуляторов.

3 Моделирование и анализ полученных характеристик

При моделировании был задан следующий цикл: разгон до номинальной скорости, движение на постоянной скорости, выбег (накат, движение при отпущенной педали газа), торможение и движение на пониженной скорости с последующим остановом.

На рисунке 3 представлена собранная модель регулируемого электропривода электробуса.

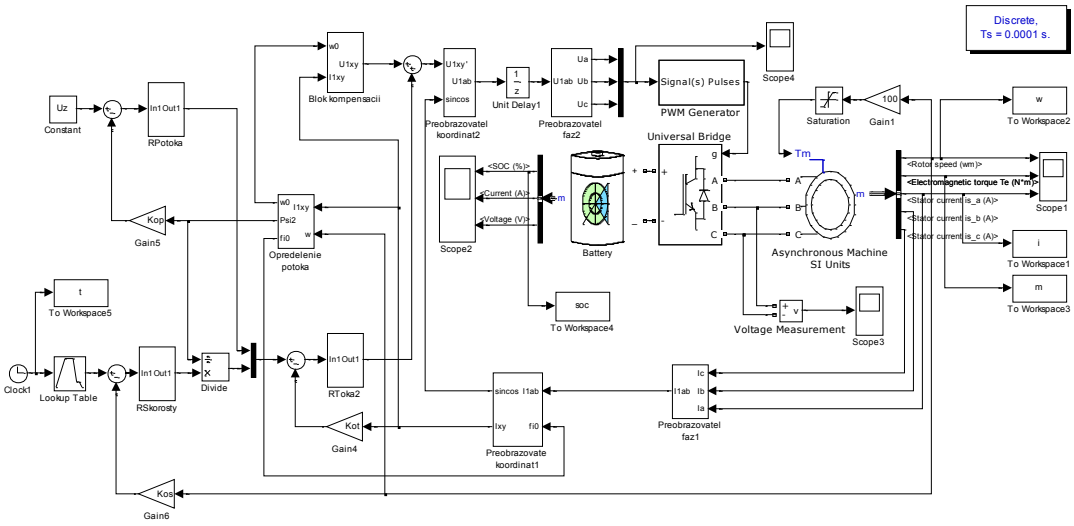


Рисунок 3 – Модель системы тягового электропривода в среде Matlab

Ниже приведены полученные графики на рисунках 4, 5, 6, 7.

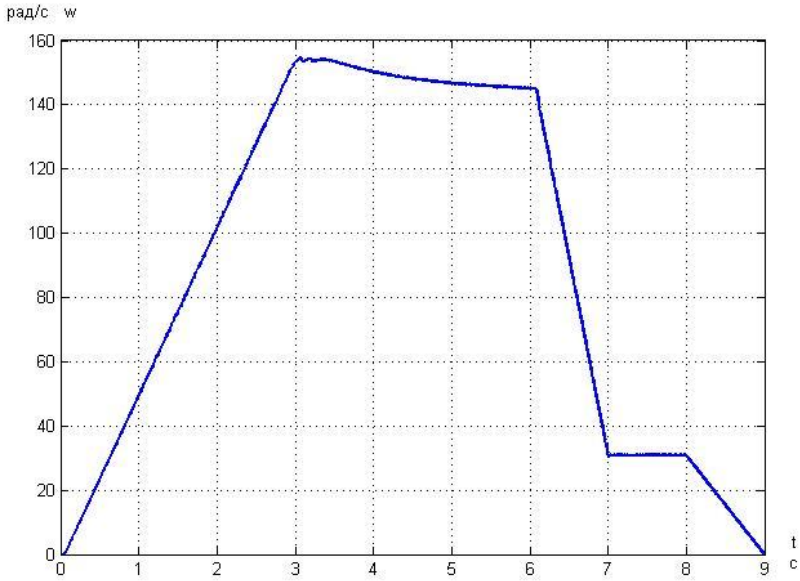


Рисунок 4 – График угловой скорости вала двигателя

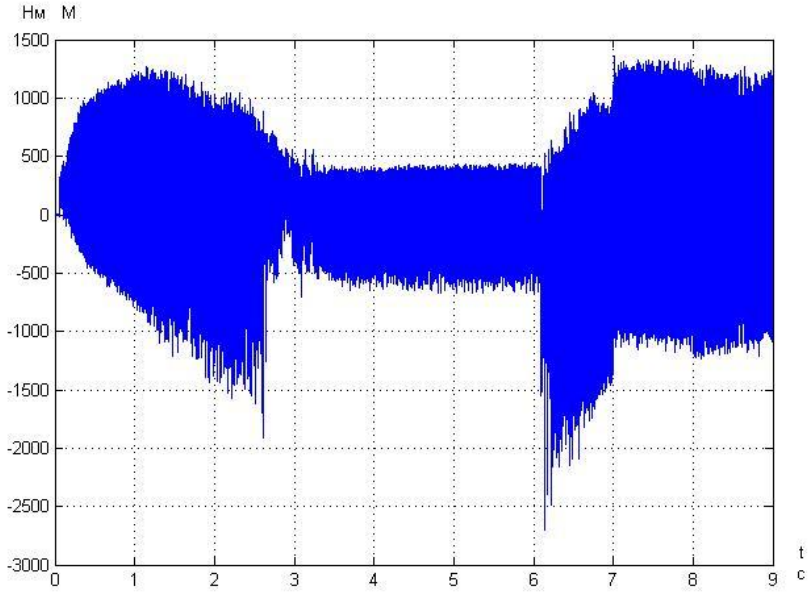


Рисунок 5 – График электромагнитного момента тягового двигателя

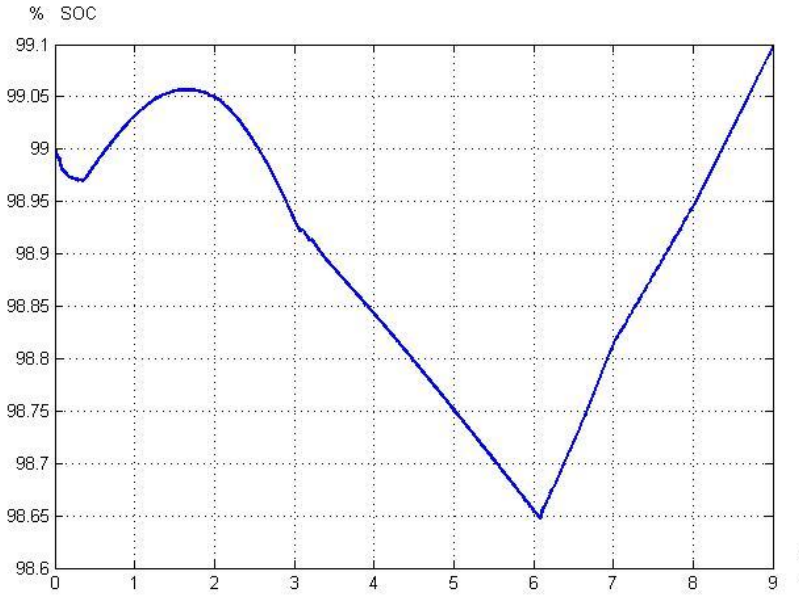


Рисунок 6 – График, отображающий заряд/разряд аккумуляторной батареи

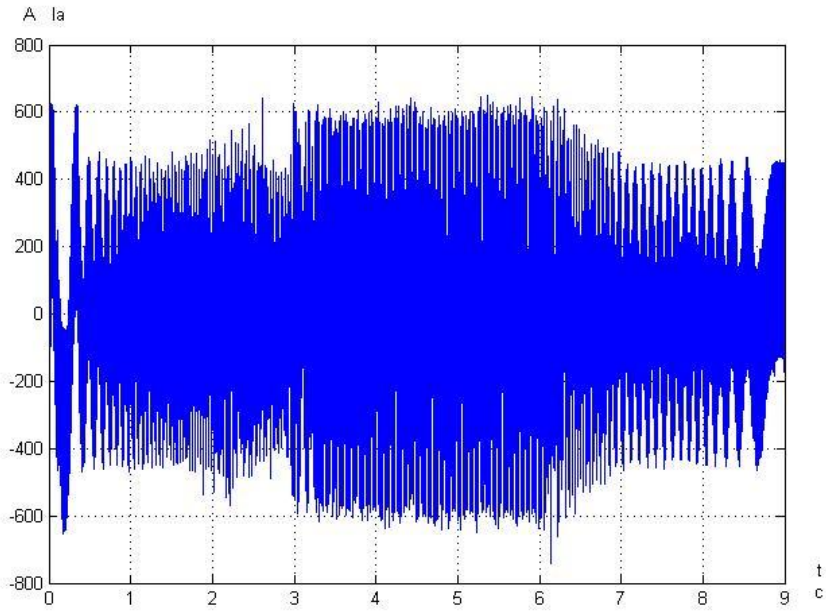


Рисунок 7 – График тока фазы А тягового двигателя

Напряжение батарей было принято 550В, мощность асинхронного короткозамкнутого двигателя 160кВт с синхронной частотой вращения 1500 об/мин. Статический момент был задан 80 Нм. Частота ШИМ 2кГц.

Полученные графики отображают динамику смоделированной системы. На графике скорости, видно, что при разгоне она нарастает плавно, без рывков и колебаний. Превышений по критическому моменту двигателя также не наблюдается. График аккумуляторной батареи, рисунок 6, демонстрирует нам разряд в начале движения до 6-ти секунд, когда происходит разгон и движение на номинальной скорости, а далее, в режимах выбега и торможения, происходит рекуперация энергии. Можно заметить, что на промежутке времени 7-8 секунд график также отображает заряд, не смотря на то, что в этот момент происходит движение на пониженной скорости. Это может быть связано с кратковременностью этого режима и низким энергопотреблением, а также с пульсациями тока, получаемыми в следствие использования ШИМ.

Заключение

Анализ состояния и перспектив развития электромобилей показал устойчивую тенденцию расширяющегося применения таких транспортных средств. Анализ результатов моделирования подтвердил целесообразность и возможность широкого применения электропривода в работе автобуса. Применение данного типа привода позволяет существенно снизить затраты на расход энергии автобуса в городском цикле, исключить выброс выхлопных газов в окружающую среду и снизить износ тормозных колодок, что приведет к увеличению срока их эксплуатации.

Список литературы

[1] C. M. Shepherd, "Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge," Journal of Electrochemical Society, Volume 112, Jul. 1965, pp. 657-664.

[2] Tremblay, O. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles. Vehicle Power and Propulsion Conference./ O. Tremblay; L.-A. Dessaint; A.-I. Dekkiche. - 2007. VPPC 2007. IEEE 9-12 Sept. 2007, pp. 284-289.

[3] Mohan, N. Power Electronics: Converters, Applications, and Design./ N. Mohan, T.M. Undeland and W.P. Robbins. - John Wiley & Sons. Inc., New York, 1995. Section 8.4.1.

[4] Фираго, Б.И. Учебно–методическое пособие к курсовому проектированию по теории электропривода для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»./ Б.И. Фираго. – Мн.: БНТУ, 2005.

МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ С ЧАСТИЧНО НЕИЗВЕСТНОЙ МОДЕЛЬЮ

В.А. Жмудь, А.Н. Заворин

ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»,
630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, д.20, Россия
oao_nips@bk.ru
тел: +7-961-875-1917

Ключевые слова: *численная оптимизация, энергосбережение, регуляторы, автоматика, моделирование, динамические системы, точность управления*

Abstract

Control of objects in the loop with negative feedback is widely used in science and technology. In this approach the main scientific task is the choice of the structure and calculation of parameters of the regulator. The regulator is designed based on a mathematical model of the object of control and controlling purposes by means of analytical or numerical method. The regulator thus should provide stability, accuracy and required quality of transient processes in the system (e.g. slight overshoot, absence of oscillations ect.) when the prescribed values of the output is changing. In some cases, the object model is known only within limited frequency band. Often the designer wants to save the resource of control (fuel, energy). The solution of this problem under these conditions can not be obtained analytically because of the high computational complexity. The paper proposes a modified method based on numerical optimization software for modeling using specially introduced optimality criteria and artificial truncation object model. Results are confirmed by simulation with optimization program VisSim. The efficiency of the method for saving objects containing integrator has been demonstrated. The robustness of this result is also shown, which consists in maintaining a satisfactory quality control when the parameters of the object within are changing a small range.

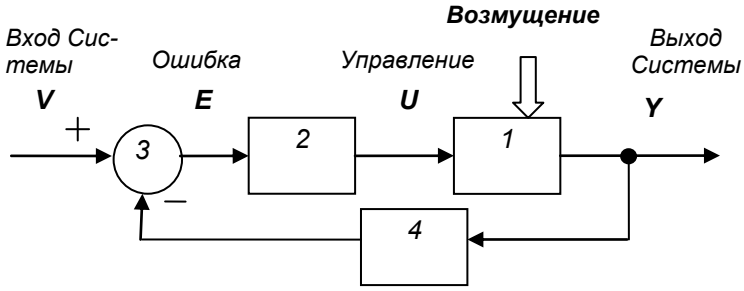
Введение

Управление объектами в контуре с отрицательной обратной связью широко и успешно применяется в науке и технике. При этом основной научной задачей проектирования является выбор структуры и расчет параметров регулятора. Регулятор проектируется на основе математической модели объекта управления и целей регулирования аналитическим или численным методом. Регулятор при этом должен обеспечить устойчивость, точность и требуемое качество переходного процесса в системе (малое перерегулирование, отсутствие колебаний) при изменении предписанных значений выходной величины. В ряде случаев модель регулятора известна лишь до некоторых ограниченных частот. Зачастую жизненно необходима экономия ресурса управления (топлива, энергии) [1–3]. Решение этой задачи в указанных условиях не может быть получено аналитически вследствие большой сложности вычислений. Предлагается модифицированный метод численной оптимизации на основе программ для моделирования с применением специально вводимых критериев оптимальности и искусственного усечения модели объекта.

1 Постановка задачи

Значительную часть систем автоматического управления можно представить в виде контура с единичной обратной связью, как показано на *рис*. 1 [1, 2]. Этот контур включает объект, регулятор и элемент сравнения.

Здесь выходная величина $Y(t)$ должна быть по возможности как можно более близка к заданию $V(t)$, ошибка управления $E(t)$ равна разности этих величин; регулятор преобразует эту ошибку $E(t)$ в управляющий сигнал $U(t)$, который, воздействует на вход объекта для того, чтобы его выходная величина сравнялась с заданием. В итоге регулятор при работе в контуре с образной связью снижает ошибку $E(t)$ до нуля.



1 – объект, 2 – регулятор, 3 – элемент сравнения (вычитатель сигналов), 4 – датчик (измеритель выходного сигнала объекта)

Рисунок 1 – Структурная схема простейшей системы с отрицательной обратной связью

Численные методы оптимизации работают следующим образом. Методами идентификации осуществляются эксперименты с объектом управления, результаты обрабатываются для отыскания наиболее адекватной математической модели этого объекта. Далее моделируется система, то есть рассчитываются переходные процессы методом численного моделирования (симуляции). В этой системе используется модель объекта, а также модели всех остальных элементов системы, показанной на рис. 1, а также имеется блок формирования тестовых входных воздействий и (или) возмущений, блок оценивания стоимостной функции и блок оптимизации параметров регулятора.

Отличия одних методов численной оптимизации от других кроются в используемой программном средстве, в математическом выражении стоимостной функции, в выборе метода оптимизации и в выборе тестовых воздействий. Также отличия могут иметь место в выборе структуры регулятора и в использовании специфических приемов для повышения эффективности процедуры численной оптимизации.

В предлагаемой постановке задачи имеются следующие основные особенности:

1) Следует обеспечить экономию ресурса управления, который можно оценить как интеграл от квадрата управляющего воздействия на объект.
2) Могут быть сформулированы различные цели управления, отличающиеся от традиционных, например, достижения требуемых малых величины ошибки (и, возможно, ее производной) по прошествии требуемого времени после ступенчатого изменения задания или возмущающего воздействия.
3) При идентификации объекта управления могут быть допущены существенные погрешности в определении высокочастотной части его модели.

Сформулированные особенности глубоко обоснованы. Действительно, примером, когда управляющее воздействие сопряжено с затратами энергии, является задача корректировки орбиты космического аппарата. Примером достижения требуемых предписанных параметров движения также может служить переход космического аппарата с одной орбиты на другую: в этом случае сама траектория не имеет значения, при условии, что по истечении некоторого

предписанного времени космический аппарат будет с заданной погрешностью находиться на предписанной точке новой траектории и будет при этом двигаться с предписанной скоростью.

Обоснованность предположения, что высокочастотная часть модели объекта определена недостаточно точно, вытекает из того факта, что, как правило, передаточная функция объекта, начиная с некоторых относительно высоких частот, начинает снижаться, и со временем ее значение составляет малую долю от ее значений в области средних частот. Поэтому отличия этой части несущественно влияют на вид переходного процесса. В итоге относительная точность определения частотной характеристики в этой области невысока. Однако при работе контура с отрицательной обратной связью вклад вида этой части характеристики может оказаться высоким, поскольку за счет действия регулятора в этой области частот усиление повышается.

2 Предлагаемые принципы решения задачи

С целью решения поставленной задачи предлагается использование следующих принципов для создания методики проектирования энергосберегающих регуляторов:

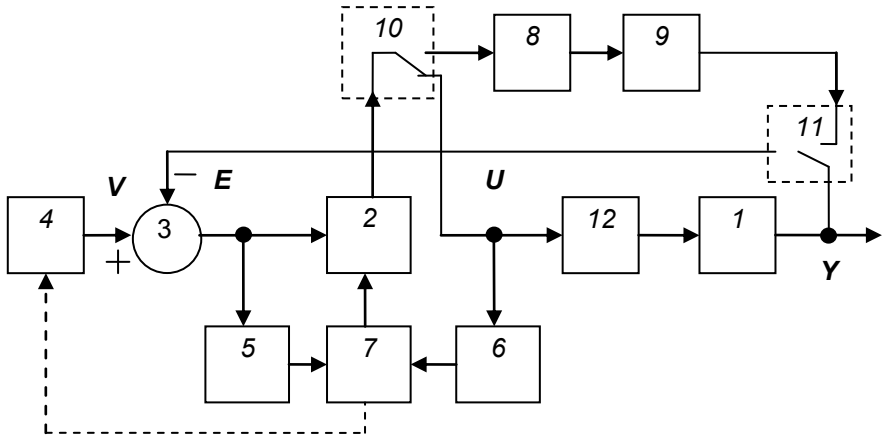
- С целью обеспечения экономии энергии управления предлагается в стоимостную (целевую) функцию внести с весовым коэффициентом член, равный интегралу от квадрата сигнала управления, прикладываемого к объекту. Это развивает концепцию, при которой нами ранее рекомендовалась целевая функция в виде интеграла от модуля ошибки, умноженного на время с начала моделирования, к которой можно добавлять члены, корректирующие или уточняющие цель оптимизации, или запрещающие какие-либо особенности переходного процесса [3].
- Если вид и качество переходного процесса не является критичным, основное ядро стоимостной функции следует заменить. Например, можно исключить интеграл от модуля ошибки, умноженного на время, а вместо этого ввести член, который принимает большое положительное значение, если цель регулирования не достигнута, и принимает малое положительное или нулевое значение, если эта цель достигнута. Это существенно отличается от ранее предложенной концепции [3].
- С целью обеспечения работоспособности метода в структуру модели объекта можно ввести звено запаздывания. В этом звене запаздывания величину запаздывания следует выбирать такой, чтобы существенный фазовый сдвиг возникал в той области частот, в которой амплитудно-частотная характеристика объекта определена при идентификации не достаточно точно. При этом следует обеспечить малое влияние этого запаздывания на фазовую характеристику модели объекта в той области, где модель объекта определена с достаточной степенью точности. Нами модельным исследованием выявлено, что такое искусственное ухудшение быстродействия модели объекта позволяет эффективно достичь поставленной цели, а именно: если реальный объект обладает какими-нибудь особенностями в области указанных частот, где модель объекта определена недостаточно точно, то использование регулятора, рассчитанного по модели со звеном запаздывания, дает переходные процессы, которые соответствуют поставленным требованиям. Если же такое звено запаздывания в модель не вводить при оптимизации регулятора, то использование такого регулятора с реальным объектом может не дать ожидаемого положительного эффекта, поскольку неучтенные особенности высокочастотной части модели объекта дадут о себе знать, нарушив устойчивость системы, или вызвав излишне большое перерегулирование. К неучтенным особенностям в данном случае могут быть отнесены дополнительные фильтры, дискретизация сигнала, запаздывание, и совокупность всех указанных особенностей.
- В качестве программы для моделирования предлагается программа *VisSim*, которая хорошо себя зарекомендовала для решения задач именно такого класса.

- В качестве метода оптимизации предлагается выбор любого из трех встроенных в эту программу методов.
- В качестве тестовых сигналов в случае линейной системы можно использовать единичное ступенчатое воздействие. Для нелинейных систем такой подход неправомочен, требуется использование таких тестовых сигналов, которые ожидаются в реальной системе.

3 Предлагаемая структура модели для оптимизации регулятора

Поскольку проект в программе VisSim не достаточно очевиден для читателя, не знакомого с этой программой, целесообразно идеи метода отразить на структуре модели, то есть на такой функциональной схеме, где выделены основные блоки и узлы системы и связи между ними.

Предлагаемая структура модели для оптимизации регулятора показана на *рис*. 2.



1 – имитатор объекта, 2 – имитатор регулятора, 3 – элемент сравнения, 4 – формирователь задающего сигнала, 5 – анализатор достижения цели управления, 6 – анализатор энергетических затрат, 7 – оптимизатор регулятора, 8 – объект, 9 – датчик, 10 и 11 – переключатели сигналов, 12 – звено запаздывания

Рисунок 2 – Структурная схема структуры для оптимизации системы по критерию энергосбережения

В данной структуре показаны все элементы, используемые как при оптимизации, так и после нее.

Представленная структура действует следующим образом. В исходном состоянии ключ 10 подключает выход регулятора 2 к входам имитатора объекта 1 и анализатора энергетических затрат 6, а ключ 11 соединяет выход имитатора объекта с отрицательным входом элемента сравнения. Математическая модель имитатора объекта совпадает с математической моделью объекта, которая предварительно определена путем процедуры идентификации (совместно с математической моделью датчика 9). Если выходной величиной объекта является электрический сигнал, то датчик 9 может отсутствовать. Однако, это совпадение искусственно нарушено введением последовательно с объектом 1 звена запаздывания 12, о котором сказано в п.3 раздела 2.

На первом этапе работы, осуществляется оптимизация регулятора 2, а на втором этапе работы полученный регулятор 2 используется совместно с объектом 8 и датчиком 9, образуя систему, аналогичную той, которая показана на *рис*. 1.

На первом этапе оптимизации вся структура, кроме элементов 8 и 9 многократно имитирует работу системы с реальным объектом 8. Объект 8 в этом случае представлен не только

имитатором объекта 1, но и последовательно с ним включенным звеном запаздывания 12, поэтому такой составной объект хуже той идеальной модели, которая получены путем идентификации (но может оказаться более адекватной раельной модели объекта).

С целью оптимизации формирователь задающего сигнала 4 по заданию оптимизатора регулятора 7 или автоматически (с определенной периодичностью) формирует изменяющийся сигнал задания V на модель системы. Модель системы образуется петлевым соединением элемента сравнения, регулятора и имитатора объекта. Ключи 10 и 11 служат для осуществления такого соединения. В соответствии с п.6 раздела 2, входной сигнал V задается в виде ступенчатого приращения из нулевого значения в единичное. В исходном состоянии в регулятор 2 из оптимизатора регулятора 7 вписаны стартовые значения коэффициентов регулятора, от которых начинается процесс оптимизации. Эти стартовые значения задаются оператором перед началом работы или генерируются оптимизатором регулятора автоматически. Регулятор 2 совместно с имитатором объекта 1 и элементом сравнения 3 образуют замкнутый контур управления, в котором происходит автоматическая подстройка выходного сигнала Y(t) к входному сигналу V(t). В этом режиме может использоваться машинное время, не совпадающее с реальным темпом, в этом случае регулятор 2 и имитатор объекта 1 работают быстрее, чем следует, используя заданный фиксированный коэффициент масштабирования времени. При этом на выходе элемента сравнения формируется сигнал ошибки E(t), а на выходе регулятора формируется сигнал управления U(t). Сигнал ошибки содержит информацию о качестве работы этой модели системы, а сигнал управления может быть использован для анализа затрат энергии при такой работе. Эти сигналы анализируются двумя анализаторами, а именно: сигнал E(t) поступает на вход анализатора достижения цели управления, который вычисляет сигнал, характеризующий точность действия регулятора, например, интеграл от модуля этой ошибки. Сигнал U(t) на выходе регулятора анализируется анализатором энергетических затрат, который вычисляет интеграл от квадрата этого сигнала с некоторым весовым коэффициентом k_2. Оптимизатор регулятора вычисляет стоимостную функцию, которая является суммой поступающих на его входы сигналов. На основании получаемых значений этой суммы оптимизатор регулятора вычисляет новые значения коэффициентов регулятора и принимает решение либо о повторении работы всей структуры модели с новыми коэффициентами или о прекращении работы этой структуры модели. При этом оптимизатор регулятора 7 формирует по заданному алгоритму новые значения коэффициентов регулятора и вписывает их в регулятор через соответствующие его входы. Регулятор совместно с имитатором объекта и элементов сравнения имитирует действие системы с обратной связью при данных значениях коэффициента. Если увеличение какого-либо коэффициента приводит к уменьшению стоимостной функции, то оптимизатор регулятора 7 продолжает его увеличивать на следующем шаге. Если же увеличение этого коэффициента приводит к увеличению стоимостной функции, оптимизатор регулятора 7 уменьшает этот коэффициент. Если изменение данного коэффициента в любую сторону приводит лишь к увеличению стоимостной функции, то оптимизатор регулятора 7 приступает к изменению другого коэффициента. Таким путем оптимизатор регулятора продолжает свои действия в цикле до тех пор, пока не будет выполнено заданное число итераций или пока увеличения каждого из параметров не будет приводить лишь к увеличению стоимостной функции. Так работает простейший метод оптимизации, при использовании более сложных методов приращения всем коэффициентам могут даваться на каждом шаге, что позволяет более эффективно (быстро и более точно) вычислять точку экстремума (то есть отыскивать коэффициенты регулятора, обеспечивающие минимум стоимостной функции).

В итоге оптимизации получаются найденными все коэффициенты регулятора. На этом первый этап действия данной структуры успешно завершается.

На втором этапе вместо имитатора объекта 1 и последовательно с ним включенного звена запаздывания 12 включается реальный объект 8 с датчиком 9 на его выходе, при этом обязательно используется режим реального времени, то есть масштабирование времени не исполь-

зуется. Для переключения используются ключи 10 и 11. Также переключение может быть осуществлено вручную путем монтажа, или рассчитанные параметры регулятора переписываются в новую систему, которая в отношении математической модели повторяет структуру регулятора 2 и элемента сравнения 3. Оптимизатор 7 предположительно далее не влияет на работу системы, если не требуется получение и реализация адаптивных свойств системы. Анализатор достижения цели управления 5 и анализатор энергетических затрат 6 в этом случае могут продолжать действовать, или они могут быть отключены, это не влияет на работу системы. Также эти элементы 5, 6 и 7 могут отсутствовать в системе, которая действует на втором этапе. То есть полученный в результате действия этой структуры регулятор 2 может использоваться отдельно в той системе, которая показана на *рис*. 1.

Главным результатом действия рассмотренной структуры является математическая модель регулятора для системы на *рис*. 1.

4 О формировании стоимостной (целевой) функции

Стоимостная функция – частный случай целевой функции, характерная следующими особенностями: а) ее значение больше или равно нулю; б) отыскивается набор параметров, обеспечивающий минимум стоимостной функции. Предлагается целевая функция в форме интеграла от нескольких слагаемых, первое из которых является модулем ошибки с весовой функцией в виде времени с начала переходного процесса, а остальные слагаемые вносят корректировку в переходный процесс, например, предотвращают излишне большое перерегулирование, обеспечивают снижение затрат энергии на управление и так далее:

$$(1) \quad \Psi = \int_0^T \sum_{i=1}^N \psi_i dt ,$$

$$(2) \quad \psi_1 = \mid e(t) \mid t .$$

Здесь T – время до достижения задачи управления. Например, слагаемое для уменьшения затрат энергии, которое следует поместить под интеграл в уравнение (1), может иметь вид:

$$(3) \quad \psi_2 = k_2 u^2(t) .$$

Здесь коэффициент k_2 необходим для приведения всех «затрат» к единой шкале. Такой коэффициент необходим при всех слагаемых кроме одного, поскольку умножение стоимостной функции в целом на постоянный коэффициент не изменяет его действия, поэтому для простоты предлагается первый коэффициент положить единичным: $k_1 = 1$.

Все слагаемые в (1) после интегрирования должны принимать малые положительные или нулевые значения, если качество переходного процесса удовлетворяет поставленным требованиям, в противном случае соответствующее слагаемое после интегрирования должно принимать большое в сравнении с остальными слагаемыми положительное значение.

В п.2 раздела 2 предложено для специфических задач энергосбережения изъятие из рассмотрения характеристики переходного процесса, то есть слагаемого (2), которое предлагается заменить слагаемым вне интеграла. Действительно, в определенном классе задач значение ошибки управления на протяжении переходного процесса может быть не столь важным (или совсем не важным) в сравнении с результатом управления по окончании некоторого наперед заданного времени. Например, можно предложить требование снижения ошибки до наперед заданной малой величины (или менее) к наперед заданному времени окончания процесса после скачкообразного изменения задания.

Например, предлагается достижение следующего соотношения:

$$(4) \quad t > \theta \Rightarrow \mid E(t) \mid \le \xi; \mid dE(t)/dt \mid \le \zeta .$$

Здесь θ – предписанное время достижения цели, ξ, ζ – предписанные максимальные значения для ошибки и ее производной.

В этом случае если интегрирование осуществляется в пределах интеграла уравнения (1), то для указанного слагаемого интегрирование достаточно осуществлять лишь от θ до T. Из получаемых величин модуля ошибки и модуля ее производной следует вычесть, соответственно, допустимые значения. В этом случае целевая функция приобретает нижеследующий вид:

$$(5) \quad \Psi = \int_0^T \sum_{i=1}^N \psi_i dt + \int_\theta^T [\varphi_1(t) + \varphi_2(t)] dt .$$

Здесь подынтегральные функции имеют вид:

$$(6) \quad \varphi_1 = \kappa_1 \max\{0, |e(t)| - \xi\} ,$$

$$(7) \quad \varphi_2 = \kappa_2 \max\{0, |de(t)/dt| - \zeta\} .$$

С целью упрощения можно использовать лишь слагаемое (6) в (5), пренебрегая слагаемым (7).

Также с целью упрощения можно предложить нижеследующую модификацию стоимостной функции:

$$(8) \quad \Psi = \int_0^T \sum_{i=2}^N \psi_i dt + \int_\theta^T \psi_1 dt .$$

Здесь используется интеграл от модуля ошибки с весовой функции вида (2) в усеченном интервале времени, лишь после заданного времени θ, а остальные величины, например, затраты энергии (3), интегрируются в полном интервале времени.

5 Пример применения предлагаемого метода

Предположительно если в объекте содержится интегратор, энергосберегающий метод проектирования регулятора должен быть эффективным. Если в объекте нет интегратора, эффективность этого метода может быть поставлена под сомнение.

Рассмотрим объект с передаточной функцией вида:

$$(9) \quad W(s) = \frac{1}{s(s+4s+1)} .$$

Предположим, по технологии применения объекта требуется сбережение ресурса управления при достижении цели управления к моменту времени $\theta = 5c$.

Как правило, при управлении объектами предлагается ПИД-регулятор, то есть регулятор, содержащий пропорциональный, дифференцирующий и интегрирующий тракты. Поскольку объект содержит интегратор, интегральный тракт в регуляторе не требуется. Поэтому предлагается коэффициент интегрального тракта k_I принимать равным нулю изначально, то есть осуществлять оптимизацию ПД-регулятора с целевой функцией вида (1) при единственном слагаемом (2). Тогда уравнение регулятора принимает вид:

$$(10) \quad W_R(s) = k_P + k_D s .$$

На *рис*. 3 показана схема в программе *VisSim* для оптимизации регулятора (10). Для простоты применим целевую функцию без введения под интеграл времени с начала переходного процесса.

(11) $\Psi_1 = k_2 \int_0^T u^2(t)dt + \int_\theta^T |e(t)|\,dt$.

Сравним результат с использованием традиционной процедуры без применения члена, отвечающего за энергосбережение:

(12) $\Psi_2 = \int_0^T |e(t)|\,dt$.

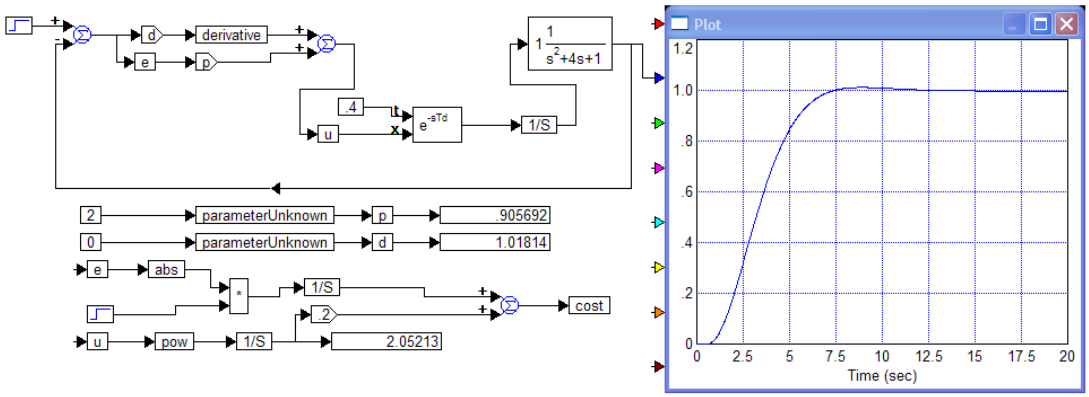


Рисунок 3 – Схема в программе *VisSim* для оптимизации регулятора

Традиционная процедура с использованием (12) дает следующие коэффициенты: $k_P = 3{,}219$; $k_D = 2{,}612$. Затраты энергии при этом составляют P = 15,79 единиц. Переходный процесс имеет перерегулирование около 5 %, его вид показан на *рис*. 4 синей линией (линией с двумя колебаниями).

Модифицированная процедура состоит в использовании (11), причем $\theta = 5$ с, а последовательно с объектом вводится звено запаздывания с величиной постоянной времени запаздывания $\tau = 0{,}4$ с. Эта процедура дает следующие коэффициенты: $k_P = 0$, 90; $k_D = 1{,}02$. Затраты энергии при этом составляют P = 2,034 единиц. Переходный процесс имеет пренебрежимо малое перерегулирование около 1 %, его вид показан на *рис*. 4 красной линией (линией без колебаний).

Таким образом, применение совокупности предложенных методов дает регулятор, обеспечивающий почти восьмикратное сбережение управляющего ресурса.

Рассмотрим гипотезу о том, что в модели реального объекта имеется фильтр второго порядка, не выявленный при идентификации вследствие малого влияния на переходный процесс, поскольку постоянные времени этого фильтра на порядок меньше, чем те, которые достоверно определены. Например, пусть этот фильтр описывается следующей передаточной функцией:

(13) $W_F = \dfrac{1}{0{,}1s^2 + 0{,}1s + 1}$.

Путем моделирования в структуре, показанной на *рис*. 5, получим переходные процессы для двух регуляторов, рассчитанных по стоимостным функциям (11) и (12), соответственно. Результат моделирования показан на *рис*. 6.

Регулятор, рассчитанный по традиционной процедуре с использованием (12), дает неустойчивую систему. В этом случае переходный процесс имеет вид нарастающих по амплитуде

колебаний, показанных на *рис*. 6. При этом затраты энергии составили P = 44,549 единиц, но и эти затраты не окончательные, поскольку переходный процесс продолжает развиваться, величина управления не стала нулевой, а, следовательно, интеграл от квадрата управления будет продолжать расти. Хотя при неустойчивом управлении это уже не важно, поскольку поставленная задача таким регулятором не решается.

Расчет регулятора по модифицированной процедуре дает устойчивую систему. Как видно из *рис*. 6 (красная линия), качество переходного процесса практически не ухудшилось, перерегулирование по-прежнему не превышает 1 %, затраты энергии составили P = 1,936 единиц.

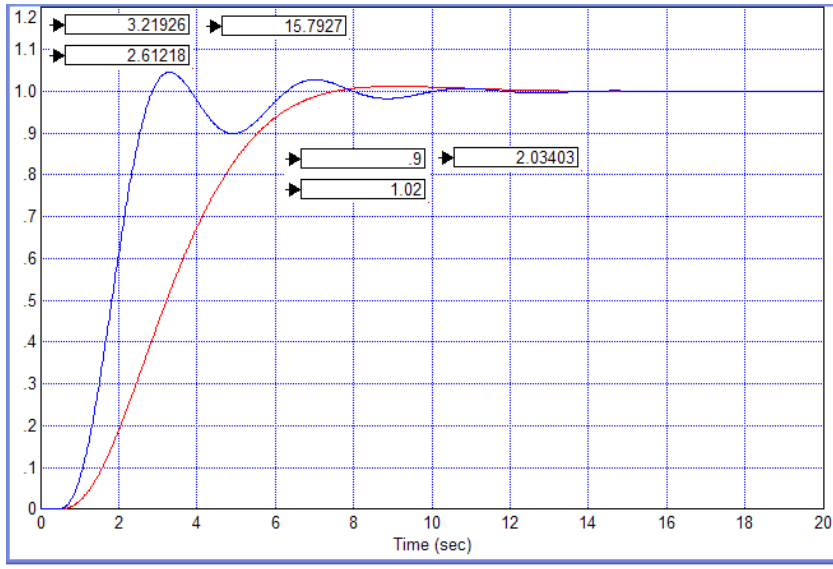


Рисунок 4 – Переходные процессы с регуляторами, полученными на основе стоимостных функций (11) и (12), на графике также отображены соответствующие коэффициенты регуляторов и энергетические затраты

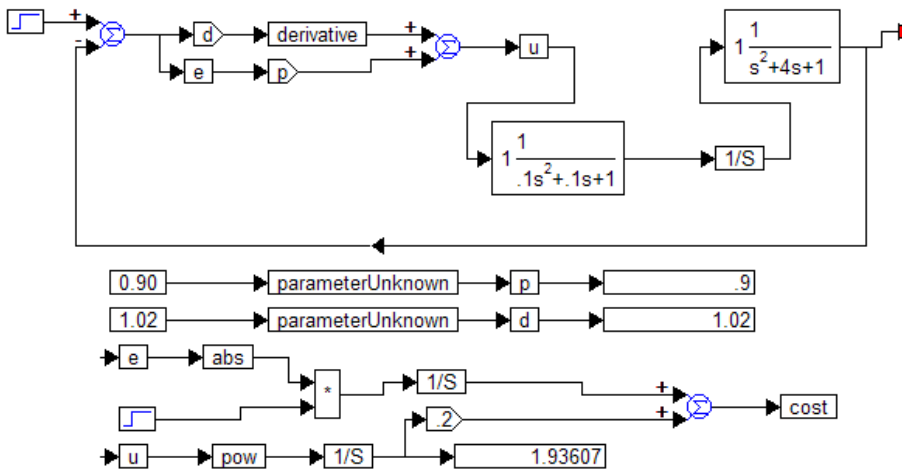


Рисунок 5 – Схема в программе *VisSim* для моделирования системы при наличии в объекте неучтенного фильтра (13)

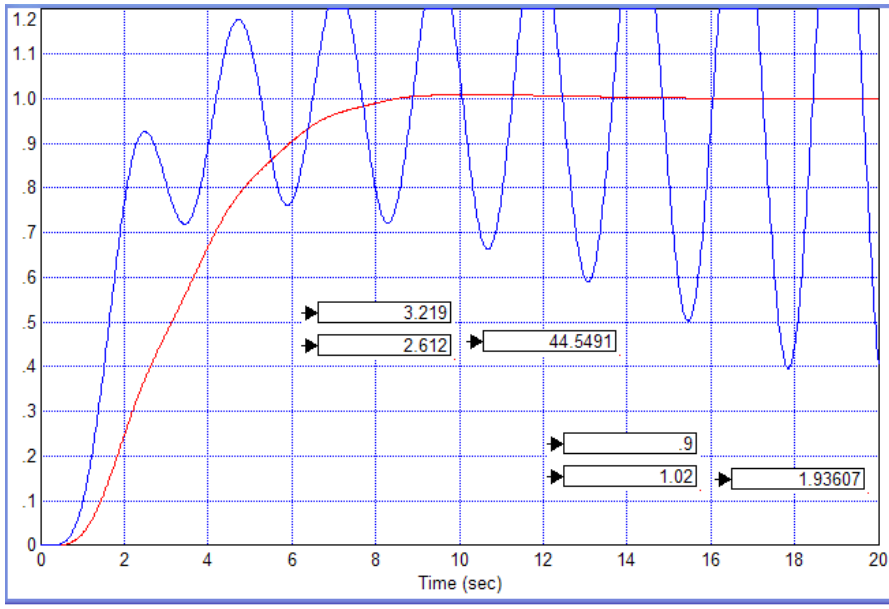


Рисунок 6 – Переходные процессы в системе при наличии фильтра (13) с регуляторами, полученными на основе стоимостных функций (11) и (12), на графике также отображены соответствующие коэффициенты регуляторов и энергетические затраты

Заключение

В данной статье предложен и исследован с помощью моделирования метод проектирования регуляторов, обеспечивающий экономию энергии, когда показателем затрат энергии при этом считается интеграл от управляющего воздействия. Также предложена модификация объекта при оптимизации, которая обеспечивает более надежное получение полезного результата, поскольку при этом последовательно с имитатором объекта включается звено запаздывания. Если при идентификации объекта высокочастотная часть его передаточной функции определена не достаточно точно, такая модификация модели при оптимизации служит эффективным средством достижения применимости полученного результата к реальному объекту. Система с реальным объектом (в котором присутствуют неучтенные высокочастотные корни в форме последовательного фильтра) остается устойчивой, с небольшим перерегулированием.

Применение предлагаемого способа позволяет существенно сократить энергетические затраты на управление и обеспечить более надежное достижение цели управления.

Список литературы

[1] Соболев А. В., Вент Д. П. Энергосберегающие регуляторы: задачи и структура. Датчики и системы. 2009. № 10. с.23 – 29.

[2] Жмудь В.А., Касторный А.В. Концепция энергосберегающих регуляторов Автоматика и программная инженерия. 2013. № 4 (6). С. 14–21. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).

[3] Жмудь В. А. Моделирование и оптимизация систем управления лазерным излучением в среде VisSim: учеб. пособие / В. А. Жмудь; Новосиб. гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2009. – 116 с.

Biography

Vadim Arkadievich Zhmud is head of the Department of Automation in NSTU, Professor, Doctor of Sciences., author of about 400 scientific articles, including 18 patents and 10 textbooks. Research interests and competencies are the theory of automatic control, electronics, laser systems, optimization, and measuring equipment.

E-mail: oao_nips@bk.ru

Alexander Nikolaevich Zavorin is post-graduate student of the Department of Automation in NSTU, author of 18 scientific articles, including 1 patent and 2 textbooks. Research interests and competencies are the theory of automatic control, electronics, optimization.

E-mail: pisatel1987@mail.ru

АДАПТИВНЫЕ МЕТОДЫ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ДИСПЕТЧИРОВАНИЯ В СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ

Д.Я. Иванов, Э.В. Мельник

НИИ Многопроцессорных вычислительных систем ЮФУ
347328, Таганрог, ул. Чехова, 2, ГСП-284, Россия
donat.ivanov@gmail.com
тел: +7 (8634) 315-494, факс: +7 (846) 360-376

Ключевые слова: *информационно-управляющая система, распределенное управление, децентрализованное диспетчирование*

Abstract

The paper is focused on the development of adaptive decentralized dispatching in network-centric information and control system of complex distributed technical objects, which are used at critical applications. Application of these methods in the organization dispatching centric information and control systems will significantly reduce the cost and increase the reliability of information and control systems due to more efficient use of available computational resources.

Введение

В настоящее время разрабатываются и применяются в различных областях человеческой деятельности все более сложные технические объекты и мехатронные комплексы, включающие в свой состав объекты, расположенные в ряде случаев на значительном удалении друг от друга. Также наблюдается тенденция к объединению нескольких изначально обособленных технических объектов под управлением единой информационно-управляющей системы (ИУС), что позволяет эффективнее использовать ресурсы и потенциал таких комплексов. Сложные мехатронные объекты и комплексы применяются в атомной энергетике, в нефтедобывающем комплексе, в авиации, в оборонной промышленности, в транспортных системах, в мультиробототехнических системах, на безлюдных производствах. Управление такими системами и комплексами представляет собой сложную научно-техническую задачу.

Высокие требования к отказоустойчивости, предъявляемые к ИУС современных сложных технических объектов, делают экономически нерациональным применение обычных способов повышения отказоустойчивости за счет дублирования узлов. Возникает задача обеспечения требуемой отказоустойчивости за счет использования небольших наборов резервных устройств (скользящее резервирование), либо резерва производительности [1]. Для решения этой задачи необходима возможность перераспределения функций между элементами системы [1,2].

В настоящее время широкодоступными стали сенсорные устройства, оснащенные сетевыми интерфейсами, использование которых позволяет избежать жесткой привязки сенсоров к устройствам обработки информации (УОИ). Таким образом все устройства, входящие в ИУС, обмениваются информацией через единую коммуникационную среду. Такие ИУС получили название сетецентрических.

Отсутствие жесткой привязки одних устройств к другим, а также наличие единой коммуникационной среды открывают широкие возможности по повышению отказоустойчивости ИУС за счет децентрализации функций управления, скользящего резервирования и перераспределения задач между УОИ. Данная статья посвящена обеспечению отказоустойчивости в сетецентрических информационно-управляющих системах с распределенным диспетчированием.

1 Организация вычислительно-управляющего процесса и контроля в сетецентрических ИУС

В данной работе рассматриваются сетецентрические ИУС с распределенным диспетчированием, принципы организации которых изложены в [3].

Ниже приведены основные аспекты предлагаемой сетецентрической концепции построения интеллектуальных децентрализованных ИУС распределенных мехатронных объектов:

- внутри кластера полный граф информационных связей;
- вопросы отказоустойчивости кластера решаются внутри кластера;
- информационный обмен в рамках единого информационного пространства (ЕИП);
- организацией вычислительно-управляющих процессов, контроля и восстановления в них занимаются локальные диспетчеры (ЛД);
- локальные диспетчеры работают на каждом узле (устройстве обработки информации (УОИ)), обеспечивая отказоустойчивое функционирование и делая "прозрачным" доступ к данным;

Для обеспечения безотказного вычислительно-управляющего процесса в ИУС, ЛД системы должны обеспечивать продолжение работы ИУС в случае изменения конфигурации (отказ или отключение УОИ, добавление или отключение кластера, а также изменения в составе решаемых подзадач и информационных связей между ними и т.д.).

Рассматриваемая концепция построения сетецентрической ИУС имеет следующие отличительные особенности:

- поддержка УОИ различного устройства и возможностей;
- возможность перераспределения между УОИ не только задач целиком, но и подзадач;
- отсутствие у УОИ полной информации о структуре системы;
- информационный обмен осуществляется посредством коммуникационной среды, включающей в себя разнотипные каналы связи;
- возможность адаптации системы к изменениям в пропускной способности каналов связи, вызванными внешними воздействиями;
- отсутствие жесткого закрепления функций за УОИ;
- перераспределение подзадач между УОИ в процессе работы ИУС;
- увеличение отказоустойчивости ИУС за счет перераспределения задач отказавшего УОИ без потери функциональности системы;
- обеспечение требуемой отказоустойчивости за счет резервирования УОИ в пределах кластера, а также за счет наличия резерва производительности в каждом УОИ;
- использование локальных диспетчеров на каждом УОИ (в отличие от многих систем, где перераспределение функций ведет единый диспетчер, выход из строя которого ведет к потере работоспособности системы).

2 Децентрализованные распределенные сетецентрические ИУС

Понятие «децентрализация» для распределенных систем может рассматриваться в двух плоскостях:

- применительно к реализации заданных функций, т.е. для исключения из состава ИУС устройств обработки информации, выполняющих какую-то определенную функцию;
- применительно к реализации функции диспетчирования ИУС (распределение подзадач, контроль отказов, реконфигурация).

В данном подходе используются оба варианта децентрализации.

3 Информационный обмен в сетецентрических ИУС

Информационный обмен в ИУС с распределенным диспетчированием осложняется следующими факторами:

- отсутствие центральных управляющих элементов, обладающих полной информацией о текущей структуре ИУС и ее коммуникационной среды;
- недетерминированные изменения структуры ИУС и коммуникационный среды в частности;
- недетерминированность нагрузки на каналы.
- Целесообразно выделить три различные схемы доступа к данным:
- передача данных между УОИ внутри одного кластера;
- адресная передача данных между УОИ разных кластеров;
- рассылка сообщений всем УОИ системы.

Передача данных между УОИ внутри одного кластера не представляется сложной ввиду того, что внутри кластера реализован полный граф связей по принципу «каждый с каждым» (обычно, это одна общая шина данных). Таким образом, наибольший интерес представляют оставшиеся два пункта.

Адресную рассылку данных между УОИ в условиях неполной информации о топологии коммуникационной сети и распределении нагрузки на каналы связи целесообразно реализовать на основе роевого интеллекта, что показано в работах [4-6], опирающихся, в свою очередь, на так называемый «муравьиный алгоритм».

В отличие от этих работ, в ИУС рассматриваемой структуры необходимо учитывать особенности коммуникационной среды, связанные с кластеризацией, а также особенностями информационного обмена при решении задач управления, а именно наличие довольно стабильных информационных связей между подзадачами, таким образом, имеет смысл отслеживать маршруты только для имеющихся информационных связей, а не для полного множества возможных маршрутов. Так как мощность множества маршрутов нелинейно зависит (степенная функция) от количества УОИ и связей между ними, то учет кластеризации позволяет во много раз упростить задачу маршрутизации. Также нецелесообразно задействовать механизмы маршрутизации для информационных связей между подзадачами, выполняющимися на одном УОИ или на разных УОИ одного кластера. С учетом этого был предложен алгоритм действий ЛД при маршрутизации [7].

В тех случаях, когда возникает необходимость в передаче данных или сообщений всем УОИ в ИУС с неполной информацией о структуре применяются так называемые «эпидемические алгоритмы» [8]. Эти алгоритмы позволяют осуществлять рассылку сообщений всем узлам сети при относительно небольшом количестве пересылок, при этом вычислительная сложность этих алгоритмов невысока, так что их использование не создает излишней вычислительной нагрузки. Суть «эпидемических алгоритмов» сводится к тому, что каждый элемент системы распространяет полученную им информацию между другими элементами системы в соответствии с определенными правилами. Различные модификации «эпидемических алгоритмов» отличаются именно правилами распространения информационного сообщения [9].

Различные модификации «эпидемических алгоритмов» по разному решают задачу прекращения дальнейшей передачи сообщения от элемента к элементу. Обычно задачу прекращения передачи сообщений решают за счет наличия в сообщении некоторого счетчика, показывающего число осуществленных пересылок. При наличии полной информации о графе информационных связей в системе можно определить такое максимальное количество счетчика пересылок, после которого дальнейшие пересылки не обязательны и при этом гарантируется доставка сообщения всем адресатам.

Однако, в системах с недетерминированной структурой коммуникационной среды такой механизм неприменим ввиду частых изменений структуры ИУС, а также ввиду отсутствия у

отдельных УОИ полной информации о текущей структуре ИУС и состоянии коммуникационной среды. Для обеспечения рассылки сообщений в ИУС рассматриваемой структуры, необходимо учитывать кластеризацию и вытекающие из нее особенности коммуникационной среды. В связи с этим, предлагается дополнять каждое сообщение заголовочной частью, содержащей идентификатор УОИ-отправителя, идентификатор кластера, к которому принадлежит УОИ-отправитель, идентификатор сообщения. Так как сквозная нумерация сообщений в сложных распределенных системах с недетерминированной структурой затруднена, а совпадения идентификаторов сообщений крайне нежелательны, в качестве уникального идентификатора сообщения предлагается использовать хеш-сумму содержимого сообщения. С учетом рассмотренных особенностей был предложен алгоритм действий ЛД для осуществления рассылок.

4 Распределение подзадач и кластеризация

При распределении подзадач управления, решаемых средствами ИУС, необходимо учитывать не только вычислительную мощность отдельных УОИ, но и особенности коммуникационной среды, с помощью которой осуществляется информационное взаимодействие.

Различия в пропускной способности каналов связи приводит к тому, что некоторые подмножества операционных вершин, образующие полный подграф, выделяются в отдельный кластер. Таким образом, УОИ внутри кластера связаны высокоскоростным каналом связи по принципу «каждый с каждым», в том время как информационный обмен между кластерами производится по коммутируемым каналам связи, порой не такой высокой пропускной способности. Более того, между некоторыми кластерами может не быть прямого канала связи, в отличие от структуры, рассмотренной в работе [10].

Таким образом, при распределении подзадач между кластерами и отдельными УОИ, более связанные подзадачи следует располагать в рамках одного кластера (а, возможно, и одного УОИ), в то время, как слабосвязные подзадачи размещаются на УОИ разных кластеров (см. рисунок 1).

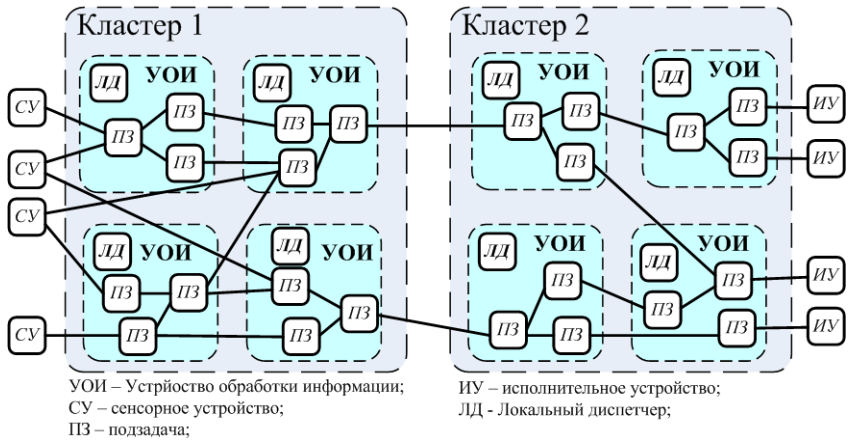


Рисунок 1 – Распределение подзадач в ИУС с кластеризацией

Рассмотрим обобщенный алгоритм работы ЛД после первоначального запуска ИУС, учитывающий перечисленные выше особенности и ограничения:

- ЛД подсчитывает количество информационных связей выполняемых на его УОИ подзадач;

- с помощью алгоритмов маршрутизации, основанных на муравьином алгоритме [7], ЛД в фоновом режиме определяет квази-оптимальные маршруты для передачи выходных данных выполняемых на УОИ подзадач;
- ЛД определяет, какие УОИ системы участвуют в резервировании промежуточных данных выполняемых на УОИ подзадач;
- с помощью рассылок, основанных на «эпидемическом алгоритме» [8-9], ЛД осуществляет дублирование промежуточных результатов выполняемых на УОИ подзадач;
- ЛД принимает и хранит резервные копии промежуточных результатов подзадач, выполняющихся на других УОИ;
- при выходе из строя одного или нескольких УОИ этого кластера, ЛД участвует в перераспределении подзадач, выполнявшихся на выбывшем УОИ (см. ниже).

5 Восстановление вычислительно-управляющих процессов в распределенных ИУС

Выход из состава ИУС отдельных узлов (вследствие отказа или отключения) не должен приводить к прекращению работы ИУС. В связи с этим особое значение приобретает задача восстановления вычислительно-управляющих процессов в ИУС, после изменения структуры системы. Функции выбывших узлов перераспределяются между оставшимися в составе ИУС исправными основными и резервными УОИ.

В рассматриваемых сетецентрических ИУС с распределенным диспетчированием, перераспределение функций вышедших из строя узлов осуществляется ЛД УОИ того кластера, к которому принадлежали вышедшие из строя УОИ. Рассмотрим алгоритм работы ЛД при выходе из строя одного или нескольких УОИ кластера:

- ЛД определяет имеющиеся на его УОИ резервы производительности (если этот УОИ является резервным, то это 100%);
- по прямым каналам связи ЛД передает другим ЛД этого кластера информацию об имеющихся резервах производительности;
- ЛД получает от других ЛД кластера информацию об имеющихся на них резервах производительности;
- ЛД участвует в перераспределении подзадач, выполнявшихся на вышедшем из строя УОИ;
- если в результате перераспределения некоторые подзадачи попали на этот УОИ, то ЛД определяет требующиеся информационные связи и запускает для них сообщения-маршрутизаторы; передает с помощью рассылок другим УОИ информацию о требующихся для восстановления работы подзадач данных.
- ЛД получает информацию о том, какие резервные данные требуются другим УОИ для восстановления работы перераспределенных подзадач;
- При наличии требующихся резервных данных, ЛД передает их тем УОИ, на которых теперь выполняются эти подзадачи;
- ЛД переходит в штатный режим работы (см. выше).

Стоит отметить, что в некоторых случаях возможно привлечение ЛД к восстановлению работоспособности соседних кластеров. Это может происходить в тех случаях, когда в этих кластерах не хватает резервов производительности, либо отсутствуют резервные копии промежуточных результатов перераспределяемых подзадач. Действия ЛД в этих случаях будут отличаться только тем, что вместо рассылок будет использоваться адресная передача данных.

Заключение

С целью апробации предлагаемых методов проведено компьютерное моделирование работы ИУС, которое подтвердило работоспособность и показало преимущества предлагаемых методов.

Предложенные адаптивные методы децентрализованного диспетчирования в сетецентрических ИУС позволяют распределить нагрузку между каналами связи и осуществлять информационный обмен даже при неполной информации о текущей структуре коммуникационной сети и при возможных незапланированных выходах из состава ИУС отдельных узлов.

Благодаря этому предлагаемый подход позволяет добиваться высоких показателей надежности и отказоустойчивости систем при сравнительно меньших аппаратных затратах за счет снижения необходимого количества резервных устройств обработки информации, что в свою очередь снижает аппаратные затраты на реализацию ИУС.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 14-08-00776 А

Список литературы

[1] Каляев И.А., Мельник Э.В. Децентрализованные системы компьютерного управления. – Ростов н/Д: Издательство ЮНЦ РАН, 2011. – 196 с.

[2] C. Pagetti, P. Bieber, J. Brunel, etc. Reconfigurable IMA platform: from safety assessment to test scenarios on the SCARLETT – Режим доступа: 01.02.14.

[3] Мельник Э.В., Иванов Д.Я. Принципы организации децентрализованных сетецентрических информационно-управляющих систем // Вестник компьютерных и информационных технологий. №4. 2013. Стр. 25-30.

[4] R. Schoonderwoerd, O. Holland, J. Bruten and L. Rothkrantz. Ant-based Load Balancing in Telecommunications Networks. Adaptive Behavior, 5(2):169-207, 1996.

[5] G. Di Caro and M. Dorigo. AntNet: Distributed stigmergetic control for communications networks. Journal of Artificial Intelligence Research, Vol. 9, pp.317-365, 1998.

[6] G. Di Caro, F. Ducatelle, L. M. Gambardella. AntHocNet: An adap-tive nature-inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks. Euro-pean Transactions on Telecommunications, 16(5):443-455, 2005.

[7] Мельник Э.В., Иванов Д.Я. Маршрутизация и распределение нагрузки в коммуникационной среде сетецентрических информационно-управляющих системах с распределенным диспетчированием и кластеризацией // Актуальные вопросы современной техники и технологии [Текст]: Сборник докладов XII Международной научной конференции (Липецк, 26 июля 2013 г.). // Отв. ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2013. – С.24-28.

[8] Kostadinova R., Adam C. Performance Analysis of the Epidemic Algorithms // Intelligent Control and Automation, 2008. Iissue 6. pp. 6675 - 6679.

[9] Hollerung T.D., Bleckmann P. Epidemic Algorithms [Электронний ресурс] / T. D. Hollerung, P. Bleckmann. – Режим доступа: www2.cs.uni-paderborn.de/cs/ag.../2004SS/.../09-Epidemic-Algorithms.pdf 12.03.14.

[10] В. Харченко, Ю. Юрченко. IOTS-подход: анализ вариантов структур отказоустойчивых бортовых комплексов при использовании электронных компонентов Industry [Электронный ресурс] : Новости микроэлектроники. – Режим доступа: http://chipnews.ru/html.cgi/arhiv/03_07/7.htm 01.03.2014.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ЛОГИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Б.Г. Ильясов, Г.А. Саитова, И.И. Сабитов

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, Россия
ilyasov@tc.ugatu.ac.ru, saitova@bk.ru, iskra1990@gmail.com
тел: +7 (347) 273-79-27, факс: +7 (347) 272-29-18

Ключевые слова: *логический регулятор; многосвязная система; устойчивость; частотные методы*

Abstract
The article describes sufficient condition for stability of multivariable systems with logic control and gives an example.

Введение

Современные исследуемые сложные динамические объекты разнообразной физической природы представляют собой комплекс различных подсистем, взаимосвязанных и взаимодействующих друг с другом. Примерами таких современных объектов являются многосвязные системы автоматического управления (МСАУ) сложными динамическими объектами, такими как газотурбинный двигатель (ГТД), энергетические комплексы, синхронные генераторы и так далее.

Такие объекты, как правило, являются нелинейными, многосвязными и многофункциональными. Отмеченные свойства вызывают серьезные затруднения при проектировании систем управления. Основная трудность при этом заключается в обеспечении устойчивости и достижении желаемого качества функционирования на всех режимах условия как МСАУ в целом, так и её сепаратных подсистем.

В современных МСАУ часто используются нелинейные регуляторы, позволяющие значительно расширяет возможности целенаправленного изменения качества процессов управления, а также позволяет улучшить динамические и статические свойства системы.

Среди данного класса широкое распространение получили логические регуляторы. В отличие от классических («жестких») алгоритмов управления, построенных на основе концепции обратной связи и, по существу, просто воспроизводящих некоторую заданную функциональную зависимость или дифференциальное уравнение, стратегия логического управления основана на эмпирически приобретенных знаниях относительно функционирования объекта (процесса), представленных в форме логического закона управления. Таким образом, логический регулятор берет на себя функции анализа текущего поведения объекта управления и выработки логически скорректированного сигнала управления. Однако в силу нелинейности характеристик применение логических регуляторов для управления сложными техническими объектами затруднено отсутствием эффективных методов оценки устойчивости и качества процессов управления и, как следствие, формализованных методов проектирования данного класса систем.

Для решения задач анализа и синтеза нелинейных систем управления широко используются приближенные методы. Среди них наиболее разработанным в теоретическом и методическом отношении является анализ абсолютной устойчивости [1]. В данной статье рассматри-

вается подход к анализу абсолютной устойчивости в многосвязных системах автоматического управления (МСАУ) с логическими регуляторами в сепаратных каналах управления.

1 Постановка задачи

Рассмотрим гомогенную МСАУ с логическими регуляторами в сепаратных каналах. Структура схема данной системы представлена на рис. 1.

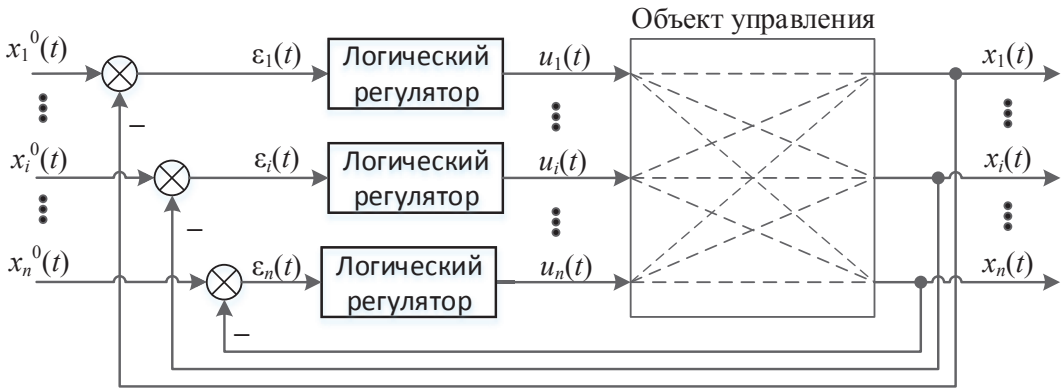


Рисунок 1 – Структурная схема МСАУ

Логический регулятор состоит из линейного регулятора и логического блока анализа координаты ошибки, вырабатывающего на основе сформированной координаты ошибки $\varepsilon_i(t)$ и её производной $\varepsilon_i'(t)$ логически скорректированную координату ошибку $\varepsilon_i^*(t)$.

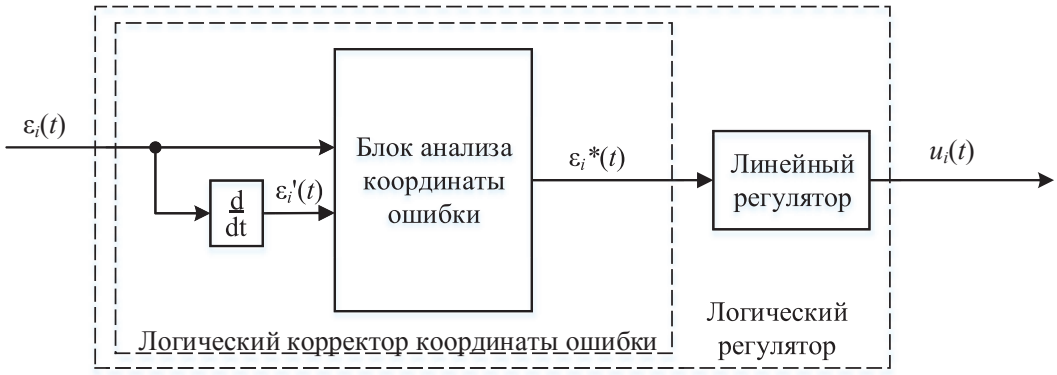


Рисунок 2 – Структурная схема логического регулятора в *i*-м канале

Структурная схема логического регулятора для *i*-го канала представлена на рис. 2, где $\varepsilon_i(t)$ и $\varepsilon_i'(t)$ – координата ошибки и её производная в *i*-м канале; $\varepsilon_i^*(t)$ – логически скорректированная координата ошибки; $u_i(t)$ – сигнал управления в *i*-м канале.

Рассмотрим логический закон управления, реализованный в блоке анализа координаты ошибки.

Поведение координаты ошибки $\varepsilon_i(t)$ можно описать через направление изменения ($\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t)$) и скорости изменения. На основе скорости изменения координаты ошибки $\varepsilon_i'(t)$ можно спрогнозировать возможное значение координаты ошибки ($\varepsilon_i(t)+\tau\varepsilon_i'(t)$) через промежуток времени τ.

Таким образом, когда направление изменения ошибки ($\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t)$) положительное, то модуль ошибки $|\varepsilon_i(t)|$ будет возрастать и поэтому необходимо замедлять движение в канале. Если же направление изменения ошибки ($\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t)$) отрицательное, то модуль ошибки $|\varepsilon_i(t)|$ будет уменьшаться и поэтому необходимо рассмотреть возможное значение координаты ошибки ($\varepsilon_i(t) + \tau\varepsilon_i'(t)$). Если возможное значение координаты ошибки ($\varepsilon_i(t) + \tau\varepsilon_i'(t)$) будет больше нуля, то скорость изменения модуля ошибки понижается и необходимо ускорить движение в канале. Если же возможное значение координаты ошибки ($\varepsilon_i(t) + \tau\varepsilon_i'(t)$) будет меньше нуля, то скорость изменения модуля ошибки повышается и необходимо замедлить движение в канале.

Таким образом, логический закон анализа координаты ошибки описывается следующей функцией:

$$(1)\quad \varepsilon_i{}^*(t) = \begin{cases} \varepsilon_i(t) - \varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) & \text{если } (\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) \le 0) \wedge (\varepsilon_i(t) + \tau\varepsilon_i'(t) > 0) \\ \varepsilon_i(t) + \varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) & \text{если } (\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) \le 0) \wedge (\varepsilon_i(t) + \tau\varepsilon_i'(t) \le 0) \\ \varepsilon_i(t) + \varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) & \text{если } (\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) > 0) \end{cases}.$$

Описанный логический регулятор на основе характера поведения ошибки, а именно на основе направления её изменения и возможного её значения через промежуток времени, вырабатывает логическую скорректированную координату ошибки. График работы логического регулятора представлен на рис. 3, а отклик на синусоидальный сигнал на рис. 4.

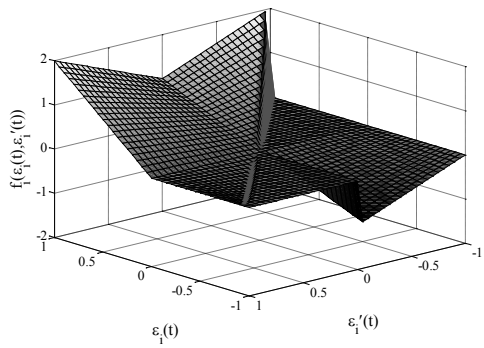


Рисунок 3 – График работы логического корректора ошибки

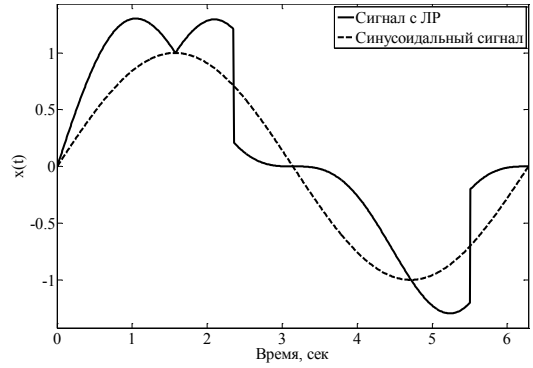


Рисунок 4 – Отклик логического регулятора на синусоидальный сигнал

Для получения достаточного условия абсолютной устойчивости системы с логическими регуляторами проведем анализ его характеристик.

2 Анализ характеристик логического регулятора

Предлагаемый логический закон (1) можно представить в виде двух более простых нелинейностей – $\psi_{i\alpha}(\varepsilon_i(t),\varepsilon_i'(t))$ (2) и $\psi_{i\beta}(\varepsilon_i(t),\varepsilon_i'(t))$ (3), описывающих области ускорения и замедления.

$$(2)\quad \varepsilon_i{}^*(t) = \begin{cases} \varepsilon_i(t) - \varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) & \text{если } (\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) \le 0) \wedge (\varepsilon_i(t) + \tau\varepsilon_i'(t) > 0) \\ 0 & \text{если } (\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) \le 0) \wedge (\varepsilon_i(t) + \tau\varepsilon_i'(t) \le 0) \\ 0 & \text{если } (\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) > 0) \end{cases}.$$

$$(3)\quad \varepsilon_i{}^*(t) = \begin{cases} 0 & \text{если } (\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) \le 0) \wedge (\varepsilon_i(t) + \tau\varepsilon_i'(t) > 0) \\ \varepsilon_i(t) + \varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) & \text{если } (\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) \le 0) \wedge (\varepsilon_i(t) + \tau\varepsilon_i'(t) \le 0) \\ \varepsilon_i(t) + \varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) & \text{если } (\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) > 0) \end{cases}.$$

Рассмотрим графики выделенных нелинейностей, которые представлены на рис. 5 и 6.

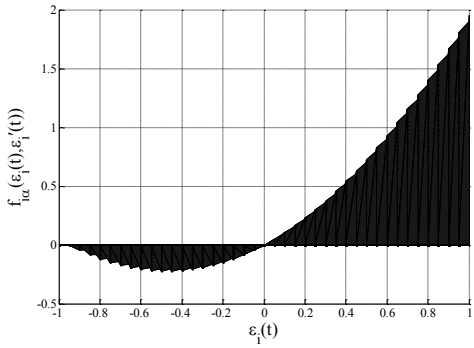


Рисунок 5 – График работы логического корректора ошибки

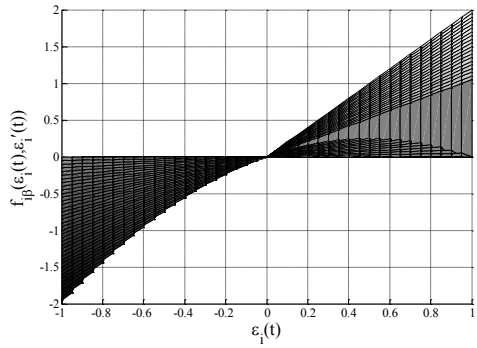


Рисунок 6 – Отклик логического регулятора на синусоидальный сигнал

Обе нелинейности являются однозначными относительно сигнала ошибки $\varepsilon_i(t)$ и для каждой выполняется условие $\psi_{\alpha i,\beta i}(0,0)=0$. Тогда каждую выделенную нелинейную характеристику логического регулятора можно представить в следующем виде:

$$\psi_{i\alpha,i\beta}(t) = k(\varepsilon_i(t),\varepsilon_i'(t))\varepsilon_i(t),$$

где $k(\varepsilon_i(t), \varepsilon_i'(t))$ – коэффициент передачи логического регулятора, зависящий от сигнала ошибки $\varepsilon_i(t)$ и её производной $\varepsilon_i'(t)$. На основе анализа графиков получается, что все характеристики выделенных нелинейностей лежат в секторе:

$$0 \le \frac{u(\varepsilon_i,\varepsilon_i')}{\varepsilon_i} \le k_{\max}, \quad \text{где } k_{\max} = 2.$$

Таким образом, логический регулятор обозначим следующим образом:

$$W_{\text{ЛР}i}(s) = k_{\max}, \quad \text{где } k_{\max} = 2.$$

Для описания динамических характеристик МСАУ используется подход на основе индивидуальных характеристик сепаратных подсистем и многомерных элементов связей между ними [2].

Передаточная функция i-ой сепаратной подсистемы с описанным логическим регулятором в режиме управления в частотной области описывается следующим образом:

$$\Phi_i(j\omega) = \frac{W_{\text{ЛР}i}(j\omega)\,W_{\text{Л}ii}(j\omega)}{1 + W_{\text{ЛР}i}(j\omega)\,W_{\text{Л}ii}(j\omega)}, \quad (4)$$

где $W_{\text{Л}ii}(j\omega)$ – передаточная функция линейной части сепаратного канала в частотной области.

Так как рассматривается гомогенная МСАУ, то динамические характеристики локальных подсистем идентичны. В этом случае характеристическое уравнение связи системы имеет следующий вид [3]:

$$D(h,x) = 1 + \sum_{i=2}^{n} h_i x^i, \quad (5)$$

где h_i – характеристика многомерной связи; x – комплексная переменная, соответствующая локальной характеристики i-ой сепаратной подсистемы $\Phi_i(j\omega)$ (4) с логическим регулятором.

В этом случае корни характеристического уравнения связи (5) $\{x_i\}$ можно рассматривать как корневые годографы, на основе которых возможно получить достаточное условие устойчивости многосвязной системы автоматического управления с логическими регуляторами в сепаратных каналах.

Выделим линейные и нелинейные характеристики разомкнутой подсистемы из уравнения (4):

$$(6)\quad W_{\text{ЛР}i}(j\omega)\,W_{\text{Л}ii}(j\omega)=\frac{\Phi_i(j\omega)}{1-\Phi_i(j\omega)}.$$

Подставляя x_i вместо $\Phi_i(j\omega)$ в уравнение (6), получаем условие, при котором многосвязная система с логическим регулятором в сепаратных каналах проходит через корни характеристического уравнения связи:

$$(7)\quad W_{\text{Л}ii}(j\omega)=\frac{x_i}{k_{\max}-k_{\max}x_i}=x_i^*,\quad \text{где } i=\overline{1,n}.$$

где x_i* назовем модифицированными корнями.

Следовательно, на основе (7) можно предложить достаточное условие устойчивости положения равновесия для многосвязной системы с логическими регуляторами в сепаратных каналах [4]: если многосвязная система состоит из сепаратных подсистем, линейная часть ($W_{\text{Л}ii}(j\omega)$) которых устойчива или нейтральна в разомкнутом состоянии, содержащих логический регулятор $y=F(\varepsilon_i(t),\varepsilon_i'(t))$ с характеристикой, лежащей в диапазоне $0\le y=F(\varepsilon_i(t),\varepsilon_i'(t))/\varepsilon_i(t))\le k_{\max}$, то для устойчивости положения равновесия этой системы достаточно, чтобы амплитудно-фазочастотная характеристика линейной части $W_{\text{Л}ii}(j\omega)$ не охватывала ни один из модифицированных корней x_i*, $i=1,\ldots,n$.

Рассмотрим в качестве примера трехсвязную САУ с логическими регуляторами в сепаратных каналах. Матричная передаточная функция системы:

$$W_{OY}(s)=\frac{1}{0.125s^3+0.75s^2+1.25s+1}\begin{bmatrix}1 & -0.35 & 0.3\\ 0.4 & 1 & -0.3\\ -0.25 & 0.5 & 1\end{bmatrix}.$$

Параметры ПИ-регулятора рассчитанные для каждого сепаратного канала:

$$W_{ПИ}(s)=\frac{0.5(1.25s+1)}{s(0.1s+1)}.$$

Характеристическое уравнение связи системы имеет следующий вид [3]:

$$D(h,x)=1+0.36x^2+0.03x^3,$$

а корни данного уравнения:

$$x_{1,2}=-0.12\pm 1.63,\ x_3=-11.078.$$

Определим модифицированные корни (7):

$$x_{1,2}^*=-0.37\pm 0.24,\ x_3^*=-0.48.$$

Амплитудно-фазочастотная характеристика линейной части $W_{\text{Л}ii}(j\omega)$ относительно ближайшего модифицированного корня представлена на рис. 7.

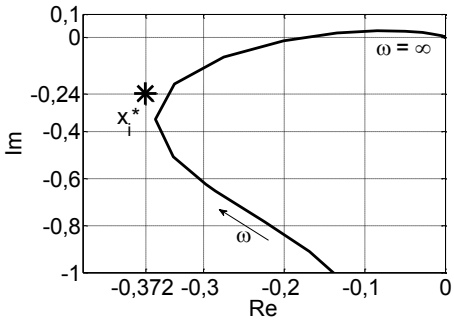


Рисунок 7 – График работы логического корректора ошибки

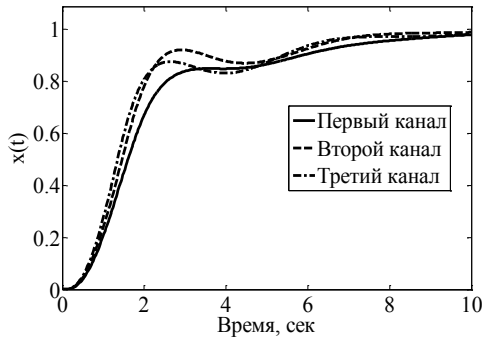


Рисунок 8 – Отклик логического регулятора на синусоидальный сигнал

Видно, что годограф линейной части $W_{Лi}(j\omega)$ не охватывает модифицированный корень, значит, выполняется достаточное условие абсолютной устойчивости, что подтверждается графиками переходных процессов в каналах сепаратных подсистем МСАУ с логическими регуляторами, представленными на рис. 8.

Заключение

Проанализированы нелинейные характеристики логического закона управления и выделы две подобласти его функционирования в пространстве входных и выходных сигналов. На основе анализа характеристик полученных областей предложено достаточное условие устойчивости положения равновесия многосвязной системы автоматического управления с логическими регуляторами в сепаратных каналах.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ 14-08-97056 р_поволжье_а, 14-08-01019 А).

Список литературы

[1] Попов Е.П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах. – М: Наука, 1979.
[2] Ильясов Б.Г., Кабальнов Ю.С. Исследование устойчивости однотипных многосвязных систем автоматического управления с голономными связями между подсистемами. // Автоматика и телемеханика. – М., РАН, 1995, № 8. – С. 82-90.
[3] Шевяков А. А. и др. Оптимизация многомерных систем управления газотурбинных двигателей летательных аппаратов / Под общ. ред. А. А. Шевякова и Т. С. Мартьяновой. – М.: Машиностроение, 1989. 256 с.
[4] Ильясов Б.Г., Саитова Г.А., Халикова Е.А. Достаточное условие абсолютной устойчивости однотипных нелинейных многосвязных систем // 3-ая Российс. мультиконф. по проблемах управления. «Управление в технических системах». Докл. науч. конф. Санкт-Петербург: изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. в.3-х т. Т. 1. С. 235-238.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ПОДВИЖНОЙ ТЕЛЕКАМЕРОЙ

А.А. Кацурин

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Радио, 5, Россия
katsurin@iacp.dvo.ru
тел: (432) 231-37-83

Дальневосточный федеральный университет
690091, Владивосток, ул. Суханова, 8, Россия
katsurin@mail.ru
тел: +7 (423) 226-51-18

Ключевые слова: *мобильный робот, телеуправление, подвижная телекамера, мехатроника*

Abstract

The paper solved the task of development of the system of telecontrol by the mobile robot and algorithm of its work which allows automatically considering mutual orientation of a television camera and the basis of the mobile robot. In this case the operator sets control signals using the image on the monitor. The robot moves in the specified direction with any initial orientation of a television camera and the basis. Such algorithm was developed, simulated on model and realized as the program module.

Введение

В настоящее время мобильные роботы и манипуляторы с телеуправлением используются для выполнения различных задач в экстремальных и опасных условиях, в том числе поисково-разведывательных работ, обезвреживания боеприпасов и т.п. [1-5]. При этом человек-оператор на основе изображения рабочего пространства на экране телемонитора формирует требуемые управляющие воздействия с помощью специального задающего устройства. Одним из основных требований к оператору мобильного робота является чёткое, быстрое и качественное решение поставленных задач. Основная проблема, возникающая при телеуправлении мобильным роботом, оборудованным подвижной телекамерой, заключается в большой психологической нагрузке на оператора. Он должен постоянно учитывать текущую пространственную ориентацию, как основания робота, так и телекамеры при формировании управляющих команд.

Таким образом, проблема разработки новых методов и алгоритмов эффективного телеуправления мобильными роботами при изменении ориентации оптической оси телекамеры остается по-прежнему актуальной.

1 Постановка задачи

Для решения указанной проблемы в работе ставится и решается задача разработки системы телеуправления мобильным роботом и алгоритма ее работы, который позволяет автоматически учитывать взаимную ориентацию телекамеры и основания мобильного робота. При этом оператор формирует управляющие команды на основе изображения на мониторе, а робот движется в указанном направлении при любой исходной ориентации телекамеры и основания. Такой алгоритм был разработан, исследован на модели и реализован в виде программного модуля.

2 Описание состава мобильного робота

Используемый в работе мобильный робот (см. рис. 1) представляет собой платформу с четырьмя независимо вращающимися колёсами (в иностранной литературе имеет название «differentially driven mobile robot» [6]). Кинематическая конфигурация данной платформы позволяет роботу выполнять поворот по дуге вокруг некоторой точки с минимальным радиусом $R \to 0$, иначе говоря, робот вращается вокруг собственной оси, что значительно упрощает решение поставленной в работе задачи.

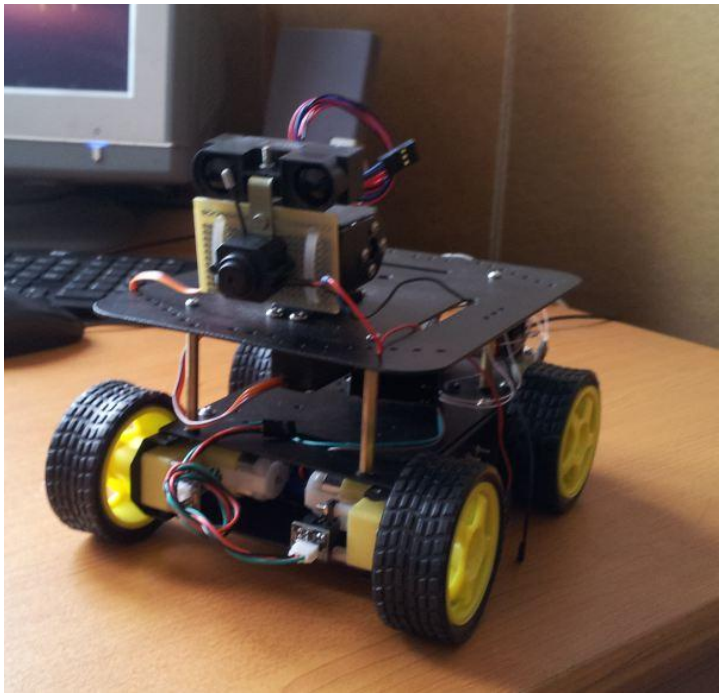


Рисунок 1 – Общий вид мобильного робота

На корпусе робота расположена специальная поворотная платформа, позволяющая задавать ориентацию телекамеры по двум углам: тангажа и рысканья. Блок телеуправления мобильного робота состоит из монитора, ЭВМ и пульта управления. Устройство управления включает два джойстика: первый джойстик управляет движением платформы, второй - поворотом телекамеры. Связь с роботом осуществляется по радио-каналу Bluetooth.

Сигналы с датчиков и видеоизображение, полученное от камеры мобильного робота, выводится на экран монитора в режиме реального времени. На основе этих данных оператор формирует управляющие команды с помощью пульта управления. Общая структура системы представлена на рисунке 2. Все управляющие команды задаются джойстиками. ЭВМ формирует пакеты управляющих команд и передаёт их по беспроводному радиоканалу связи Bluetooth (радиус действия Bluetooth 10 метров), после чего управляющие команды подаются на контроллеры, которые управляют приводами колёс и приводами камеры.

Информация о положении платформы мобильного робота в пространстве предоставляется инерциальной навигационной системой. Данный мобильный робот имеет следующий набор датчиков:

1. Цифровой компас CMPS03, позволяющий измерять угол курса с точностью до 0.1°. Он показывает угловое отклонение мобильного робота от магнитного северного полюса Земли.

2. Четыре энкодера, установленные на выходных валах каждого привода колес мобильного робота. Их точность измерения составляет 10 импульсов/оборот. При этом направление вращения не различается. Для определения направления вращения колес в навигационной системе дополнительно учитываются сигналы, подаваемые на их драйверы.

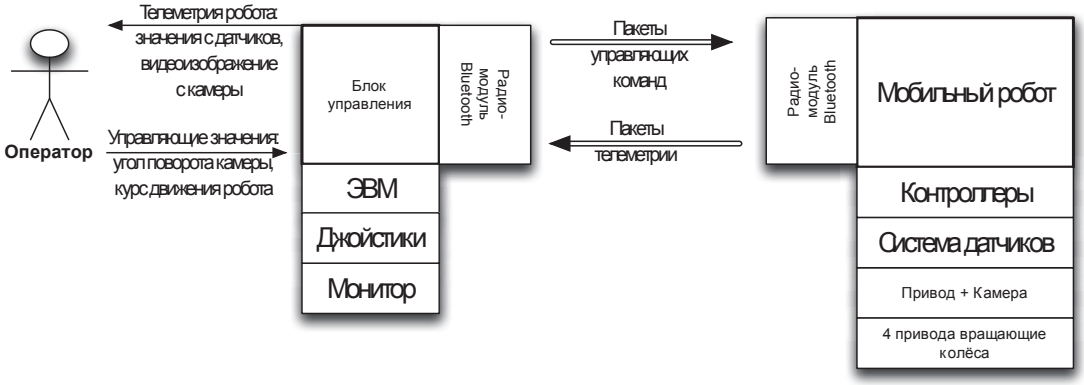


Рисунок 2 – Общая структура системы

3 Разработка системы телеуправления движением мобильного робота

Для решения поставленных в работе задач был разработан специальный программный модуль, который внедрен в систему телеуправления мобильного робота. Этот программный модуль связывает команды управления движением мобильного робота с вектором ориентации взгляда (оптической осью) телекамеры, установленной на его корпусе. Для решения поставленной задачи, необходимо автоматически повернуть мобильную платформу так, чтобы обеспечить движение робота по заданному оператором курсу. При этом в процессе поворота робота сервоприводы камеры должны поворачиваться в обратную сторону для обеспечения стабилизации ориентации взгляда камеры по углу рысканья.

Расположение мобильного робота на плоскости (в абсолютной системе координат) показано на рисунке 3.

На рисунке 3 введены следующие обозначения: $\vec{V}$ – вектор ориентации платформы, $\vec{K}$ – вектор ориентации камеры, совпадающий с ее оптической осью, θ - угол ориентации платформы относительно оси x, α - угол ориентации камеры относительно оси x, γ – угол поворота выходного вала сервопривода с установленной на нем камерой.

Вектора, соответствующие управляющим командам джойстика в системе координат мобильного робота: s_0 - вектор команды «Движение вперёд», совпадающий с вектором ориентации платформы, l_0 – вектор команды «Движение налево», r_0 – вектор команды «Движение направо». Вектора, соответствующие управляющим командам джойстика в системе координат оператора мобильного робота, связанной с ориентацией оптической оси камеры: s_1 – вектор команды «Движение вперёд» совпадающий с вектором ориентации оптической оси камеры, l_1 – вектор команды «Движение налево», r_1 – вектор команды «Движение направо», $\vec{C}$ – вектор команды управляющей курсом движением мобильного робота, χ – угол между вектором $\vec{C}$ и вектором управляющей команд «Движение вперёд» s_1 .

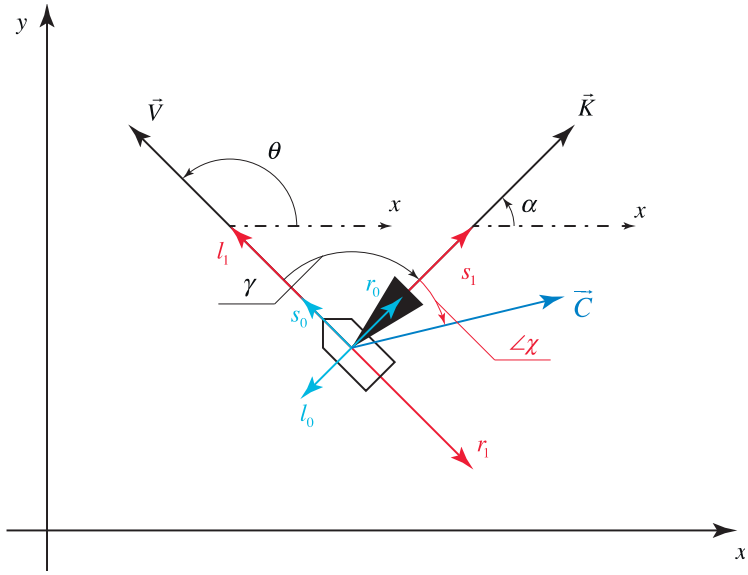


Рисунок 3 – Расположение мобильного робота на плоскости

Для решения поставленной в работе задачи необходимо преобразовать управляющие движением мобильного робота команды (s_1, l_1, r_1) из системы координат, связанной с ориентацией оптической оси камеры, в соответствующие им управляющие команды (s_0, l_0, r_0) в системе координат мобильного робота. При этом необходимо учесть, что угол ориентации камеры α не должен изменяться в процессе поворота платформы для снижения психологической нагрузки на оператора.

Угол желаемого курса мобильного робота рассчитывается по формуле:

$$\theta^* = \theta \pm \gamma \pm \chi .$$

4 Алгоритм работы программного модуля

В ходе решения поставленной в работе задачи была получена кинематическая модель системы, разработан управляющий алгоритм и реализующий его программный модуль, который позволяет повернуть платформу на угол, соответствующий управляющей команде оператора с учётом угла ориентации камеры. В процессе поворота платформы обеспечивается стабилизация ориентации камеры по углу рысканья.

Разработанный в работе алгоритм включает в себя следующие этапы:

1. Оператор с помощью пульта управления задает угол курса движения мобильного робота. Основная программа телеуправления запускает выполнение программного модуля.

2. Программный модуль вычисляет угол ориентации взгляда камеры в абсолютной системе координат. С учётом ориентации оптической оси камеры рассчитывается угол курса движения робота.

3. Если угол ориентации платформы не равен рассчитанному углу курса движения робота, то платформа выполняет разворот на месте до тех пор, пока это условие не выполнится.

4. Если угол ориентации платформы равен рассчитанному углу курса движения робота, то программный модуль прекращает свою работу. Далее продолжается выполнение основного тела программы телеуправления, и робот начинает прямолинейно двигаться по заданному курсу.

Полученный алгоритм в дальнейшем был исследован на модели и на реальном мобильном роботе.

5 Результаты экспериментов

Разработанный алгоритм, реализованный в виде программного модуля, был исследован на мобильном роботе с четырьмя независимо вращаемыми колёсами. При этом задача мобильного робота заключалась в движении вперёд в направлении, совпадающем с направлением оптической оси камеры. Экспериментальные данные представлены на рисунке 4.

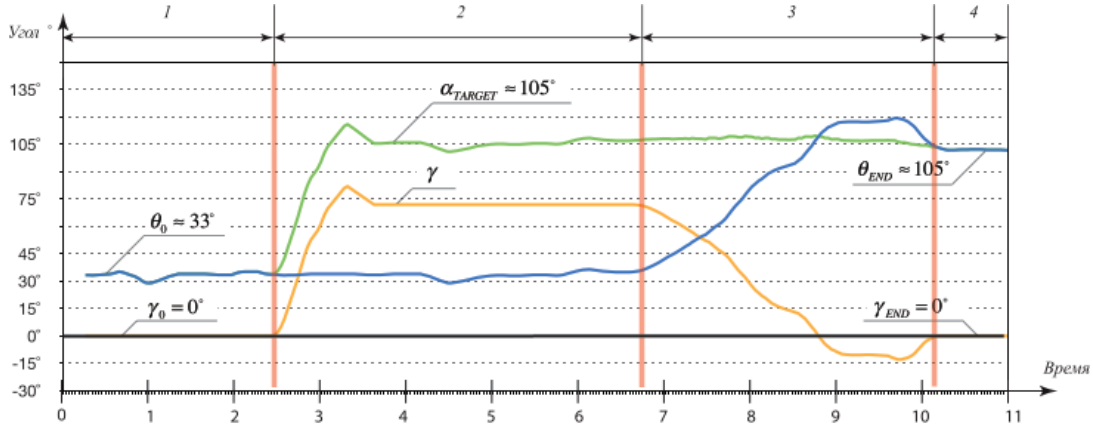


Рисунок 4 – Сигналы с датчиков мобильного робота

Процесс эксперимента можно разделить на 4 этапа:

1 этап - платформа стоит на месте, угол ориентации камеры в системе координат платформы $\gamma_0 = 0^{o}$, платформа повёрнута на угол $\theta_0 \approx 33^{o}$ в абсолютной системе координат (значение снято с цифрового компаса);

2 этап - оператор поворачивает камеру и фиксирует её по углу $\alpha_{TARGET} \approx 105^{o}$;

3 этап - оператор нажимает клавишу «движение вперёд» и запускает выполнение программного модуля, в результате платформа поворачивается на заданный курсовой угол;

4 этап - достигнув заданного угла $\theta_{END} = \theta_{TARGET} \approx 105^{o}$, платформа прекратила поворот на месте и начала прямолинейное движение в заданном направлении.

Таким образом, выполненные исследования полностью подтвердили работоспособность и эффективность разработанного алгоритма.

Заключение

Предложенная в работе система позволяет автоматически учитывать ориентацию телекамеры, установленной на корпусе мобильного робота, при формировании команд для управления движением робота. При этом разработанный программный модуль автоматически поворачивает мобильную платформу так, чтобы обеспечить движение робота по заданному оператором курсу, а в процессе поворота робота камера поворачивается в обратную сторону для обеспечения стабилизации ориентации камеры в пространстве. В результате значительно снижается психологическая нагрузка на оператора мобильного робота, что повышает производительность его работы.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Дальневосточного федерального университета и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-08-01344).

Список литературы

[1] Мартыненко Ю.Г. Управление движением мобильных колёсных роботов. Москва: Изд-во «Открытые системы», 2005. 79 с.

[2] K. Schilling, F. Driewer. Remote control of mobile robots for emergencies // Proc. of 16 IFAC World Congress. Prague, Czech Rep., 2005. pp. 1165-1165.

[3] Arbnor Pajaziti, Ka C Cheok, Xhevahir Bajrami. Semi Autonomous Mobile Robot for Mine Detection // Proc. of 11th International Advanced Robotics Programme (IARP) Workshop HUDEM. Šibenik, Croatia, 2013. pp.1-4.

[4] Филаретов В. Ф., Кацурин А. А. Метод полуавтоматического позиционного управления манипулятором с помощью телекамеры, изменяющей пространственную ориентацию своей оптической оси // Робототехнические системы. Приложение к журналу: Мехатроника, автоматизация, управление, № 9, 2008. С. 15-22.

[5] Филаретов В. Ф., Кацурин А. А., Пугачев Ю.А. Метод полуавтоматического комбинированного управления манипулятором с помощью подвижной телекамеры // Мехатроника, автоматизация, управление, № 2, 2009. С. 38-45.

[6] Bruno Siciliano. Handbook of Robotics / Bruno Siciliano, Ousamma Khatib. Berlin, Springer, 2007. 1591 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИМ СИСТЕМАМ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ

А.Е. Колоденкова

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул.К. Марка, 12, Россия
anna82_42@mail.ru
факс: +7 (347) 272-29-18

Ключевые слова: *информационно-управляющая система, формирование требований, моделирование процесса, нечеткие сети Петри.*

Abstract

The questions of design modeling of the process of formation of requirements to management-information systems nuclear power plants with using the mathematical apparatus of Petri nets are being considered.

Введение

Процесс формирования требований к информационно-управляющим системам (ИУС) атомных станций является сложным технологическим процессом, обеспечивающим качественный конечный результат [1]. Поскольку качество и своевременность сформированных требований к ИУС зависит от большого количества случайных факторов (неполнота и неточность исходных данных, нехватка исполнителей требуемой квалификации, часто изменяющиеся требования заказчика и др.), которые усложняют принятие управленческих решений, то необходимо применять методологии имитационного моделирования. Одним из перспективных вариантов формального описания и анализа имитационных моделей является использование методологии сетей Петри.

В настоящей работе рассматривается обобщенная схема процесса формирования требований к ИУС атомных станций, исследованы поведенческие свойства сетей Петри при моделировании процесса формирования требований.

1 Ключевые понятия при моделировании процесса формирования требований к информационно-управляющим системам

В основе предлагаемого подхода к формированию требований к созданию ИУС лежит обобщенная модель, представленная на рисунке 1.

Здесь ЖЦ ИУС предлагается разделять на следующие этапы:

1) Этап формирования концепции ИУС предваряет инициацию работ над проектом. Формирование требований к ИУС включает выяснение области применения, описания системных сервисов, определение аппаратных ограничений системы и т.д.
2) Этап проектирования и изготовления ИУС включает определение состава системы, функциональности основных модулей, инструментальных средств, методик и методологий, по которым будет проводиться разработка, проверку выполнения требований безопасности, выделение наиболее значимых рисков, всестороннее исследование функциональности разработанных модулей и системы в целом, степень соответствия разработанным требованиям.

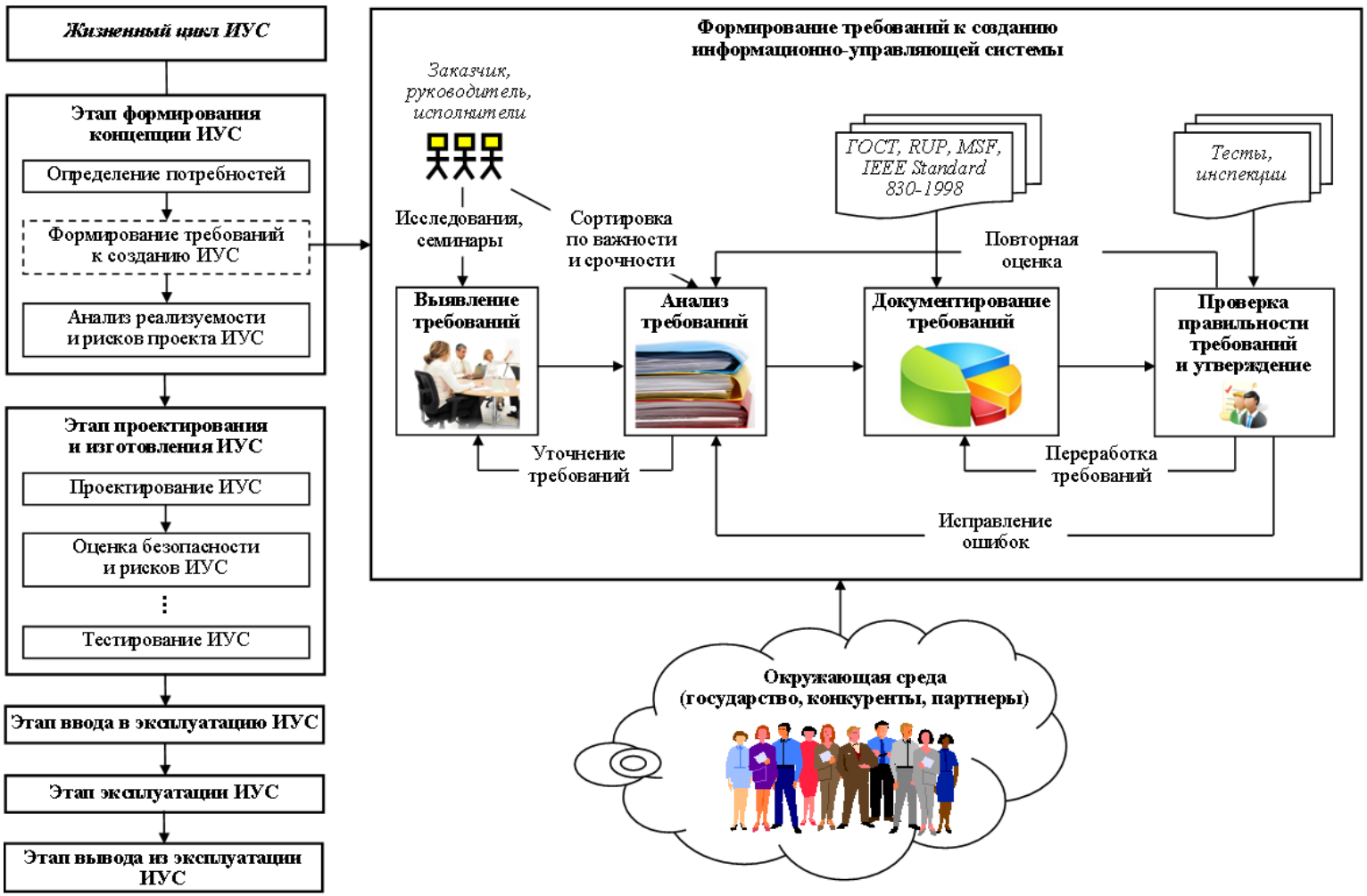


Рисунок 1 – Обобщенная схема процесса формирования требований

3) *Этап ввода в эксплуатацию ИУС* включает в себя испытания ИУС и опытную эксплуатацию в эксплуатирующей организации.
4) *Этап эксплуатации ИУС* – применение системы для удовлетворения потребностей эксплуатирующей организации.
5) *Этап вывода из эксплуатации ИУС* позволяет вывести из эксплуатации и утилизировать систему.

Из рисунка 1 видно, что все действия выполняются попеременно, поэтапно и повторяются. Работая с заказчиками, руководитель проекта задает вопросы, получает ответы и *выявляет требования*. Обработав совместно с исполнителями полученную информацию, руководитель классифицирует ее по различным категориям и соотносит потребности заказчика с возможными требованиями к ИУС, т.е. осуществляется *анализ требований*. Затем оформляет информацию от заказчика в виде документов, диаграмм и схем (*документирование требований*), а затем предлагает представителям заказчика и пользователей подтвердить, что написанный текст (алгоритм) точен и полон, и попросит исправить возможные ошибки (*проверка правильности требований и утверждение*). Заметим, что из-за разнообразия проектов по созданию ИУС, шаблонного подхода к формированию требований не существует, а также процесс уточнение требований может выполняться при необходимости.

Далее рассматривается моделирование процесса формирования требований к ИУС атомных станций с использованием математического аппарата сетей Петри.

2 Моделирование процесса формирования требований к информационно-управляющим системам

Сети Петри (СП) являются инструментом для математического моделирования и исследования сложных систем.

Сеть Петри определяется как пятерка [3, 4]

$<P, T, I, O, \mu>$,

где $P = \{p_1, p_2, \ldots, p_n\}$ – конечное множество позиций;

$T = \{t_1, t_2, \ldots, t_m\}$ – конечное множество переходов;

I – входная функция переходов;

O – выходная функция переходов;

μ – вектор маркировки.

Модель процесса формирования требований к ИУС атомных станций представлена на рисунке 2.

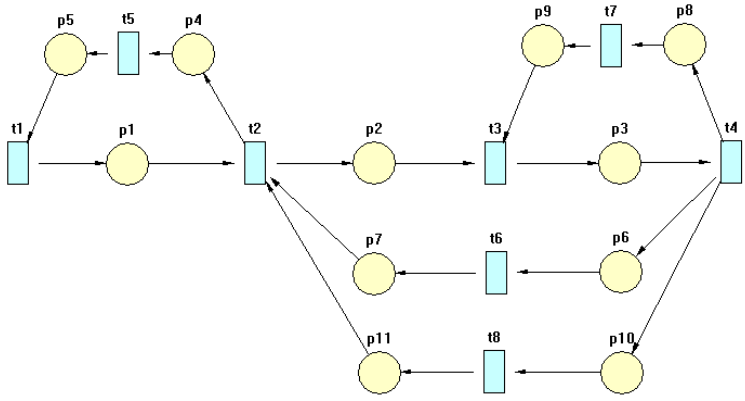


Рисунок 2 – Сеть Петри, моделирующая процесс формирования требований к ИУС атомных станций

Из рисунка 2 видно, что модель содержит 11 позиций и 8 переходов: $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9, p_{10}, p_{11}\}$, $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8\}$.

Элементами множества переходов P являются следующие события: p_1 – выявленные требования; p_2 – проанализированные требования; p_3 – задокументированные требования; p_4 – поступившие требования для уточнения; p_5 – уточненные требования; p_6 – поступившие требования для повторной оценки; p_7 – новая оценка требований; p_8 – поступившие требования для переработки; p_9 – переработанные требования; p_{10} – поступившие требования для исправления; p_{11} – исправленные требования.

Элементами множества позиций T являются следующие операции: t_1 – выявление требований; t_2 – анализ требований; t_3 –документирование требований; t_4 – проверка правильности требований и утверждение; t_5 – уточнение требований; t_6 – повторная оценка; t_7 – переработка требований; t_8 – исправление ошибок.

Далее проведем анализ инвариантов для приведенной СП (рисунок 2).

Сначала вычислим минимальное порождающее множество T-инвариантов, решая однородную систему уравнений $Ax = 0$, где A – матрица инцидентности сети Петри. Данное множество представлено одним вектором, который соответствуют последовательностям срабатывания переходов:

$T_1 = (1,1,1,1,1,1,1,1)$.

Затем решим однородную систему уравнений $A^T y = 0$, где A^T – транспонированная матрица инцидентности верифицируемой сети Петри. Вычисляем минимальное порождающее множество S-инвариантов:

$S_1 = (0,1,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0)$; $S_2 = (0,0,1,0,0,0,0,1,1,0,0)$;

$S_3 = (1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0)$; $S_4 = (0,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1)$.

Результаты анализа данных инвариантов позволяют установить следующие:

1) СП обладает свойством *устойчивости*, *повторяемости* (любая последовательность срабатываний переходов может повториться теоретически бесконечно число раз) и структурным свойством *живости*, поскольку все переходы покрываются ненулевыми координатами из множества T-инвариантов;
2) СП структурно *ограничена*, что следует из минимального порождающего множества S-инвариантов, т.е. все переходы СП покрываются ненулевыми координатами.
3) СП является *активной*, т.е. работоспособны все переходы и отсутствуют не нужные позиции и переходы.
4) Поскольку характер процесса формирования требований к ИУС атомных станций в большинстве случаев нельзя строго формализовать, то целесообразно применить нечеткие временные сети Петри.

3 Моделирование процесса формирования требований к информационно-управляющим системам с помощью нечеткой временной сети Петри типа C_{CT^T}

Нечеткой временной сетью Петри типа C_{CT^T} называется подкласс временных сетей, который определяется как [4]

$C_{CT^T} = (N, m_0, z_T, s_T)$,

где $N = (P, T, I, O)$ – структура нечеткой временной сети Петри, которая аналогична структуре ординарных СП и для которой I: $P \times T \to \{0, 1\}$ – входная функция переходов; O: $T \times P \to \{0, 1\}$ – выходная функция переходов;

$m_0(m_1^0, m_2^0 ... m_n^0)$ – вектор начальной маркировки, каждый компонент m_i^0 которого представляет собой трапециевидные нечеткие интервалы $M_{T_i} < a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, a_{4i} >_T$, где a_1 –

нижние границы интервала (пессимистическая оценка), [a_2, a_3] – интервалы наиболее ожидаемых (возможных) значений анализируемых параметров, a_4 – верхние границы интервала (оптимистическая оценка), $\forall\, i \in \{1, 2,\ldots,n\}$;

$z_T(z_1, z_2 \ldots z_n)$ – вектор параметров временных задержек маркеров в позициях нечеткой временной сети Петри, каждый компонент z_i которого представляет собой трапециевидные нечеткие интервалы $Z_{T_i} < a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, a_{4i} >_T$, $\forall\, i \in \{1, 2,\ldots,n\}$;

$s_T(s_1, s_2 \ldots s_u)$ – вектор параметров времен срабатывания разрешенных переходов нечеткой временной сети Петри, каждый компонент z_j которого представляет собой трапециевидные нечеткие интервалы $S_{T_j} < a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, a_{4j} >_T$, $\forall\, j \in \{1, 2,\ldots,u\}$.

Используя (1), представим процесс формирования требований к ИУС атомных станций с помощью нечеткой временной сети Петри (рисунок 3). Где под маркерами будем понимать требования, которые накапливаются (стоят в очереди).

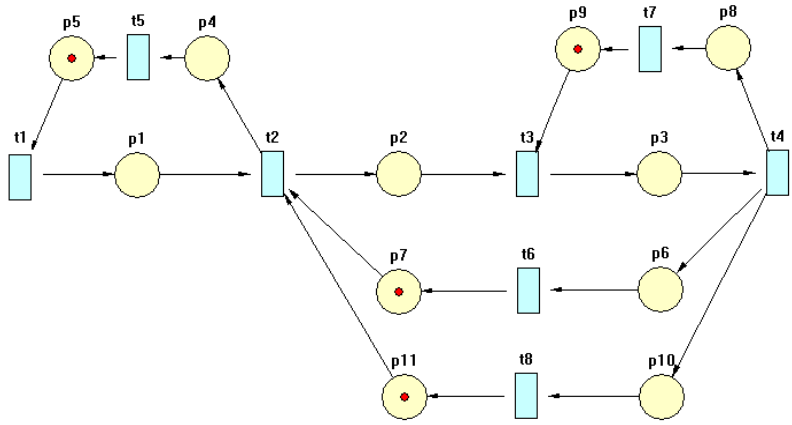


Рисунок 3 – Сеть Петри, моделирующая процесс формирования требований к ИУС атомных станций при помощи нечеткой временной сети Петри

Предположим, что для СП, представленной на рисунке 3, элементы вектора начальной маркировки заданы в виде трапециевидных нечетких интервалов: $m_5^0 = <0, 1, 2, 3>$, $m_7^0 = <1, 2, 3, 4>$, $m_9^0 = <0, 1, 3, 4>$, $m_{11}^0 = <0, 1, 2, 4>$, $m_1^0 = m_2^0 = m_3^0 = m_4^0 = m_6^0 = m_8^0 = m_{10}^0 = <0, 0, 0, 0>$. Например, $m_5^0 = <0, 1, 2, 3>$ означает, что возможность наличия одного маркера в начальной маркировке m_0 в позиции $p_5 \in P$ представляет собой трапециевидные нечеткие интервалы, для которого $a_1 = 0$, $a_2 = 1$, $a_3 = 2$, $a_4 = 3$. Остальные компоненты векторов интерпретируются аналогичным образом.

Время задержек маркеров задано в виде трапециевидных нечетких интервалов: $z_1 = <3, 4, 6, 7>$, $z_2 = <1, 2, 3, 4>$, $z_3 = <2, 3, 4, 5>$, $z_4 = <0, 1, 2, 4>$, $z_5 = <0, 1, 2, 3>$, $z_6 = <0, 1, 2, 4>$, $z_7 = <0, 1, 2, 3>$, $z_8 = <0, 1, 3, 6>$, $z_9 = <0, 1, 2, 3>$, $z_{10} = <0, 1, 3, 7>$, $z_{11} = <0, 1, 2, 3>$.

Время срабатывания активных переходов задано в виде трапециевидных нечетких интервалов: $t_1 = <0, 1, 2, 3>$, $t_2 = <1, 2, 3, 4>$, $t_3 = <1, 2, 3, 6>$, $t_4 = <2, 3, 4, 6>$, $t_5 = <1, 2, 3, 6>$, $t_6 = <1, 2, 4, 5>$, $t_7 = <1, 2, 5, 7>$, $t_8 = <2, 3, 6, 8>$.

Причем время задержек маркеров и время срабатывания переходов могут выражаться в минутах, часах, днях.

Динамика изменения маркировок нечеткой временной сети Петри после момента ее запуска подчиняется правилам [4], отражающих специфику введенной нечеткости в начальную маркировку, во времена задержки маркеров в позициях и во времена срабатывания активных переходов.

Проведенный анализ представленной СП на рисунке 3 показал, что СП обладают свойством *ограниченности* и *достижимостью тупиковой разметки*. Ограниченность является следствием безопасности (безопасное поступление требований, без потери вновь поступивших требований). Достижимость тупиковой разметки – это конечность функционирования структуры, т.е. процессы, обладающие данным свойством, рано или поздно перестанут функционировать. Таким образом, при формировании требований такое свойство должно отсутствовать, это продлит работу данного процесса без ошибок и зависаний.

Проблема борьбы с тупиками становится все более актуальной и сложной в настоящее время. При формировании требований к ИУС исполнители стараются проанализировать возможные неприятные ситуации, используя специальные модели и методы [5].

Заключение

В настоящей работе построены ординарная и нечеткая временная сети Петри для моделирования процесса формирования требований к ИУС атомных станций, позволяющие обнаруживать ошибки и слабые места в данном процессе, тем самым минимизируя затраты на их исправление. Проводится анализ сетей с применением методов линейной алгебры и теории нечетких множеств. Данный подход по моделированию процесса формирования требований к ИУС опробован (внедрен) в инновационно-технологическом центре “Ядерная энергетика” ЮФУ.

Список литературы

[1] Коробкин В.В., Колоденкова А.Е. Диагностика проектов по разработке программного обеспечения на основе использования прецедентов // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD-2013: Труды седьмой международной конференции. – М.: ИПУ РАН, 2013. Т.1. – С. 176-182.

[2] Коробкин В.В., Колоденкова А.Е. Один из подходов к оценке безопасности и рисков информационно-управляющих систем для атомных станций, 2014.

[3] Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984.

[4] Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.

[5] Омаров О.М. Теория вычислительных процессов и структур. Учебное пособие. – Махачкала: РИО ДГТУ, 2005. – 268 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕРВОПРИВОДА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

К.Ю. Котов, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, М.А. Соболев, М.Н. Филиппов, А.П. Ян

Институт автоматики и электрометрии СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Коптюга 1, Россия
kotov@idisys.iae.nsk.su
тел: +7 (383) 333-26-25

Ключевые слова: *испытательный стенд, сервопривод, идентификация*

Abstract
This paper describes the test bench, designed to obtain the basic characteristics and identification of parameters of servo mathematical model based on experimental data. The results of experiments with small-size servos and comparative analysis of the data are presented.

Введение

Малогабаритные быстродействующие сервоприводы используются в современных высокоточных системах управления подвижными объектами: рулевыми системами летательных аппаратов, автоматическими манипуляторами, роботами с подвижными элементами конструкции и др.

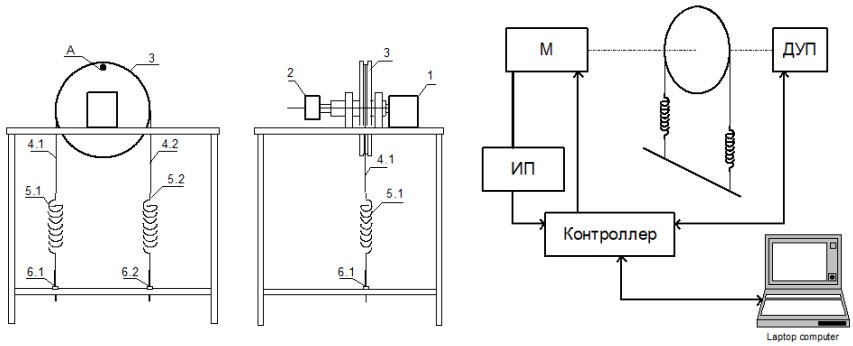
Для корректного выполнения процедуры синтеза системы управления таких объектов необходима информация о параметрах и структуре математического описания сервопривода. В отличие от предоставляемых производителем численных значений параметров сервопривода адекватная математическая модель позволяет провести анализ управляемости и устойчивости разрабатываемой системы, а также вычислить спектр необходимых характеристик, таких как: время перекладки и вращающий момент вала, частотные характеристики под статической и динамической нагрузкой и пр.

В работе [1] решена задача определения спектра необходимых характеристик сервопривода, а также разработки и идентификации полноценного математического описания сервопривода на основе экспериментальных данных, полученных на созданном испытательном стенде.

В данной работе показано, что для более точного описания переходных процессов во всем доступном рабочем диапазоне перекладки вала целесообразно использовать нелинейное математическое описание привода.

1 Описание испытательного стенда

Схема испытательного стенда, позволяющего проводить измерения момента удержания статической или переменной нагрузки на валу, статической ошибки, энергопотребления и частотных характеристик привода, представлена на рисунке 1.



а б

Рисунок 1 – Испытательный стенд: а – схематическое изображение; б – функциональная схема

Привод 1 закреплен на неподвижной горизонтальной поверхности и связан посредством несущей втулки с датчиком углового положения 2. Втулка закреплена в двух шарикоподшипниках и обеспечивает передачу вращающего момента на сменный шкив 3. В точке А шкива закреплены тросики 4, позволяющие передавать статический или переменный момент на шкив. Для возможности установки нужного натяжения пружин 5 предусмотрены подстроечные винты 6, рисунок 1а.

Функциональная схема испытательного стенда приведена на рисунке 1б. С выхода контроллера управляющий сигнал (ШИМ) поступает на привод М. Поворот вала регистрируется датчиком угловых перемещений (ДУП). Также выполняется измерение падения напряжения на токовом шунте, включенном в цепь источника питания (ИП) привода, что позволяет оценить среднее значение тока или энергопотребление в цепи питания привода.

2 Описание сервопривода

Структурная схема сервопривода, а также уравнения, описывающие процессы в двигателе постоянного тока с независимым возбуждением и в замкнутой системе с П-регулятором приведены в работе [1].

Уравнения замкнутой системы в операторной форме имеют вид:

$$\begin{cases} \omega = \dfrac{rK_d^2}{T_м p}\left(M - M_c\right), \\ M = \dfrac{1/K_d r}{T_я p + 1}\left(U - \dfrac{1}{K_d}\omega\right); \end{cases}$$

$$\varphi = \frac{n\omega}{p};$$

$$U = K_p\left(\varphi_r - \varphi\right).$$

Здесь r – полное активное сопротивление якорной цепи (Ом); ω – механическая угловая скорость вращения ротора (рад/с); M – момент вращения, создаваемый двигателем (Н·м); M_c – момент статического сопротивления нагрузки, приведенный к валу двигателя (Н·м); $K_d = K\Phi$ (рад/(В·с)), где K – безразмерный конструктивный коэффициент двигателя, Φ – магнитный поток возбуждения двигателя, создаваемый постоянным магнитом (Вб); $T_м$ – электромеханическая постоянная времени привода (с); $T_я$ – электромагнитная постоянная времени якорной цепи (с); U – напряжение на обмотке якоря двигателя (В); φ – угол поворота выходного вала

сервопривода (рад); n – передаточное число редуктора; K_p – коэффициент усиления регулятора (В/рад); φ_r – желаемое значение угла поворота выходного вала (рад).

Решив уравнения (1)-(3) относительно φ, получим:

$$\varphi(p) = \frac{\varphi_r(p) - r\dfrac{K_d}{K_p}(T_я p + 1)M_c}{H_1(p)},$$

где

$$H_1(p) = T_я T_м T_c p^3 + T_м T_c p^2 + T_c p + 1,$$

$$T_c = \frac{1}{nK_d K_p}.$$

Напряжение U на обмотке якоря двигателя не может превышать некоторого максимального значения U_{max}, например, равного напряжению питания внешнего источника. Ограничение сигнала управления U в системе обеспечивается нелинейным звеном с единичным коэффициентом усиления и ограничением, рисунок 2.

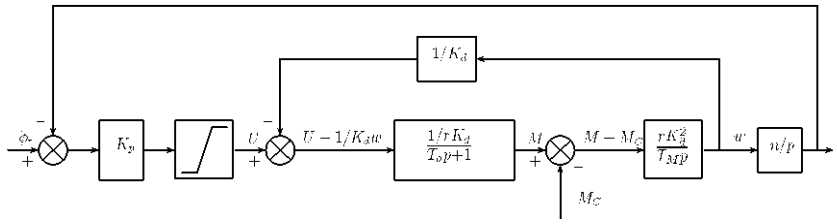


Рисунок 2 – Структурная схема сервопривода

В случае $|U|<U_{max}$ поведение системы определяется уравнением (4), в случае $|U|\geq U_{max}$ управляющий сигнал, поступающий на привод, не зависит от угла φ и переходные процессы привода определяются уравнением (1), при $U=\pm U_{max}$. Решив (1) относительно ω, с учетом (2), получим:

$$\varphi(p) = \frac{\dfrac{U_{max}}{K_p} - r\dfrac{K_d}{K_p}(T_я p + 1)M_c}{H_1(p) - 1},$$

Характеристический полином системы $H_1(p)$ задает динамические свойства системы сервопривода.

Идентификация параметров модели (4), (7) выполнена посредством измерения отклика системы на входное воздействие в виде ступенчатой функции.

В качестве полинома $H_1(p)$ используется характеристический полином на базе бинома Ньютона:

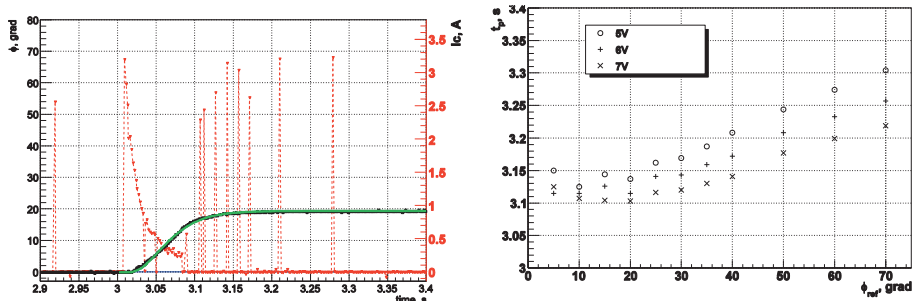
$$H_1(p) = (p + \omega_0)^n,$$

где $\omega_0 > 0$ – параметр полинома.

В данном случае полином $H_1(p)$ имеет кратные вещественные отрицательные корни, $p_i = -\omega_0$, что обеспечивает монотонный переходный процесс без перерегулирования. Сравнение

(5) и (8) позволяет получить постоянные времени системы: $T_м = 1/\omega_0$, $T_c = 3/\omega_0$, $T_я = 1/3\omega_0$ [1]. Постоянные времени $T_я$, $T_м$, T_c определяются на испытательном стенде.

3 Экспериментальные результаты



а б

Рисунок 3 – Переходная характеристика и ток (а), время реального переходного процесса в зависимости от задающего воздействия (б)

На рисунке 3а показаны результаты аппроксимации (сплошная кривая) экспериментальной переходной характеристики (точечная кривая) и величина потребляемого тока (пунктирная кривая) в функции времени при подаче ступенчатого воздействия $\varphi_r = 20°$, изменяющегося скачкообразно в момент времени t = 3.0 с. Величина полного запаздывания при отработке входного воздействия непостоянна и составляет 15-20 мс.

В работе [2] показано, что в определенном диапазоне изменения угла поворота выходного вала привода правомерным является использование линейной модели привода (4), построенной на базе полинома $H_1(p)$ при n = 3. Диапазон изменения угла φ, в этом случае, соответствует постоянству реального времени переходного процесса и не охватывает весь рабочий диапазон привода, рисунок 3б.

Воспользуемся нелинейной структурой привода, задаваемой уравнениями (4) и (7). Для оценки величины запаздывания введен дополнительный параметр T_d, соответствующий простому сдвигу переходной характеристики по времени. Параметр k описывает амплитуду входного воздействия и является масштабирующим множителем переходной характеристики. При этом значения параметров ω_0, и T_d получены из требования наилучшего приближения к реальной переходной характеристике, методом наименьших квадратов. Значения полученных параметров и величина

$$G^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[\left(h_{\exp}(t_i) - h_{teor}(\omega_0, T_d, t_i)\right)\right]^2,$$

характеризующая отклонение теоретической переходной характеристики h_{teor} от реальной h_{exp} для дискретных моментов времени t_i, сведены в таблицу 1 (величина G^2_{nonlin}).

Таблица 1

φ_r	k	$t_{\text{пп}}$	T_d	G^2_{lin}	G^2_{nonlin}
5.	4.85	3.150	3.000	0.076	0.059
10.	9.49	3.125	3.000	0.036	0.026
15.	14.64	3.144	3.002	0.056	0.059
20.	19.46	3.137	3.012	0.048	0.058
25.	24.61	3.162	3.021	0.197	0.064
30.	29.89	3.169	3.025	0.719	0.068
35.	34.84	3.187	3.025	3.355	0.067
40.	40.06	3.208	3.025	10.117	0.089
50.	51.41	3.244	3.025	43.802	0.054
60.	61.90	3.274	3.025	106.752	0.067
70.	71.79	3.304	3.025	206.274	0.079

Для сравнения в таблице 1 приведены результаты аппроксимации переходной характеристики с использованием только линейной модели (4) – величина G^2_{lin}. Из полученных результатов видно, что нелинейная модель (4), (7) хорошо описывает переходные процессы во всем доступном диапазоне изменения угла поворота выходного вала привода. Величина среднеквадратичного отклонения между моделью и экспериментальными данными составила около 5%.

Для исследования полученной нелинейной системы могут быть использованы методы анализа релейных систем приводов [3].

Заключение

Экспериментальные результаты показали, что для описания переходных процессов во всем доступном рабочем диапазоне перекладки вала сервопривода целесообразно использовать нелинейную математическую модель.

Представленные математическая модель сервопривода и испытательный стенд нашли применение при создании модели летательного аппарата.

Список литературы

[1] К.Ю. Котов, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, М.А. Соболев, М.Н. Филиппов, А.П. Ян. Разработка и идентификация модели сервопривода на основе экспериментальных данных // Автометрия, 2013. Т.49, №6. С. 42-50.

[2] К.Ю. Котов, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, М.А. Соболев, М.Н. Филиппов, А.П. Ян. Стенд для разработки и идентификации моделей сервоприводов // Индустриальные информационные системы – ИИС-2013. Всероссийская конференция (Новосибирск, 24-28 сентября 2013 г.): Сборник тезисов докладов / Новосибирск, КТИ ВТ СО РАН, 2013. С. 33-34.

[3] В.А. Елисеева, А.В. Шинявский. Справочник по автоматизированному электроприводу. М.: Энергоатомиздат, 1983. 616 с.

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ И АНАЛИЗЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ОБСТАНОВКЕ ПОМЕХ

А.Г. Куприн, А.В. Медведев

Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева
660014, Российская Федерация, г. Красноярск,
проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31
kprn@mail.ru
тел. 89130406929

Ключевые слова: *дуальное управление, линейный динамический объект, непараметрическое управление, непараметрический регулятор, И – регулятор*

Abstract

The current work represents the control of a linear dynamic system in the conditions of nonparametric indeterminacy ie under conditions where known only qualitative characteristics of the system. Under this approach, nonparametric identification of the object is supposed, that is, to restore its transition and weighting functions , followed by non-parametric estimation of the Duhamel integral , which is a model of the object . The next stage of the I - regulator construction is non-parametric evaluation of the inverse operator of the system. Results of a comparison of I - regulator with standard for control theory regulators are presented.

Введение

Современная теория управления в значительной степени относится к классу параметрических. Это означает, что на этапе формулировки задачи, предполагается выбор некоторой параметрической структуры, описывающей процесс или управляющее устройство с точностью до параметров. В этом случае процесс адаптации сводится к оценке параметров данной структуры на основании поступающей текущей информации. Такой подход развивается в теории дуального управления [1] и теории адаптивных систем [2]. В настоящей статье предполагается другой, непараметрический, подход, предполагающий, что известны только качественные характеристики объекта, например то что он является линейным динамическим. Потребность в данном подходе продиктована практикой, так как часто априорной информации бывает недостаточно для обоснованного выбора параметрического класса моделей, поэтому приходится проводить серию экспериментов на объекте (часто длительных и дорогостоящих), чтобы качественно, с практической точки зрения, решить задачу идентификации. Предложенный ниже путь позволяет избежать «неудобной» задачи выбора параметрической структуры объекта.

Основное внимание в дальнейшем мы уделим задачам непараметрического дуального управления, причем нас будет интересовать, прежде всего, управление в условиях непараметрической неопределенности, а также случай, когда процесс может быть отнесен к классу линейных динамических.

1 Постановка задачи

Сначала рассмотрим довольно общую, идеализированную постановку задачи управления динамическим процессом. Если вид уравнения, описывающего процесс, не известен, то известные параметрические методы теории управления [1; 2] не применимы для решения задач идентификации и управления.

Введем оператор объекта А, описывающий процесс (помехи в данном случае отсутствуют)

(1) $x(t) = A < u(t) >$

Если существует оператор, обратный A , т. е. A−1 ,A−1A = I – единичный оператор, то

(2) $A^{-1}x(t) = A^{-1}A < u(t) >,\ u(t) = A^{-1}x(t)$.

Данный регулятор (2) может быть отнесен к категории идеальных (отсюда название И – регулятор), так как задав желаемую траекторию x(t)=x*(t) можно найти идеальное управление u*(t). Однако проблема состоит в том, что в большинстве случаев его построить нельзя, тем более что оператор A – неизвестен. Тем не менее, на практике в качестве регулятора можно использовать некоторый регулятор реализующий оператор $\overline{A} \approx A^{-1}$, такой что $\overline{A}A \approx I$, где $\overline{A}$ - непараметрическая оценка обратного оператора A^{-1} [3].

1 Алгоритмы дуального управления

Пусть объект описывается линейным дифференциальным уравнением неизвестного порядка. В этом случае при нулевых начальных условиях x(t) может быть вычислен согласно формуле (3):

(3) $x(t) = \int_0^t h(t-\tau)u(\tau)d\tau$,

где h(t) - оценка весовой функции системы.

Непараметрическая оценка переходной функции имеет вид[4]

(4) $k_s(t) = \frac{T}{SC_S}\sum_{i=1}^{S} k_i H(\frac{t-t_i}{C_S})$,

где T - период наблюдения, S - объем выборки, H(.) – колоколообразные (ядерные) функции, c_s –параметр размытости, удовлетворяющие некоторым условиям сходимости [4], k_i - выборочные значения переходной характеристики, получаемые экспериментально.

Непараметрическая оценка весовой функции линейной динамической системы восстанавливается не как оценка производной переходной функции объекта, а как производная ее оценки (4) и имеет вид[4]

(5) $h_s(t) = \frac{T}{SC_S}\sum_{i=1}^{S} k_i H'(\frac{t-t_i}{C_S})$.

Таким образом, непараметрическая модель процесса имеет вид

(6) $x_s(t) = \frac{T}{SC_S}\int_0^t \sum_{i=1}^{S} k_i H'(\frac{t-t_i}{C_S})u(\tau)d\tau$.

Ввиду того, что объект является линейным обратный оператор также является линейным [5]

(7) $u(t) = \int_0^t \nu(t-\tau)x^*(\tau)d\tau$,

где v(t) - весовая функция объекта в направлении «выход-вход», являющаяся производной переходной функции w(t) объекта в том же направлении. По видимому идея «снятия» переходной характеристики в направлении «выход-вход» была впервые высказана в [5]. Для того, чтобы получить w(t) необходимо «подать» на выход объекта сигнал в виде функции Хэвисайда и получить значения входа объекта представляющего собой значение переходной функции

в направлении «выход-вход». Отметим, что переходная характеристика в направлении «выход - вход» не может быть получена на реальном объекте, но переходную характеристику в направлении «выход- вход» можно «снять» на модели типа (6). Полагая x(t)=1(t) и подставляя ее в выражение (6) получим:

$$w_s(t) = \frac{1(t) - \sum_{\tau=0}^{\frac{t-1}{\Delta\tau}} h_S(t-\tau)w(\tau)\Delta\tau}{h(0)\Delta\tau}.$$

Обратная весовая функция восстанавливается аналогично (5)

$$\nu_s(t) = \frac{T}{SC_S}\sum_{i=1}^{S} w_i H'\left(\frac{t-t_i}{C_S}\right).$$

Таким образом, непараметрический алгоритм управления имеет вид

$$u_s(t) = \frac{T}{SC_S}\int_0^t \left(\sum_{i=1}^{S} w_i H'\left(\frac{t-\tau-t_i}{C_S}\right)\right) x^*(\tau)d\tau .$$

что соответствует выходу обратного оператора объекта при подаче на него x*(t).

2 Вычислительный эксперимент

Для вычислительного эксперимента был принят объект, описываемый дифференциальным уравнением второго порядка. Отметим, что вид уравнения для непараметрической теории управления остается неизвестным, но он необходим для имитации исследуемого объекта. Шаг дискретизации 0.1 секунда. Период наблюдения - 10 секунд.. Уравнение, имитирующее объект было принято в виде

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\frac{dx}{dt} + 3x = u(t).$$

При нулевых начальных условиях оценки обратной переходной и обратной весовой характеристик объекта имеют вид (рис. 1):

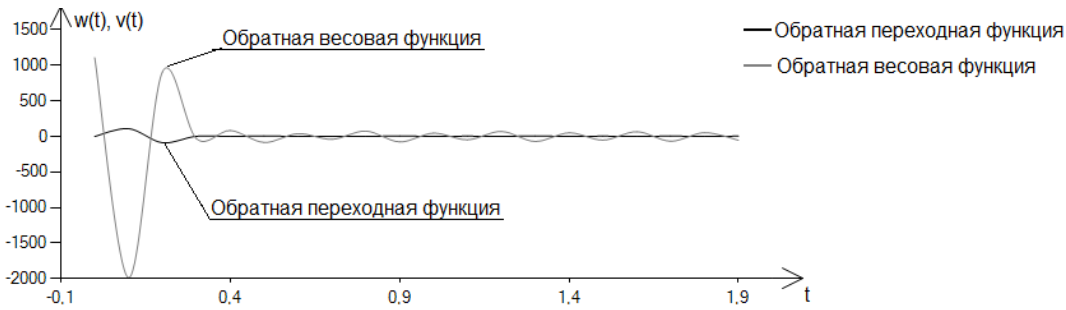


Рисунок 1 - Оценки обратных характеристик объекта (переходной, весовой функций)

Представленные на рис. 1 характеристики являются оценка обратных характеристик, а значит синтезированное данным регулятором управление будет отлично от идеального[6]. Для повышения качества управления целесообразно ввести некоторое корректирующее устройство (КУ), способное незначительно изменять уже полученное И - регулятором управление, фактически обеспечивая более «тонкую настройку» уже синтезированного регулятора. Схема управления приобретает следующий вид (рис. 2):

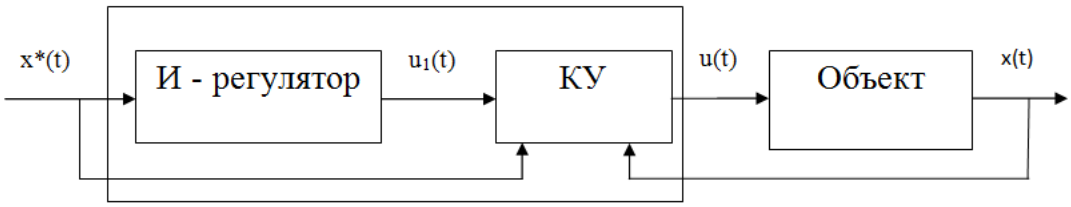


Рисунок 2 - Схема управления с обратной связью

Согласно данной схеме, задающее воздействие x*(t) поступает на И - регулятор, синтезирующий управляющее воздействие u_1, поступающее на корректирующее устройство, который на основе него и x*(t) улучшает полученное управляющее воздействие, синтезируя новое управляющее воздействие u(t), поступающее на объект. Таким образом, И - регулятор дает значение управляющего воздействия (в «грубом»), а корректирующее устройство несколько изменяет это значение на основании обратной связи, а точнее величины отклонения (x(t)-x*(t)), что в инженерном смысле соответствует корректировке $u_1(t)$ в «тонком» (рис.2). В качестве И - регулятора с обратной связью выступает совокупность И - регулятора и корректирующего устройства. В качестве корректирующего устройства могут быть приняты П, ПИ, ПИД законы.

На рис. 3 приведено сравнение выхода объекта при использовании И - регуляторов при наличии и отсутствии обратной связи при x*(t) в виде функции Хэвисайда. Для увеличения наглядности на рисунке отображен интервал [0,7;1,3] по оси ординат.

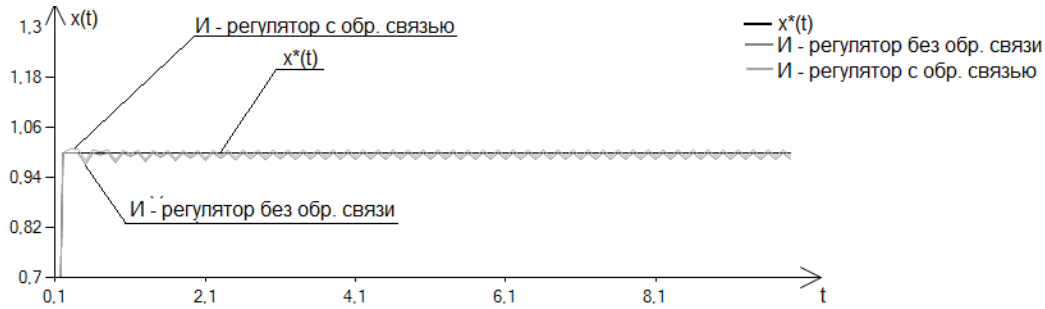


Рисунок 3 - Результат работы И – регулятора с обратной связью

В приведенном выше численном эксперименте результатом включения КУ в схему управления стало уменьшение среднеквадратического отклонения фактической траектории объекта от x*(t) практически в 2 раза (с 0,011 до 0,006).

Приведем сравнение результатов работы И - регулятора с обратной связью и ПИД – регулятора. Сравнение будет производить при наличии помех. На практике помехи могут быть во всех каналах, однако ограничимся рассмотрением помехи для управления $u_n(t)$ и для обратной связи $x_n(t)$. Помеху зададим в виде

(8) $$u_n(t) = u(t) + u(t)\psi_{n1}(t)\eta_u$$

$$x_n(t) = x(t) + x(t)\psi_{n2}(t)\eta_x,$$

где ψ_{n1}, ψ_{n2} - случайная равномерно распределенная на интервале [-1;1] величина, а η_u и η_x - некоторые коэффициенты определяющие уровень помех.

На рис. 4.а изображена ситуация, когда x*(t) имеет вид ступенчатой функции. Это соответствует ситуации, когда регулятору необходимо перевести объект из одного состояния в другое и поддерживать данное состояние в течение определенного промежутка времени.

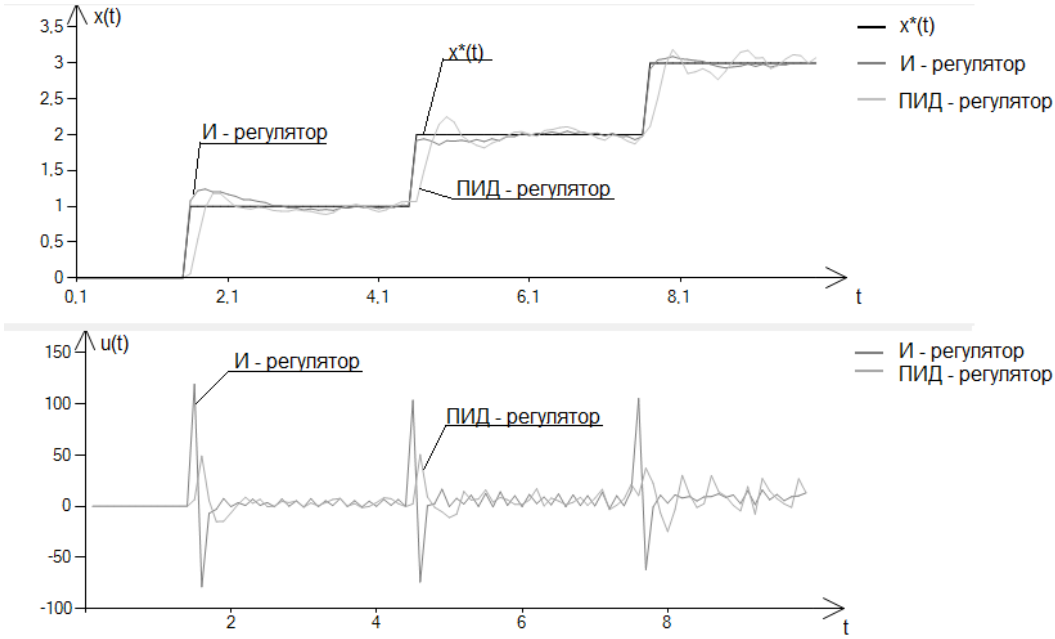


Рисунок 4 - Сравнение И - и ПИД - регуляторов при ступенчатом задании

Как можно видеть на рис 4.а. результат работы И - регулятора лучше практически в 4 раза (среднеквадратические ошибки 0.07 и 0.26 для И - регулятора и ПИД - регулятора соответственно). На рис 4.б. изображены значения управляющего воздействия синтезируемого регуляторами. Как видно из рисунка И - регулятор имеет значительное преимущество перед ПИД - регулятором.

В процессе численного исследования алгоритма был рассмотрен случай, когда x*(t)=sin(t) (рис. 5.а). Такой вид желаемая траектория x*(t) соответствует ситуации, когда x*(t) объекта непрерывно меняется. С целью увеличения наглядности коэффициенты, определяющие уровень помех, в данном эксперименте были повышены до 0,3.

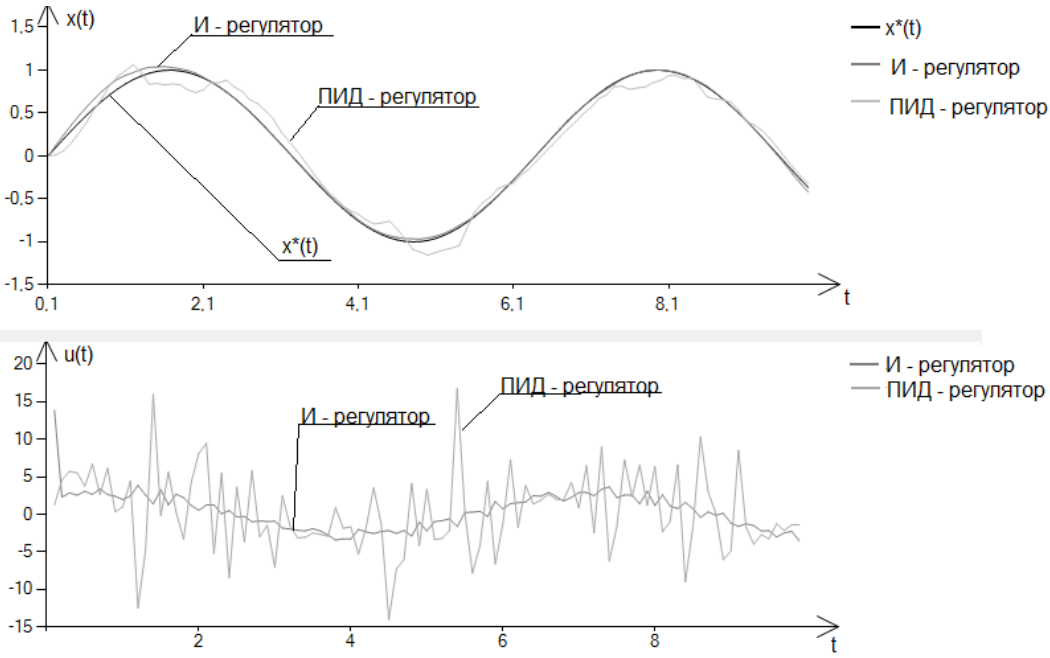


Рисунок 5 - Сравнение И - и ПИД - регуляторов при задании в виде синуса

В данных условиях И - регулятор обеспечивает траекторию объекта, практически совпадающую с x*(t). При этом отличия оценки обратных характеристик объекта от их аналитического значения несущественны по сравнению с изменением задания. И - регулятор показывает лучший результат. На рис. 5.б. изображены значения управляющих воздействий синтезированных регуляторами.

Способность И - регулятора обеспечивать траекторию практически совпадающую с x*(t) можно ярче проиллюстрировать результатами работы регулятора при случайном задании: задающее воздействие случайным образом меняется в интервале [-3;3] в каждый момент времени (рис 6). Иными словами, x*(t) генерируется датчиком случайных чисел, $x_i = \zeta_i \in [-3;3]$.Проведем следующий вычислительный эксперимент, который можно отнести к разряду «экзотических». Имеется ввиду изменение задающего воздействия x*(t) по равномерному случайному закону. В данном случае x*(t) генерировалось датчиком случайных чисел на каждом такте управления. Данный эксперимент проводился при отсутствии помех. Таким образом, цель непараметрического дуального управления состояла в поддержании этого задающего воздействия на каждом такте управления. Результаты эксперимента иллюстрируются рис.6.

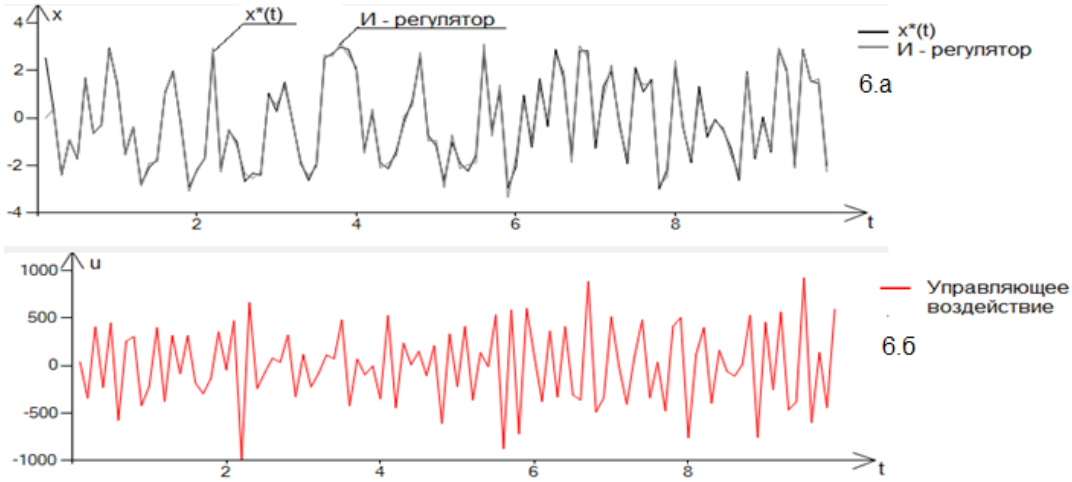


Рисунок 6 - Работа И - регулятора для случайного задания

Как показывают результаты вычислительных экспериментов, И – регулятор, в отличие от известных, синтезирует качественное управление для всех рассмотренных случаев, причем для случая рассмотренного на рис. 6 И - регулятор является единственным регулятором способным получать приемлемый результат.

Заключение

В отличие от хорошо развитой параметрической теории, непараметрическая теория управления ориентирована на уровень меньшей априорной информации об исследуемых объектах и процессах (вид параметрического уравнения, описывающего управляемый объект, неизвестен). Рассмотрен новый тип регуляторов (И - регулятор), базирующихся на восстановлении обратного оператора исследуемого процесса по наблюдениям «входа-выхода» объекта. Приводятся некоторые иллюстративные результаты вычислительных экспериментов.

Список литературы

[1] Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М. : Физматгиз, 1963.
[2] Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М. : Наука, 1968.
[3] Медведев А.В. Теория непараметрических систем. Управление - I. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева, 2013. 48, 2. 57-63.
[4] Медведев А.В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука, 1983.
[5] Куликовский Р. Оптимальные и адаптивные процессы в системах автоматического регулирования. М.: Наука, 1967.
[6] Medvedev A.V. Identification and control for linear systems of unknown order. // Optimization Techniques IFIP Technical Conference, 1974. 27, 48-56.

ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОШАГОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ СПУСКЕ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В АТМОСФЕРЕ

Ю.Н. Лазарев

Самарский научный центр Российской академии наук
443001, Самара, Студенческий пер., 3а, Россия
lazarev@ssc.smr.ru
тел:+7(846) 242-37-08

Ключевые слова: *аэрокосмический аппарат, спуск в атмосфере, метод последовательной линеаризации, многошаговое управление, математическое моделирование*

Abstract

The multistage control forming problem for the atmospheric reentry of aerospace vehicle is considered. The sequential linearization method is found to algorithms of trajectory control. The results of mathematical modelling of aerospace vehicle trajectory multistage control forming are presented.

Введение

В работе рассмотрены вопросы формирования командного управления движением центра масс аэрокосмического аппарата при спуске в атмосфере. Объектом управления является аэрокосмический аппарат – летательный аппарат, располагающий максимальным значением аэродинамического качества на гиперзвуковых скоростях достаточным для совершения управляемого движения в атмосфере, а также способный совершать управляемое движение в околоземном космическом пространстве. Создание подъемной силы при движении в атмосфере обеспечивается самолетной формой аппарата, а именно, несущим корпусом или крылом. Рассматривается управление изменением углов атаки и крена аэрокосмического аппарата.

Номинальное (расчетное) управление аэрокосмическим аппаратом формируется до начала движения и осуществляется при наличии запаса времени достаточного для решения сложной оптимизационной задачи с учетом практически важных ограничений на основе применения всех доступных методов решения.

Командное управление осуществляется в реальном времени в условиях действия возмущений, неучтенных при формировании номинального управления. В отличие от процедуры формирования номинального управления алгоритм командного управления реализуется только в автоматическом режиме, поскольку на принятие решений отводится ограниченное время.

В монографии [1] в основу алгоритмов номинального и командного управления спуском аэрокосмического аппарата в атмосфере положен метод последовательной линеаризации. Использование метода последовательной линеаризации при решении задач управления движением приводит к формированию программного управления – зависимостей от времени управляющих воздействий по каждому из каналов управления.

Эффективность командного управления обеспечивается наличием обратной связи в главном контуре системы управления. Использование идей многошагового управления [2] дает возможность регулярного замыкания контура управления, что позволяет использовать метод последовательной линеаризации при разработке алгоритмов командного управления.

1 Метод формирования программного управления

Метод последовательной линеаризации предназначен для формирования приближенно-оптимального управления при наличии ограничений на функционалы задачи и управляющие зависимости. Метод является типичным методом спуска в пространстве управлений и сводится к построению минимизирующей последовательности управлений. Подробное описание метода последовательной линеаризации, а также вопросов, связанных с его численной реализацией, приведено в [3].

Метод последовательной линеаризации состоит в построении последовательности итераций улучшения управления. Сначала задается начальное приближение опорного управления $u(t)$, которое затем последовательно улучшается до удовлетворения всем условиям задачи.

На каждой итерации вычисляется малое конечное приращение $\delta u(t)$ опорного управления $u(t)$, позволяющее перейти к новому, улучшенному опорному управлению $u(t)+\delta u(t)$. Расчет приращения $\delta u(t)$ осуществляется следующим образом.

1) На отрезке времени $[0,T]$ интегрируется система уравнений движения с опорным управлением $u(t)$. Вычисляются опорное решение $x(t)$ и функционалы задачи F_j $(j=0,1,...,m)$.
2) Для опорного закона движения $\{u(t),x(t)\}$ вычисляются функциональные производные $\omega^{(j)}(t)$ от функционалов F_j по управлению $u(t)$

$$\omega^{(j)}(t)=\frac{\partial F_j[u(t)]}{\partial u(t)} \quad (j=0,1,...,m).$$

3) Вводится малая окрестность ∂U опорного управления $u(t)$.
4) Определяется приращение $\delta u(t)$, являющееся решением линейного приближения исходной задачи в окрестности опорного закона движения $\{u(t),x(t)\}$.
5) Проверяется выполнение условий окончания поиска. Если полученное улучшенное управление $u(t)+\delta u(t)$ удовлетворяет всем условиям задачи, то поиск искомого управления считается законченным. Если условия не выполняются, то рассчитывается следующая итерация улучшения управления, начиная с пункта 1. В качестве опорного принимается улучшенное управление $u(t)+\delta u(t)$.

2 Многошаговое управление

Командное управление формируется в реальном времени в условиях действия возмущений, поэтому вычислительный алгоритм формирования командного управления должен содержать заранее определенное число операций и функционировать в автоматическом режиме.

Алгоритмы на основе метода последовательной линеаризации формируют управляющие зависимости как функции времени. Работоспособное командное управление, которое реализуется в условиях действия априорно неопределенных возмущений, должно иметь обратную связь. Осуществить обратную связь в процессе управления, использующем программные управляющие зависимости, позволяет общий подход, основанный на применении идей многошагового управления.

Рассмотрим многошаговый процесс управления [2], позволяющий при использовании на каждом отдельном шаге методов формирования программного управления осуществлять в целом обратную связь, регулярно замыкая систему управления и делая ее таким образом работоспособной в условиях априорной неопределенности возмущений. К достоинствам многошагового управления относится то, что его использование в принципе не требует качественного

и количественного знания действующих возмущений, поскольку действие возмущающих факторов оценивается по прогнозируемому конечному результату. Если в процессе управления появляется информация, уменьшающая степень неопределенности в знании действующих возмущений, то ее можно учитывать в прогнозирующих моделях и тем самым повышать эффективность многошагового управления.

Для эффективного использования многошагового управления в задачах управления траекториями аэрокосмических аппаратов достаточно иметь достоверные знания о положении и скорости аппарата в любой момент времени, что обеспечивается современным уровнем развития навигационных средств измерения и алгоритмов обработки навигационной информации. Кроме того, в прогнозирующих моделях может использоваться уточненная в процессе полета информация об отклонениях плотности атмосферы от стандартного распределения, отклонениях аэродинамических характеристик от расчетных значений и других возмущениях.

Многошаговое управление формируется следующим образом. Весь отрезок времени, соответствующий управляемому участку траектории движения, разбивается на отдельные участки – интервалы управления, на каждом из которых выполняется один шаг коррекции управления. Все вычислительные операции по изменению управления в соответствии со сложившейся реальной ситуацией должны быть закончены до конца текущего интервала управления. На каждом шаге управление формируется по результатам прогнозирования движения аппарата на основе информации, имеющейся к его началу и включающей в себя значения фазовых координат, параметров аппарата, характеристик атмосферы и сформированное ранее управление. На текущем шаге управление осуществляется в соответствии с управлением, полученным на предыдущем шаге.

До начала процесса управления должны быть сформированы номинальные управляющие зависимости для расчетных значений начальных условий движения, характеристик аэрокосмического аппарата и атмосферы, выбраны прогнозирующие модели движения аппарата, включающие в себя дифференциальные уравнения движения, метод их численного интегрирования, модель атмосферы и аэродинамические характеристики аппарата, а также должна быть задана величина интервала (шага) управления.

3 Моделирование

В дальнейшем приведены результаты моделирования траекторий управляемого спуска аэрокосмического аппарата типа орбитального корабля для начальных условий, соответствующих входу в атмосферу с низкой околоземной орбиты. В качестве возмущений рассматривались отличия начальных условий движения от расчетных значений и отличия плотности атмосферы от стандартных значений. Реализовавшиеся начальные условия реального движения при входе в атмосферу выбирались из следующих диапазонов возможных значений: начальная скорость принималась меньше расчетной на 5–15 м, а плотность реальной атмосферы принималась меньше стандартной плотности на 3–8 %.

Отметим, что реализация номинальных программ управления углами атаки и крена при отличии начальных условий движения и плотности атмосферы от стандартных значений в заданных диапазонах приводит к существенным отличиям терминальных условий движения от требуемых в конце траектории спуска на высоте начала участка предпосадочного маневрирования.

При формировании командного управления расположение узлов аппроксимации задачи соответствовало их расположению, полученному в результате построения номинальных программ управления, и в дальнейшем не изменялось. Шаг формирования командного управления принимался равным 100 секундам. На каждом шаге коррекции управления проводилась одна итерация метода последовательной линеаризации.

На рисунках 1 и 2 показаны основные результаты работы многошагового алгоритма командного управления. На рисунке 1 показаны типичные изменения по шагам N коррекции программ управления бортового и реального прогнозируемых конечных значений скорости, обозначенных соответственно $V_{кб}$ и $V_{кр}$, угла наклона траектории – $\theta_{кб}$ и $\theta_{кр}$, угла пути – $\chi_{кб}$ и $\chi_{кр}$, широты – $\varphi_{кб}$ и $\varphi_{кр}$ и долготы – $\lambda_{кб}$ и $\lambda_{кр}$.

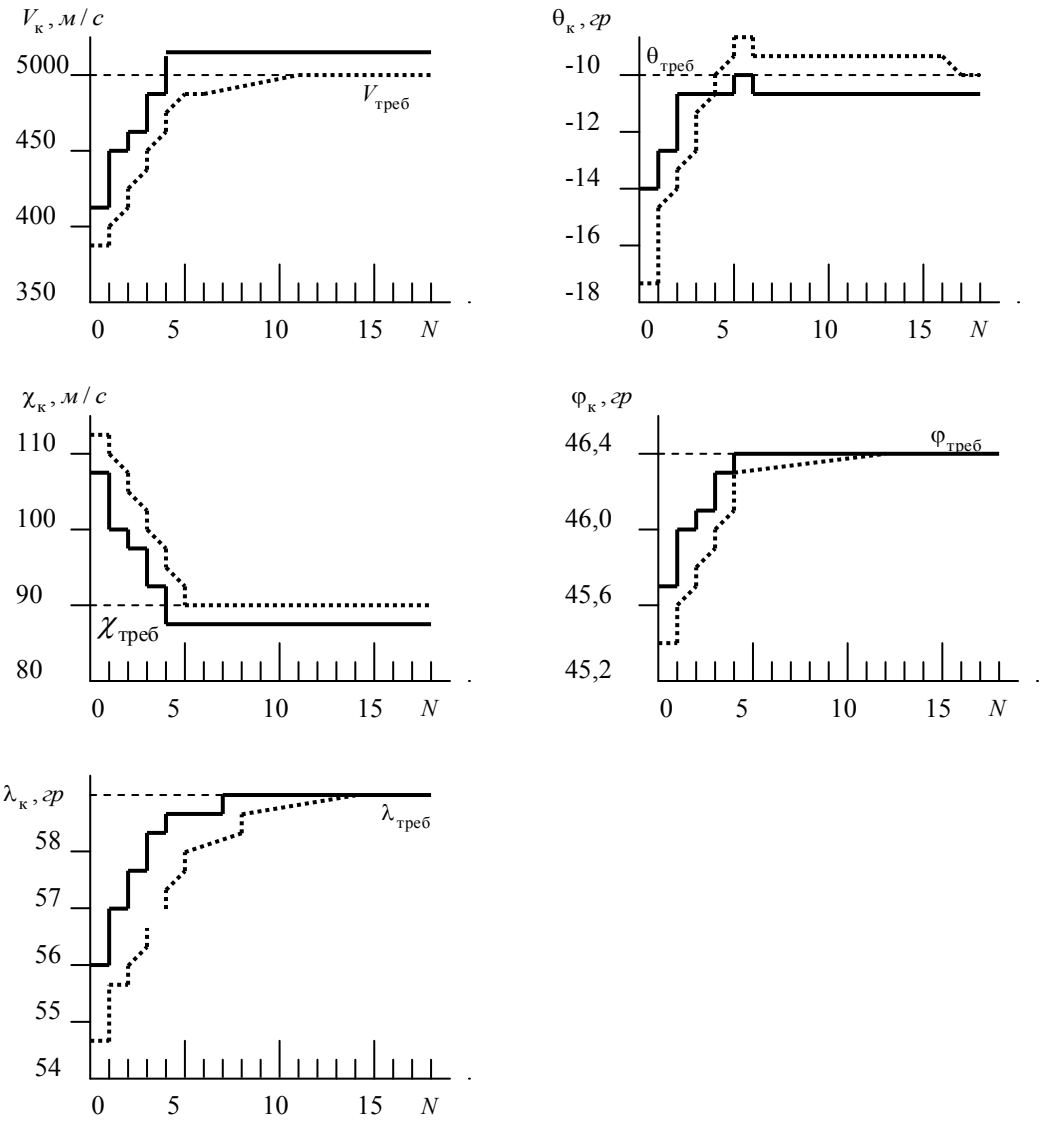


Рисунок 1 – Изменение прогнозируемых конечных условий по шагам коррекции управления (сплошные линии – «реальное» движение, штриховые линии – расчетное движение)

Следует отметить, что в условиях реального спуска аэрокосмического аппарата в атмосфере алгоритм командного управления производит коррекции управления на основании информации о бортовых прогнозируемых терминальных отклонениях. «Реальные» прогнозируе-

мые конечные отклонения могут быть получены только при проведении математического моделирования процесса управляемого спуска, и в данном случае их изменение служит иллюстрацией воздействия проведения коррекций управления на основании бортовой информации на реальную ситуацию.

Рисунок 1 отражает работу многошагового алгоритма командного управления при проведении только одной итерации метода последовательной линеаризации на каждом шаге коррекции управления движением, поэтому бортовые отклонения в начале процесса управления не приводятся при проведении итераций к нулевому отклонению. Видно, что бортовые прогнозируемые значения всех контролируемых параметров в процессе управления стремятся к требуемым значениям. Благодаря этому «реальные» прогнозируемые значения параметров также стремятся к требуемым значениям.

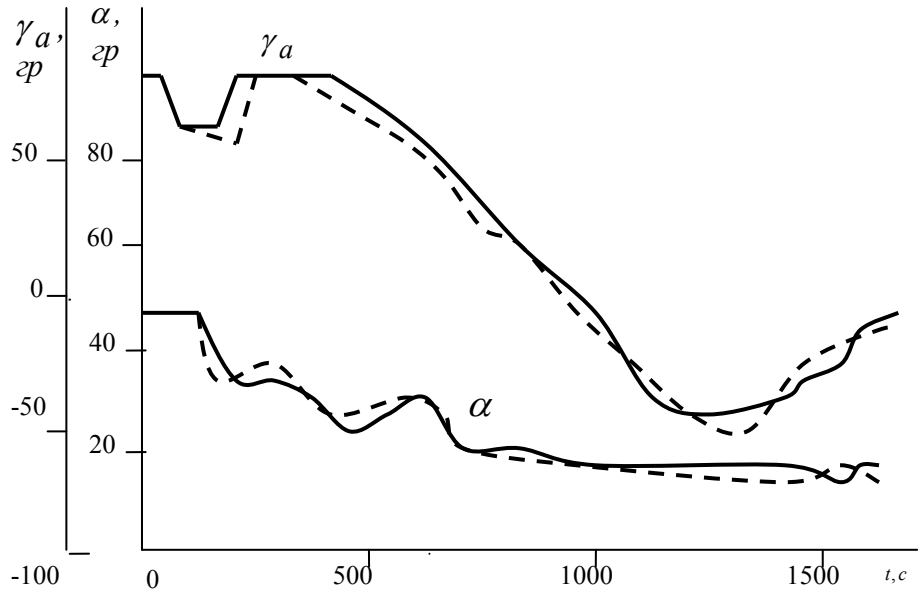


Рисунок 2 – Программы управления (сплошные линии – номинальное управление, штриховые линии – командное управление)

На рисунке 2 показаны типичные двухканальные программы управления – номинальные $\{\alpha_{ном}, \gamma_{aном}\}$, обеспечивающие достижение середины заданного интервала допустимого разброса конечных условий движения в расчётном случае, и реализовавшиеся командные $\{\alpha_{ком}, \gamma_{aком}\}$, обеспечившие попадание в заданный интервал допустимого разброса конечных условий движения при действии возмущений. Отличие командной управляющей зависимости от номинальной объясняется наличием возмущающих воздействий в реальных условиях спуска в атмосфере. Относительно небольшая величина рассогласования командного и номинального управлений связана с большой протяженностью траектории спуска аэрокосмического аппарата, в связи с чем обеспечивается высокая чувствительность изменений конечных параметров движения к изменениям управляющих зависимостей в начале траектории спуска в атмосфере.

Заключение

В работе рассмотрены вопросы формирования командного управления спуском аэрокосмического аппарата в атмосфере. Для решения проблемы предложено совместно использовать метод последовательной линеаризации, позволяющий формировать программные многоканальные управляющие зависимости, и идеи многошагового управления, позволяющие замкнуть систему управления и обеспечить ее эффективное функционирование в условиях действия априорно неопределенных возмущений.

Результаты моделирования показали, что разработанный многошаговый алгоритм управления обладает высокой методической точностью, его эффективность подтверждена уменьшением реальных отклонений конечных условий спуска аэрокосмического аппарата в атмосфере от требуемых значений по сравнению с отклонениями, которые прогнозировались без проведения коррекций управления.

Список литературы

[1] Лазарев Ю.Н. Управление траекториями аэрокосмических аппаратов. Самара: Самар. науч. центр РАН, 2007.

[2] Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф., Сихарулидзе Ю.Г. Алгоритмы управления космическим аппаратом при входе в атмосферу. М.: Наука, 1975.

[3] Федоренко Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1978.

О НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ И УПРАВЛЕНИИ Н–ПРОЦЕССАМИ.

А.В. Медведев, Е.Д. Михов

Сибирский федеральный университет
г.Красноярск , пр.Свободный, д.76а – 810, Россия
edmihov@mail.ru
тел. 8-923-309-21-82

Ключевые слова: *Н – процесс, дуальное управление, непараметрические модели, адаптивное управление, безынерционный стохастический объект, запаздывание*

Abstract

The subject of this report are research problem identification and management processes in tubular conditions of nonparametric uncertainty. An essential feature of this study is that identification, as well as the management of the process takes place in an environment where the parametric structure of the model is unknown due to lack of a priori information about the process under study. In the case where a priori information is not sufficient for parameterising the process model, it is advisable to use non-parametric control systems theory. Nonparametric theory, unlike parametric suggests that known only to the qualitative characteristics of the process. This means nonparametric control theory eliminates the step of determining the parametric model structure of the object.

The report examines the nonparametric models freewheeling objects with delay and, accordingly, nonparametric control algorithms similar, discrete-continuous processes. We also give numerical results of non-parametric models and nonparametric methods of numerical simulation regulators.

Введение

При моделировании и управлении безынерционными объектами с запаздыванием, часто возникает ситуация, когда компоненты вектора входных преременных, стохастически – зависимы, причем характер этой зависимости, чаще всего неизвестен. Подобная ситуация типична для дискретно – непрерывных процессов, доминирующих в металлургии, угольной промышленности, стройиндустрии и многих других. Моделирование дискретно-непрерывных процессов в условиях помех при неполной информации, продолжает оставаться одной из актуальнейших проблем теории управления. Случай, когда входные переменные (управляемые и неуправляемые), оказываются стохастически – зависимы, представляет специальный интерес, и может быть отнесен к категории новых задач идентификации. Последнее приводит к тому, что исследуемый процесс, в пространстве «входных – выходных» переменных, протекает не только в многомерном кубе, определяемом технологическим регламентом, но в некоторой его подобласти, имеющей «трубчатую» структуру. Подобные процессы были названы Н – процессами [1].

Непараметрическая теория, в отличие от широко распространенной параметрической, предполагает, что известны только качественные характеристики процесса. Это означает, что использование непараметрической теории позволяет уйти от вопроса определения параметрической структуры объекта.

1 Постановка задачи

Рассмотрим стандартную постановку задачи идентификации[2], представленную на рисунке 1.

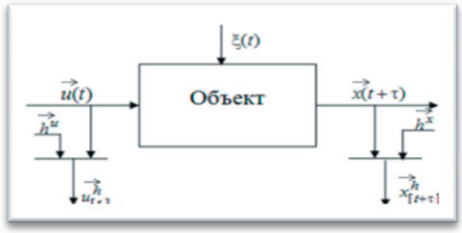


Рисунок – 1 исследуемый процесс.

На рисунке 1 приняты обозначения: u(t) – это вектор входных переменных в момент времени t, x(t + τ) – вектор выходных переменных в момент времени (t + τ), τ – запаздывание. ξ(t) – помехи, действующая на объект. h^u, h^x – помехи в каналах связи,

$u = (u_1, u_2, \ldots, u_k,) \in \Omega(u) \subset R^к$, где Ω(u) – области, к которым принадлежат значения (u_1, u_2, …, u_k,), также, стоит сказать, что каждая компонента вектора $u_i \in [a_i, b_i]$, а $x_i \in [c, d]$. При исследовании реальных процессов значения коэффициентов {a_i, b_i, c, d}, i = (1,…,k), всегда известны. В технологических процессах значения этих коэффициентов определяются технологическим регламентом (картой).

При этом, если входные воздействия на объект стохастически – зависимы друг от друга, то процесс имеет «трубчатую» структуру (Н – процесс).

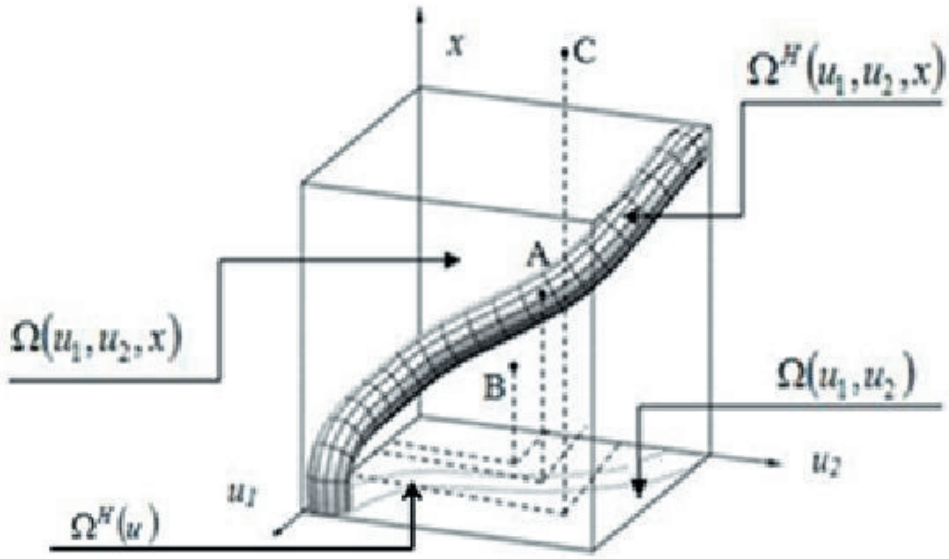


Рисунок 2 – «трубчатый процесс»

Здесь $\Omega^H(u_1,u_2,x)$ – область существования процесса.

На рисунке 2 точка А – точка, которая при входных значениях $u = (u_1, u_2,\ldots,u_k,) \in \Omega(u)$, соответствует величине выходной переменной, из области $\Omega^H(u_1,u_2,x)$. Таким образом при $u = (u_1, u_2,\ldots,u_k,) \in \Omega^H(u)$, объект имеет значения выхода из области $\Omega^H(u_1,u_2,x)$. Точка В – точка которая при входных значениях $u = (u_1, u_2,\ldots,u_k,) \in \Omega(u)$, но не принадлежит $\Omega^H(u_1,u_2,x)$, хотя при этом – все-еще находится в пределах $\Omega(u_1,u_2,x)$. Это происходит по тому, что $u=(u_1,u_2,\ldots,u_k,) \notin \Omega^H(u)$. Но при описанных случаях наш процесс не выходит за рамки $\Omega(u_1,u_2,x)$. А если мы посмотрим на точку С, то здесь видно, что хотя $u = (u_1, u_2,\ldots,u_k,) \in \Omega(u)$, но $x \notin \Omega(u_1,u_2,x)$, а оказывается, физически нереализуемым.

Примеров Н-процессов много: приготовление теста (масса муки, которую необходимо использовать для замешения теста зависит от объема используемой воды), выплавка стали (объем углерода зависит от массы железа).

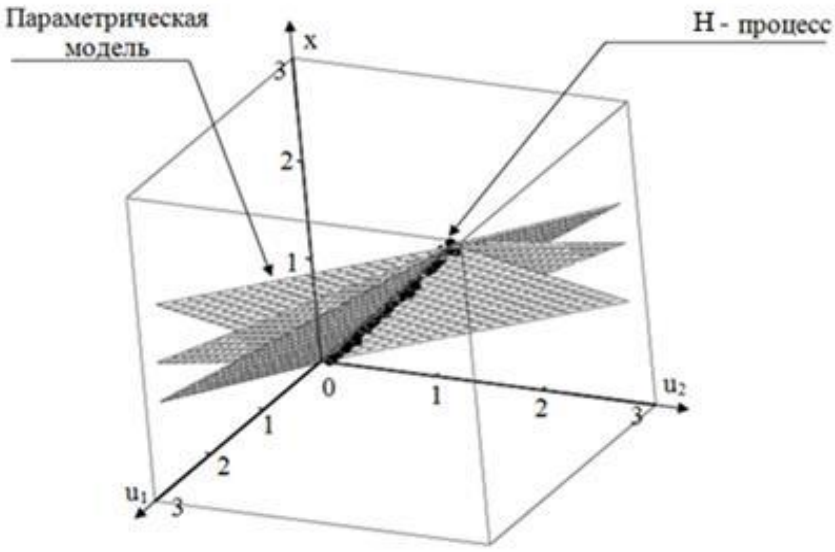


Рисунок 3 – параметрические модели трубчатых процессов (Н – процесс)

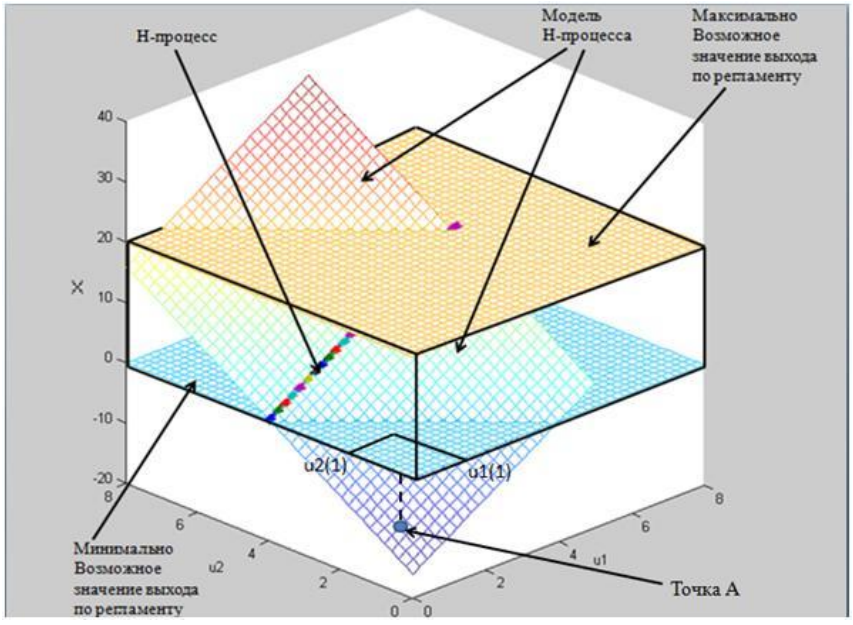


Рисунок 4 – модель Н-процесса.

Особенность при работе с Н-процессами заключается в следующем: когда будет предпринята попытка построить параметрическую модель для этих процессов, не учитывая того, что они являются трубчатыми, то будут использоваться только те точки, которые принадлежат $\Omega^{H}(u, x)$. В частном случае, если представить себе прямую в пространстве, то моделей такого процесса, в виде плоскости может быть сколь угодно много, поскольку через прямую в пространстве можно провести бесконечное число плоскостей, что иллюстрирует рисунок 3. В случае если зависимость носит нелинейный характер, то по различным исходным данным, восстанавливаемых поверхностей может быть также достаточно много.

Также при попытке прогнозирования Н – процесса могут возникнуть следующие сложности, представленные на рисунке 4.

В качестве примера, можно привести точку А (Рисунок 4). В этой точке u1 и u2$\epsilon\Omega$(u), но, не принадлежат), значит если u1 или u2 $\notin \Omega^{H}(u)$, то используя Н-модель, мы можем получить прогнозы физически нереализуемые.

Как мы видим на рисунке 4 при моделировании Н – процесса, может возникнуть ситуация, при которой при значениях входных переменных u ϵ Ω(u), выходное значение будет – сколь угодно грубым.

При управлении данными процессами, тоже возникают проблемы. Дело в том, что стандартные регуляторы, могут подать u $\notin \Omega^{H}$, соответственно, $x \neq x^{*}$.

Вследствие этих сложностей, для управления Н-процессом был взят непараметрический, адаптивный алгоритм управления[3,4]. Этот алгоритм был выбран по причине того, что он для нахождения управляющего воздействия использует значения предыдущих входов и выходов, благодаря этому те значения u, которые он будет подавать, всегда будут принадлежать $\Omega^{H}(u, x)$.

2 Дуальное управление

Основным принципом, который положен в основу построения систем автоматического управления, является принцип управления по отклонению или принцип обратной связи. Поскольку ошибка (отклонение состояния системы от заданного) несёт на себе отпечаток влияния различных неконтролируемых внешних воздействий, она является универсальным показателем состояния работы системы.

Недостаток априорной информации об объекте приводит к необходимости совмещать изучение объекта и управление им, в этом и состоит главное содержание дуального управления. При таком управлении управляющие воздействия носят двойственный характер. Они служат средством изучения, познавания объекта, но также и средством приведения объекта к требуемому состоянию. Такое управление, при котором управляющие воздействия носят двойственный характер, называют дуальным управлением, которое было открыто А.А.Фельдбаумом в 1960г [5]. При этом оказывается, что управляющая и познавательная стороны этих воздействий противоречивы. Действительно, нельзя качественно управлять объектом, не зная его характеристик, но выяснение этих характеристик требует длительного изучения объекта. Вряд ли можно надеяться, что слишком поспешное управление без достаточной информации об объекте, как и слишком осторожное управление, хотя и основанное на накоплении информации, но действующее, когда надобность в нём миновала, приведут к успешному результату.

Двойственность знания и управления, как подчёркивал К. Шеннон, тесно связана с двойственностью прошлого и будущего. Можно знать прошлое, но нельзя управлять им и можно управлять будущим, но мы никогда не знаем его.

Дуальное управление было развито на основе теории статистических решений. Такой путь предполагает знание априорной плотности распределения случайных возмущений и па-

раметров управляемого объекта. Если же эти плотности распределения неизвестны, то нужно искать, новые пути решения задач.

Дуальное управление в параметрической обстановке было рассмотрено Я.З. Цыпкиным в задачах адаптивного управления[2].

Из изложенного видно, что обучающиеся системы управления являются системами «с памятью» т.е. они не только способны изучать характеристики объекта, но и, сохраняя их в памяти, вырабатывать оптимальные управляющие воздействия.

3 Непараметрическое дуальное управления

По аналогии с А.А. Фельбаумом, из соображений простоты рассмотрим статическую систему. При этом предполагается, что вид характеристики, описывающий процесс неизвестен с точностью до вектора параметров. В этом случае оказывается эффективным теория непараметрического управления [6]. Непараметрический алгоритм управления в общем виде выглядит следующим образом:

$u_{s+1} = u_s^* + \Delta u_{s+1}$, где

u_s^* - это "мозг" управляющего устройства, его "память". На начальных этапах регулирования, эта переменная играет несущественную роль, но при накоплении обучающей выборки, её значимость возрастает и становится доминирующей.

Δu_{s+1} - это "поисковый шаг" алгоритма. На начальных этапах регулирования, эта переменная вносит основной вклад в управление процессом, но при накоплении обучающей выборки, её роль в управлении становится несущественной.

Приведем конкретный непараметрический алгоритм дуального управления, когда $u(u_1, u_2)$, а x – скалярная величина.

$$u^*_{(s+1)1} = \frac{\sum_{i=1}^{s} u_{(i)1} \Phi\left(\frac{x^*_{s+1} - x_i}{c_s^{\,x}}\right)}{\sum_{i=1}^{s} \Phi\left(\frac{x^*_{s+1} - x_i}{c_s^{\,x}}\right)},$$

Так, как u_{s2} зависит от u_{s1}, то для нахождения u^*_{s2} следует включить u_{s1}

$$u^*_{(s+1)2} = \frac{\sum_{i=1}^{s} u_{(i)2} \Phi\left(\frac{x^*_{s+1} - x_i}{c_s^{\,x}}\right)\Phi\left(\frac{u_{1,s+1} - u_{1,i}}{c_s^{\,u1}}\right)}{\sum_{i=1}^{s} \Phi\left(\frac{x^*_{s+1} - x_i}{c_s^{\,x}}\right)\Phi\left(\frac{u_{1,s+1} - u_{1,i}}{c_s^{\,u1}}\right)},$$

Ф(*) – это ядерная "сглаживающая" функция, а $c_s^{\,x}$, $c_s^{\,u1}$,$c_s^{\,u2}$ – коэффициенты размытости.

$$\Phi\left(\frac{v - v_i}{c}\right) = \begin{cases} 1 - \left|\frac{v - v_i}{c}\right|, \text{ если } \left|\frac{v - v_i}{c}\right| \le 1, \\ 0 \qquad\quad , \text{ если } 1 < \left|\frac{v - v_i}{c}\right|. \end{cases},$$

где v – произвольная переменная, а v_i – результаты ее измерения.

$c_s^x = \alpha \left| x_{s+1} - x_s \right|$,

$c_s^{u1} = \beta \left| u_{1,s+1} - u_{1,s} \right|$,

$\Delta u_{s+1} = k(x^*_s - x_i)$, где $x^*_s - x_i$ - это разность между последним выходом объекта, и прошлым выходом объекта, который наиболее близок к x^*_s, а k – это параметр, отвечающий за величину «шага».

4 Вычислительный эксперимент

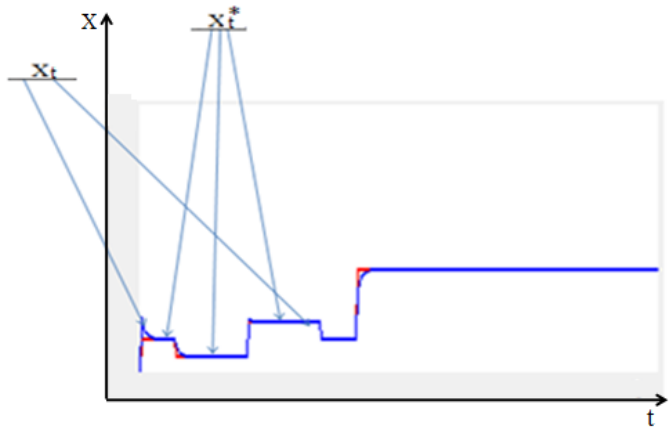
Средствами компьютерного было проведено комплексное исследование непараметрических алгоритмов дуального управления, безынерционными объектами с запаздыванием. Запаздывание в алгоритмах управления легко учесть сдвигом соответствующих реализаций. Ниже приведена иллюстрация одного частного случая.

В качестве уравнения, описывающего объект, примем уравнение следующего вида:

$x(u_1, u_2) = 3\ u_1 - 2\sin(u_2)$,

$u_2 = 5u_1 + 4$,

Отметим, что вид уравнения исследователю (управляющему устройству) неизвестен, используя имитацию объектов управления, мы получаем выборку «наблюдений» «входа-выхода» объекта (u_{1i}, u_{2i}, x_i).



X_t^* - управляющее воздействие, X_t – реальные выходные переменные объекта.

Рисунок 5 – управление Н-процессом.

На рисунке 5 виден процесс дуального управления (управления с обучением) объектом. Из рисунка 5, а так же других результатов численного исследования можно сделать вывод о достаточно высоком качестве работы алгоритма дуального управления.

При управлении безынерционным управлением с запаздыванием, алгоритм управления остается прежним, но необходимо осуществить сдвиг, наблюдений, для соответствия входных параметров выходным.

Заключение

В докладе рассмотрен новый класс процессов, а именно Н-процессов, представляющих собой трубчатую структуру в пространстве «входных-выходных» переменных. Приведены непараметрические алгоритмы дуального управления, безынерционным объектом с запаздыванием, для одного частного случая. Также, приведен иллюстративный пример работы непараметрической системы дуального управления. Учет запаздывания в алгоритмах легко осуществляется сдвигом соответствующих реализаций, состоящих из выборки наблюдений (x_i,u_i) i = 1..s. Хотя приведены частные алгоритмы управления, тем не менее, они легко обобщаются на многомерные случаи.

Процессы трубчатого типа или Н-процессы широко распространены в окружающей нас действительности. Обусловлено это стохастической зависимостью как линейной, так и нелинейной между переменными, характеризующими исследуемый процесс. В частности это характерно для технологических, производственных объектов с дискретно - непрерывным характером технологического процесса. Подобного рода процесса широко распространены в металлургии, стройиндустрии, энергетике, переработке нефти и других.

Список литературы

[1] Медведев А.В. Анализ данных в задаче идентификации. // Минск: Сборник научных статей Международной конференции компьютерный анализ данных и моделирование ком. Том 2//, БГУ, 1995. – 201-207 с.

[2] Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах//М// Изд. «Наука», 1968г. – 400с.

[3] Медведев А.В. Непараметрические системы адаптации. // Новосибирск: Наука, 1983. – 174с.

[4] Медведев А.В. Н-модели для безынерционных систем с запаздыванием. // Красноярск: Вестник СибГау №5, 2012.

[5] Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем//М.// Изд. Физматгиз, 1963г. - 552с

[6] Надарая Э.А. Непараметрические оценки плотности вероятности и кривой регрессии, изд. Тбил. ун-т, 1983. – 194 с.

УСЛОВИЯ РОБАСТНОЙ ОПТИМАЛЬНОСТИ ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНОЙ СИСТЕМЫ

О.Ф. Опейко

Белорусский национальный технический университет
220013, Минск, пр. Независимости, 65, Р.Беларусь
oopeiko@bntu.by
тел: + (375) 293-95-61,

Ключевые слова: *робастное управление, область качества, корни полинома, дискретно-непрерывная система, синтез*

Abstract
The closed loop linear system is composed of low and fast dynamic components. The fast components are cased by microcontroller based discrete time control units, and also by pulse width modulator of frequency inverter, for instance in electrical drives.The problem of robust synthesis for continuous-discrete system is actual. For instance, a rational choice is necessary for roots' quality domain. The goal of this work is a formation of roots' quality domain and initial roots' values definition. The round in left half plant is denoted as a roots' quality domain.The main result of this work is presented by a coordinate's transformation, which permit to test roots' quality domain belonging.

Введение

Проблема робастного синтеза [1,2] в последние десятилетия привлекает внимание исследователей в связи с возрастанием требований к системам управления, расширением их области применения и развитием технических возможностей для реализации алгоритмов управления. Применение вычислительных средств, в частности микроконтроллеров, для управления техническими объектами приводит к необходимости при синтезе робастного управления учитывать дискретные свойства системы [3,4].

Синтез робастного управления может выполняться в несколько этапов. Формирование критерия качества должно сопровождаться заданием допустимых пределов изменения критерия качества. В [2,5] предложены области качества на плоскости корней характеристического полинома синтезируемой системы. Выбор расчетной модели объекта управления сопровождается заданием интервала изменения параметров модели [1].

Задача робастного синтеза для дискретно-непрерывной системы остается актуальной. В частности, необходим рациональный выбор области качества на плоскости корней и рациональный выбор расчетного вектора параметров объекта, для которого решается задача синтеза.

Целью работы является построение области качества на комплексной плоскости корней и выбор расчетного распределения корней внутри этой области. В качестве желаемой области расположения корней рассматривается круг в левой полуплоскости комплексной плоскости корней с центром на действительной оси.

1 Построение области качества на комплексной плоскости корней

Замкнутая дискретно-непрерывная система имеет медленную и быструю составляющие движения. Быстрая составляющая соизмерима с интервалом квантования по времени. Квантование по времени порождается дискретностью устройства управления, реализованного на

микропроцессорной основе, а так же полупроводниковыми преобразователями электрической энергии с широтно-импульсной модуляцией, например, в электроприводах.

Для медленной составляющей допустимо применение непрерывной линейной модели. Эта модель обычно формируется на основе учета основных физических явлений объекта управления и пренебрежения второстепенными факторами.

Для быстрой составляющей, обусловленной квантованием по времени, областью устойчивости является единичный круг на комплексной плоскости переменной *z*. Эта область отображается в круг радиуса *v* с центром в точке – *v* на действительной оси на плоскости корней для непрерывной системы. Величина *v* определяется частотой квантования по времени дискретного звена.

Известны способы построения области качества на плоскости корней, которые позволяют учесть ограничения на колебательность и время переходного процесса [1-3].

Для дискретно-непрерывной системы представляет интерес область на плоскости корней в виде круга с центром на действительной оси. Обозначение *(-v,R)* вводится для круга с координатой – *v* центра и радиусом *R*. Таким образом, круговая область характеризуется двумя параметрами. Граница области в виде окружности имеет простое аналитическое описание. Известны критерии принадлежности нулей полинома единичной круговой области [5].

2 Условия принадлежности корней характеристического полинома заданной круговой области

Условия принадлежности корней кругу радиуса *R* с центром $-v_0$ имеют вид [2,5].

$$\begin{bmatrix} -R & v_0+s \\ v_0+\bar{s} & -R \end{bmatrix} < 0.$$

Замкнутая система с линейным регулятором описывается дифференциальным уравнением

$$\dot{x} = (A - BG)x.$$

Здесь $x \in R^n$, $A \in R^{n\times n}$, $B^T=(0,0,...,b)$. Матрица обратной связи имеет вид $G^T=(g_1,g_2,...,g_n)$.. Матрица *A* объекта управления зависит от параметров $\alpha \in \left(\underline{\alpha}, \overline{\alpha}\right)$, изменяющихся на заданном интервале.

Условия принадлежности собственных значений матрицы $A_C = A\text{-}BG$ кругу *(-v,R)* эквивалентны условиям принадлежности собственных значений матрицы $A_v = iv+A-BG$ кругу *(0,R)*. Если матрицу A_v представить в относительных единицах, принимая за базовую величину *R*, получим $\tilde{A}_v = A_v / R$. Характеристический полином матрицы A_C имеет вид

$$N_C(s) = \det(Is - A_C) = \det(Is - A + BG).$$

Характеристический полином матрицы A_v имеет вид $N_v(s)=det(I(s-v)-A+BG)$, а полином матрицы $\tilde{A}_v = A_v / R$ с учетом обозначений $\tilde{s} = s/R$, $\tilde{v} = v/R$, $\tilde{A}_C = A_C / R$ принимает вид

$$N_v(\tilde{s}) = \det\left((I\tilde{s} - \tilde{v}) - \tilde{A}_C\right) = a_n\tilde{s}_n + a_{n-1}\tilde{s}^{n-1} + \mathrm{K} + a_1\tilde{s} + a_0$$

Здесь каждый из коэффициентов принадлежит интервалу $a_i \in \left(\underline{a_i}, \overline{a_i}\right)$, *(i=0,1,2,...,n)* Полином $N_v(\tilde{s})$ имеет корни, принадлежащие единичному кругу с центром в начале координат, в том и только в том случае, если корни исходного полинома $N_C(s)$ принадлежат кругу *(-v,R)*. Применяя к полиному $N_v(\tilde{s})$ билинейное преобразование [3], определяемое выражением $\tilde{s} = (w+1)/(w-1)$, внутренность единичного круга можно отобразить в левую полуплоскость комплексной плоскости. Полином примет вид

$$N_v(w)=\det\left(I(w+1)-(Iv+A_C)(w-1)\right)=b_n w^n+b_{n-1}w^{n-1}+\mathrm{K}+b_1 w+b_0 .$$

Вектор $b^T=(b_n,b_{n-1},\ldots,b_1,b_0)$ коэффициентов данного полинома определяется из коэффициентов $a^T=(a_n,a_{n-1},\ldots,a_1,a_0)$ исходного полинома $N_v(\tilde{s})$ по формуле $b=Qa$. Здесь каждый из коэффициентов принадлежит интервалу $b_i\in(\underline{b_i},\overline{b_i})$, $(i=0,1,2,\ldots,n)$, Матрица $Q=\{q_{ij}\}$ строится из элементов [3]

$q_{1j}=1,$ $(j=1,2,\ldots,n+1),$

$$q_{i1}=C_n^i=\frac{n!}{(i-1)!(n+1-i)!},\quad (i=2,3,\ldots,n),$$

$q_{ij}=q_{i,j-1},-q_{i-1,j-1},$ $(i,j=2,3,\ldots,n).$

Условия принадлежности собственных значений матрицы $A_C=A-BG$ кругу $(-v,R)$ эквивалентны условиям принадлежности корней полинома $N_v(w)$ левой полуплоскости на всем интервале изменения параметров. Следовательно, переход к полиному $N_v(w)$ позволяет использовать условия Харитонова [6] на интервалах $b_i\in(\underline{b_i},\overline{b_i})$, $(i=0,1,2,3,\ldots,n)$ изменений параметров. Это необходимо для исследования принадлежности корней исходной системы заданной круговой области качества.

Для характеристического полинома четвертого порядка

$$N(s)=s_4+d_3s^3+d_2s^2+d_1s+d_0$$

с расчетными значениями кратных корней $s_i=-\rho$, $(i=1,..,4)$ внутри круговой области коэффициенты принимают значения

$$d_3=4\rho,\qquad d_2=6\rho^2,\qquad d_1=4\rho^3,\qquad d_0=\rho^4.$$

Если расчетные значения корней принять комплексными и равными $s_{1,2}=s_{3,4}=-\rho\pm i\,\rho$, коэффициенты принимают значения

$$d_3=4\rho,\qquad d_2=8\rho^2,\qquad d_1=8\rho^3,\qquad d_0=4\rho^4.$$

На рисунке 1 представлены годографы Цыпкина-Поляка для характеристического полинома $N(w)$ в двух случаях,. при различных расчетных распределениях корней полинома $N(s)$. Размах изменений каждого коэффициента полинома $N(w)$ принят равным его расчетному значению.

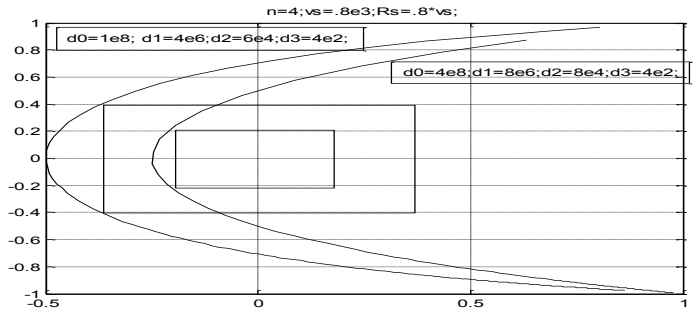


Рисунок 1 – Годографы Цыпкина-Поляка

Из рисунка 1 видно, что полином с кратными действительными корнями допускает относительные изменения параметров $\gamma=0,4$, а с комплексными - $\gamma=0,2$. Таким образом, в качестве желаемого полинома для синтезируемой системы целесообразен выбор полинома с действительными кратными корнями.

Заключение

Использование области качества в виде круга в левой полуплоскости комплексной плоскости позволяет учесть ограничения, вызванные наличием дискретных звеньев. В качестве расчетного полинома целесообразно выбирать полином с действительными кратными корнями.

Список литературы

[1] Поляк Б.Т., Щербаков П. С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука.2002.

[2] Баландин Д. В., Коган М. М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 280 с

[3] Колоколов Ю.В., Косчинский С.Л. Нелинейная динамика и синтез регуляторов тока асинхронного электропривода с векторным управлением.// Электротехника, №7, 2006.-с.7-12.

[4] Кузнецов А.П., Марков А.С., Шмарловский А. С. Анализ настроек канала регулирования потокосцепления ротора в системе векторного управления // Доклады БГУИР, № 4 (34) 2008. – с. 84-91.

[5] Джури Э. Инноры и устойчивость динамических систем. /перев. с англ. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы,1979. – 304 с.

[6] Харитонов В.Л. Асимптотическая устойчивость семейства систем линейных дифференциальных уравнений //Дифф. уравн. – 1978. – т.14. Вып. 11. – С. 2086-2088.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ БИНОКУЛЯРНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ОБОСНОВАНИЯ ЕЁ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

К.Е.Румянцев, С.В.Кравцов

ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет»
347922, г. Таганрог, Ростовская область, ул. Чехова, 2, Россия
rke2004@mail.ru, krsvtg@rambler.ru
тел: +7 (8634) 31-55-07

Ключевые слова: *бинокулярная система технического зрения, ошибки измерений, спектральный анализ*

Abstract

The results of studies determining the parametric coupling of a binocular vision system and the mobile robot dynamics. Approach used spectral analysis of measurement errors of point targets required for localization and positioning. As board binocular vision system analyzes a system with two collinear digital cameras with identical parameters.

Введение

В современных приложениях применения систем технического зрения особо место занимает направление их использования в системах очувствления робототехники для решения широкого круга задач анализа окружающей обстановки, в том числе координатных (позиционных) измерений объектов фиксируемой сцены. Перспективным считается использование в мобильных роботах систем стереозрения, поскольку они позволяют формировать объемное представление об окружающей сцене, что способствует расширению функциональности мобильных роботов и повышению эффективности их применения.

В [1, 2] приведены математическая и стохастическая модели бинокулярной системы технического зрения на коллинеарных цифровых видеокамерах с идентичными параметрами. Применение таких систем считается перспективным для координатных измерений на сцене в силу прогнозируемости качества работы БСТЗ и относительной простоты их программно-аппаратной реализации и интеграции в контур управления мобильного робота.

Несмотря на разнообразие технической литературы с обоснованием использования в мобильных роботах систем стереозрения, необходимо заметить, что дискуссия в основном ведется относительно круга и возможностей решения различных задач с помощью систем стереозрения, без обоснования параметров самих этих систем и привязки к параметрам и динамике перемещения мобильного робота.

Цель исследований состоит в определении взаимосвязи между требуемыми параметрами БСТЗ и допустимой динамикой перемещения платформы мобильного робота. В узком смысле исследования затрагивают вопросы определения необходимой частоты измерений при реализации различных вариантов построения БСТЗ.

1 Определение параметров измерительного пространства бортовой БСТЗ

Рассмотрим ситуацию (рисунок - 1), когда в сцене выделен и наблюдается один точечный ориентир М, удаленный от оптической оси 0z БСТЗ. Платформа движется с постоянной известной скоростью $\vec{v}$, причем направление вектора перемещения совпадает с направлением оси 0z БСТЗ. Это означает, что в течение определенного времени наблюдения ориентир М будет приближаться к платформе пока не выйдет из зоны измерений БСТЗ. Определив парамет-

ры БСТЗ и начальные истинные координаты ориентира М, можно проанализировать результаты координатных измерений, показываемые на трассе перемещения платформы, в сравнении с истинным положением ориентира. Пример координатных измерений БСТЗ и истинная траектория ориентира при перемещении платформы мобильного робота приведены на рисунке - 2.

Координатные измерения ориентира БСТЗ сопровождаются ошибками, величина которых может достигать значительных значений на больших удалениях. Анализ ошибок измерений [2] показал, что несмещенность оценок достигается ограничением глубины измерений БСТЗ. При коэффициенте асимметрии распределений ошибок измерений по глубине меньше 0.1, ограничивающая глубина измерений БСТЗ должна определяться значениями диспарантности больше 20 пикселей.

Приняв значение диспарантности равной 21 пикселю, определим размеры измерительного пространства БСТЗ для варьируемых параметров стереобазы и фокусных расстояний видеокамер (ВК), при размере фотоматриц 1600×1200 пикселей и размере пикселя 3 мкм. Такие параметры соответствуют широкому классу мегапиксельных камер со сменной оптикой, например ВК типа B2.920 Beward. Величина вариации значений стереобазы БСТЗ от 0.1 до 1.5 м выбрана из соображений компактного размещения элементов стереосистемы на шасси мобильного робота. Фокусные расстояния объективов видеокамер варьировались в пределах от 3 до 80 мм.

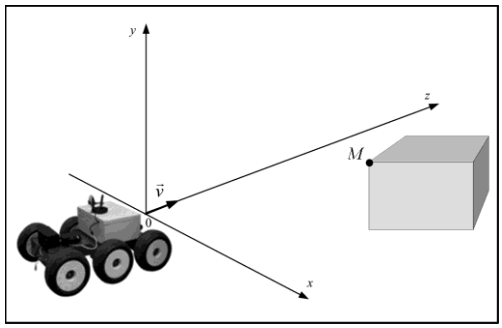


Рисунок - 1 Наблюдение БСТЗ ориентира М при движении платформы

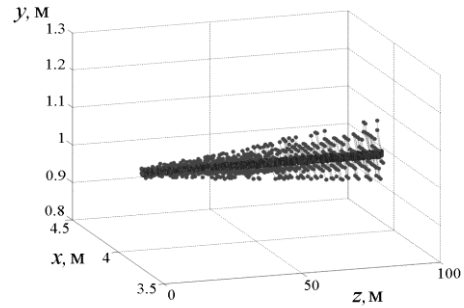
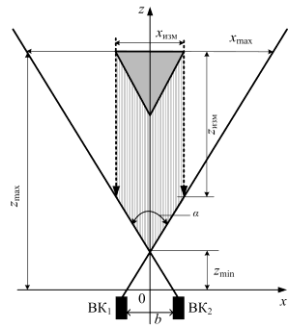


Рисунок - 2 Результаты траекторных измерений и истинная траектория ориентира М

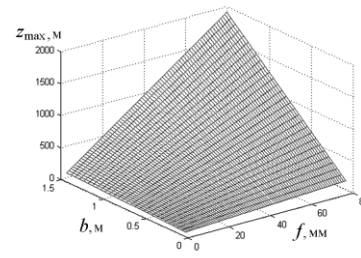
Результаты расчетов параметров границ измерительного пространства БСТЗ представлены на рисунке - 3. На рисунке - 3 а приведены определения параметров границ измерительного пространства БСТЗ: z_{max} – ограничивающая глубина измерений БСТЗ, z_{min} – глубина слепой зоны, x_{max} – ширина зоны измерений на z_{max}; а рисунки - 3 б-г демонстрируют зависимости этих параметров от величины стереобазы b БСТЗ и фокусных расстояний видеокамер.

При заданных параметрах измерительного пространства БСТЗ обеспечивается несмещенность ошибок измерений по всем координатам. Значения среднеквадратических отклонений (СКО) интегральных ошибок измерений по всем координатам для заданного (ограниченного) измерительного пространства БСТЗ приведены на рисунке - 4.

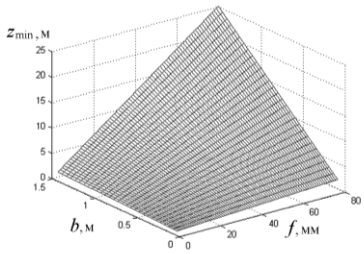
Интегральные ошибки измерений, характеризующие все измерительное пространство, ограниченное заданной глубиной, показывают возможные ошибки при измерениях любого ориентира, который может быть определен в любом месте измерительного пространства БСТЗ. Наибольший вклад в ошибки измерений вносят измерения глубины точек сцены (рисунок - 4 б), СКО которых растет с ростом значения стереобазы и фокусных расстояний. Несмотря на рост СКО ошибок измерений глубины точек сцены, его отношение к значению ограничивающей глубины измерений БСТЗ показывает для всех вариантов построения стереосистемы значение 1.35%.



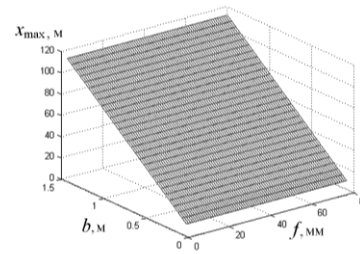
а)



б)

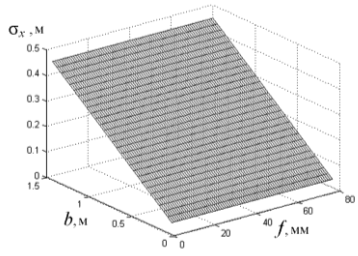


в)

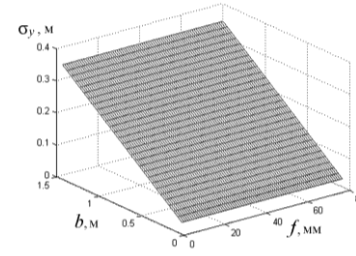


г)

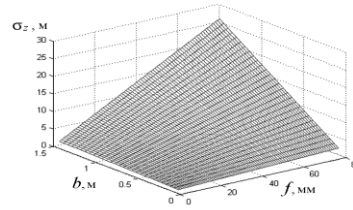
Рисунок – 3 Параметры измерительного пространства



а)



б)



в)

Рисунок – 4 СКО ошибок измерений БСТЗ

Таким образом, требование обеспечения несмещенности ошибок измерений позволяет определить параметры измерительного пространства цифровой БСТЗ, что весьма важно с позиции последующей обработки результатов, например известными методами линейной фильтрации.

2 Определение предельной частоты измерений БСТЗ

В [3] рассмотрена задача определения точности позиции в локальной системе координат мобильного робота по данным измерений БСТЗ. В частности, проанализирована ситуация оптимального выбора ориентиров, обеспечивающих преемственность измерений и повышение точности позиционирования. Преемственность означает, что ориентиры при перемещении платформы мобильного робота на определенную дистанцию не должны выходить из зоны измерений БСТЗ. Для прямолинейного перемещения, зона поиска в пространстве таких ориентиров показана на рисунке - 3 а треугольником со сплошным заполнением. Зона поиска располагается вокруг оси z БСТЗ с возможной областью разнесения по оси x величиной $x_{изм}$. При этом ориентиры, выбранные из зоны поиска могут наблюдаться при прямолинейном перемещении платформы на дистанции не менее $z_{изм}$.

Если полагать, что $z_{max} >> z_{min}$, то тогда $x_{изм}/x_{max} \approx (1-z_{изм}/z_{max})$. Определив $x_{изм}$, можно говорить о делении измерительного пространства БСТЗ на области, где выделенные ориентиры будут представлять для мобильного робота интерес с точки зрения измерительных задач и нет. Область, представляющая интерес для решения измерительных задач, определена на рисунке - 3 а многоугольником с вертикальным штриховым заполнением. Примечательно то, что с точки зрения решения других задач, например определения проходимости, или преодоления препятствий, можно придти к аналогичному разбиению поля зрения БСТЗ на данные области.

С какой частотой необходимо производить измерения ориентира в области, представляющей интерес для решения измерительных задач? Проанализируем $G^2(\Omega)$ энергетический спектр $R(z)$ радиуса отклонений (флуктуаций) точечных оценок $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ ориентира от истинного положения (x,y,z) по пространственной частоте Ω на прямолинейном участке перемещения платформы мобильного робота, протяженностью не менее $z_{изм}$ от $z_н$ до $z_к$, $(z_н - z_к) \geq z_{изм}$.

$$G^2(\Omega) = \left| \frac{1}{2\pi} \int_{z_н}^{z_к} R(z) e^{-j2\pi\Omega z} dz \right|^2 ,$$

где $R(z) = \sqrt{\left(x - \hat{x}(z)\right)^2 + \left(y - \hat{y}(z)\right)^2 + \left(z - \hat{z}(z)\right)^2}$.

Реализации $G^2(\Omega)$ показывают распределение энергии флюктуаций точности координатных измерений на трассе наблюдения. Предварительный анализ реализаций пространственного спектра показал зависимость его протяженности от варьируемых параметров БСТЗ, а также от траектории наблюдаемого ориентира. В частности, рост протяженности спектра $G^2(\Omega)$ обуславливается увеличением расстояния по оси x между оптической осью БСТЗ и ориентиром. Для анализа зададим $z_{изм}/z_{max}=2/3$. Вариацию параметров БСТЗ выберем в таком же диапазоне, как и для расчета параметров границы зоны измерений. Траекторию наблюдаемого ориентира определим по максимальному значению разнесения от оптической оси БСТЗ по координате x для заданного значения $z_{изм}$ дистанции наблюдения, т.е. на границе области, представляющей интерес для решения измерительных задач.

Определив уровень концентрации энергии флюктуаций точности координатных измерений на трассе наблюдения, например в 90 %, можно судить о $\Omega_в$ верхней частоте пространственного спектра $G^2(\Omega)$. Результаты определения $\Omega_в$ верхней частоты пространственного спектра $G^2(\Omega)$ представлены на рисунке - 5.

Уровень концентрации энергии флюктуаций точности координатных измерений на трассе наблюдения определяет значение $\Omega_в$ верхней частоты пространственного спектра $G^2(\Omega)$. При

его увеличении увеличивается и значение $\Omega_в$ верхней частоты. Устанавливая уровень концентрации энергии флюктуаций точности координатных измерений, мы отсекаем высокочастотные составляющие спектра, энергетика которых незначительна. Эти составляющие формируются в основном измерениями в ближней зоне, когда глубина наблюдаемого ориентира $z<<z_{max}$, где ошибки малы. Следовательно, задаваемый уровень концентрации энергии флюктуаций определяет и уровень точности представления получаемых измерений при переходе от непрерывного наблюдения к дискретному.

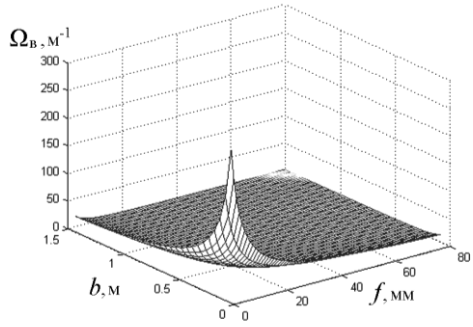


Рисунок – 5 Верхняя частота спектра энергии флюктуаций точности измерений ориентиров

Получив верхнюю частоту $\Omega_в$ спектра $G^2(\Omega)$, можно определить значение частоты измерений ориентира по глубине: $\Omega_{изм} \geq 2\Omega_в$, или предельного шага измерений по глубине $dz \leq 1/(2\Omega_в)$. В этом случае понятие частоты измерений совпадает со смыслом трактовки необходимой частоты дискретизации по теореме Котельникова [4], устанавливающей связь между непрерывным и дискретным представлением сигнала. Для того, чтобы совокупность измерений ориентира на всей трассе его наблюдения была правильно представлена, необходимо, чтобы частота измерений была не ниже удвоенного значения $\Omega_в$ верхней частоты спектра отклонений точечных оценок ориентира от истинной траектории.

3 Взаимосвязь предельной частоты измерений с динамикой перемещения платформы мобильного робота

Требование обеспечения заданного значения частоты измерений определяет пределы динамики (скорости) продольного перемещения мобильного робота. Допустим, что условия наблюдения ориентира и вычислительные мощности БСТЗ позволяют производить измерения ориентира в каждом кадре видеопотока. Пусть частота видеопотока $f_{пот}$ определяется значением в 30 кадров за секунду. Предельные скорости $v = f_{пот}dz$ продольного перемещения мобильного робота, оборудованного различными вариантами БСТЗ приведены на рисунке - 6.

Полученные результаты вполне логичны. Более быстроходные роботы должны иметь большие размеры (исходя из размеров стереобазы) и оборудованы БСТЗ с длиннофокусными ВК. Или, для более быстрого перемещения необходимо видеть дальше. Однако, проведенного анализа недостаточно, чтобы делать окончательные выводы о требуемых параметрах БСТЗ, поскольку взаимосвязь между требуемыми параметрами БСТЗ и допустимой динамикой перемещения платформы мобильного робота выявлена для идеальных условий перемещения (без траекторных нестабильностей).

Для детального анализа, конечно же, необходимы полные данные об условиях внешней среды эксплуатации мобильного робота, которые могут существенным образом влиять как на динамику перемещения, так и на границы измерительного пространства БСТЗ. В этой связи не лишним будет рассмотреть данные (рисунок - 7) по углу поля зрения БСТЗ, которые накладывают требования к системам стабилизации локальной системы координат мобильного робота.

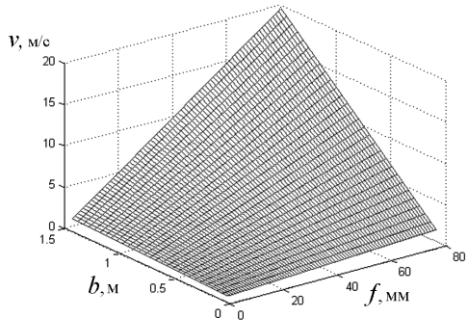


Рисунок – 6 Предельные скорости продольного перемещения мобильного робота

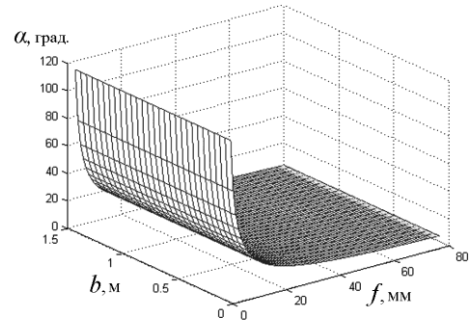


Рисунок – 7 Угол поля зрения БСТЗ по *x*

Задача стабилизации локальной системы координат мобильного робота может решаться с помощью методов стабилизации, как самой платформы мобильного робота, так и изображений в видеопотоке. К примеру, если говорить о требовании обеспечения угловой стабильности локальной системы в 1 %, то для широкофокусных БСТЗ (рисунок - 7) это означает возможные отклонения в доли градуса, для узкофокусных БСТЗ речь будет идти уже о долях угловых минут.

Заключение

В результате исследований установлено, что взаимосвязь между требуемыми параметрами бортовой бинокулярной системы технического зрения и допустимой динамикой перемещения платформы мобильного робота может быть проанализирована посредством спектрального анализа ошибок измерений ориентиров, необходимых для локализации мобильного робота на местности.

Рассмотренный подход спектрального анализа ошибок измерений распространим и для анализа вариантов построения стационарных БСТЗ, работающих по динамическим объектам в зоне измерений. При этом задача обоснования параметров БСТЗ упрощается, поскольку нет необходимости рассматривать вопросы стабилизации локальной системы координат БСТЗ.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-08-00071-а).

Список литературы

[1] Румянцев К.Е., Кравцов С.В. Анализ измерительного пространства цифровой телевизионной стереоскопической системы. Точечное и интервальное оценивание координат точек трехмерной сцены // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2011. — № 3. — С. 38-48.

[2] Румянцев К.Е., Кравцов С.В. Анализ ошибок измерений глубины точек трехмерной сцены цифровой телевизионной стереоскопической системой // Радиотехника. — 2011. — № 9. — С. 83-93.

[3] Румянцев К.Е., Кравцов С.В. Оптимизация выбора пар ориентиров для позиционирования по данным измерений цифровой телевизионной системы стереозрения // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2012. — № 4. — С. 12-21.

[4] Котельников В.А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи // Успехи физических наук: Журнал. — 2006. — № 7. — С. 762-770

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ КВАДРОКОПТЕРА

Э.Г. Тумуров, В.И. Шелехов

Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 6, Россия
erdemus@gmail.com, vshel@iis.nsk.su
тел: +7 (383) 330-86-52, факс: +7 (383) 332-34-94

Ключевые слова: *система управления, определение требований, автоматное программирование, квадрокоптер A.R.Drone*

Abstract
In automata-based software engineering, the requirements for a control system are specified. A quad-rotor control system is considered as the example of a control system.

Введение

Существуют следующие классы программ: *программы-функции*, *программы-процессы* (*автоматные программы*), трансляторы, операционные системы и другие [1]. Первые два класса покрывают более 90% всех программ. Технология построения надежных и эффективных программ-функций разработана в рамках исследований по предикатному программированию [2-6]. Для класса программ-процессов предложена технология автоматного программирования [1]. Дальнейшее развитие технологии требует учета специфики разных подклассов в классе программ-процессов.

Автоматная программа определяется в виде конечного автомата и состоит из нескольких *сегментов кода*. Вершина автомата соответствует некоторому *управляющему состоянию*. Ориентированная гипердуга автомата соответствует некоторому сегменту кода и связывает одну вершину с одной или несколькими другими вершинами. Сегмент является либо программой-функцией, либо программой-процессом, декомпозиция которого представлена другим автоматом. Исполнение сегмента завершается оператором перехода на начало другого сегмента. Взаимодействие автоматной программы с внешним окружением реализуется через прием и посылку *сообщений*, а также через *разделяемые переменные*, доступные в данной программе и других программах из окружения программы. *Состояние* автоматной программы определяется значениями набора переменных, модифицируемых в программе.

Важнейшим подклассом автоматных программ являются контроллеры систем управления в аэрокосмической отрасли, энергетике, медицине, массовом транспорте и др. отраслях. На каждом шаге вычислительного цикла контроллер получает входную информацию из окружения и обрабатывает ее. Результаты вычисления используются для передачи управляющего сигнала в окружение контроллера. Контроллеры систем управления являются подклассом *гибридных систем*, определяющих подкласс *реактивных систем*, которые в свою очередь составляют наибольший подкласс в классе программ-процессов.

Процесс конструирования автоматной программы подразделяется на этапы: *определение требований* к программе, построение дизайна программы, кодирование программы в языке программирования и т.д. В мировой практике технология определения требований ориентирована лишь на большие программные системы. Требования определяются на языках спецификации требований: естественном языке, английском (82% случаев), формализованном подмножестве естественного языка с использованием аппарата онтологий (12%) и формальном

языке (5%), в частности, UML, который, однако, признан далеко не лучшим среди формальных языков. Особенность нашего подхода в том, что определение требований рассматривается для всего класса программ-процессов. Представляют интерес спецификации следующих двух подвидов требований: описание окружения программы-процесса и функциональные требования, определяющие поведение программы. Для функциональных требований разработан метод формализованной спецификации, представляемой в виде набора *сценариев использования* (*use case*).

Метод спецификации требований представлен на примере задачи управления движением беспилотным летательным аппаратом – квадрокоптером [7-24], 4-х винтовым вертолетом. В разделе 1 в общем виде определена типовая архитектура произвольной системы управления. Задача управления беспилотным летающим аппаратом (БПЛА) определена в общем виде в подразделе 2.1 как конкретизация типовой архитектуры. В свою очередь система управления квадрокоптером (подраздел 2.2) характеризуется конкретизацией входных и управляющих параметров системы управления БПЛА. В описании постановки задачи управления квадрокоптером (подраздел 2.3) интегрированы разные ее особенности, определяющие задание маршрута движения, набор возможных ограничений и препятствий. В обзоре работ (раздел 3) описываются различные подходы в постановке задачи управления квадрокоптером.

1 Гибридная управляющая система

Реактивная система – программа-процесс, реагирующая на внешние события. *Гибридная система* – реактивная система, соединяющая дискретное и непрерывное поведение. Часть переменных состояния гибридной системы соответствует непрерывным параметрам, изменение которых реализуется независимо от программы гибридной системы по определенным законам, обычно формулируемым в виде дифференциальных уравнений.

Система управления является гибридной системой. Ее типовую архитектуру представим в форме определения требований.

Окружение. Входная информация для системы управления поступает через сообщение currentData(in), где in – набор *входных параметров*, поступающих от *объекта управления*. Управляющее воздействие от системы управления реализуется посылкой сообщения controlData(out), где out – набор *управляющих параметров* для передачи команд с целью корректировки поведения объекта управления.

Состояние. Набор переменных состояния управляющей системы обозначается через s.

Управляющие состояния. В типовом случае имеется только одно управляющее состояние M, используемое лишь в дизайне программы.

Требования. Требование имеет следующую структуру:

$$<\text{условие}_1>, <\text{условие}_2>, \ldots, <\text{условие}_n> \rightarrow <\text{действие}_1>, \ldots, <\text{действие}_m>$$

Семантика исполнения требования следующая: если в данный момент времени истинны все условия в левой части требования, то последовательно исполняется набор действий в правой части.

В типовом случае система управления определяется единственным требованием:

currentData(in) → Step(in, s: s′, out: #exit), controlData(out)

Гиперфункция Step – программа системы управления, срабатывающая при получении сообщения currentData(in). Переменная s′ обозначает состояние системы управления после исполнения программы Step. Выход #exit не является обязательным. Он может использоваться при достижении цели управления или в аварийном случае.

Дизайн. process ControlSystem(… : … #exit) {
M: inv <инвариант>;
receive currentData(in);
Step(in, s: s′, out: #exit);
send controlData(out)
#M
}

Более типичным является запуск контроллера через определенный промежуток времени. В этом случае сообщение currentData(in) поставляет последние значения параметров, регулярно поступающих от объекта управления.

Таким образом, определение требований к системе управления сводится к спецификации программы Step , исполняемой на каждом шаге работы системы. В типовом случае ставится цель достичь значений параметров par объекта управления. По значениям in и par требуется вычислить значения управляющих параметров out. Обычно это реализуется решением дифференциальных уравнений E(in, par, out), определяющих закон функционирования управляемого объекта. В дополнении к этому, возможны случайные воздействия на объект управления – *возмущения* (например, ветер). В целях адекватной реакции на возмущения состояние s может содержать информацию о предыдущих шагах работы системы управления; в простейшем случае s′ = in.

Определенная выше типовая архитектура системы управления является простейшей. Рост сложности возможен по нескольким направлениям: числу управляющих состояний, набору компонент системы, степени их параллельного взаимодействия. Детальное описание полного набора требований для реальных больших сложных систем занимает несколько сот страниц.

Автоматическое управление, реализуемое программой ControlSystem, может сочетаться с ручным дистанционным управлением через Интернет [20]. Ручное управление реализуется с помощью команд, определяемых набором параметров com, близких по структуре к управляющим параметрам out. Ручное управление можно определить требованием:

currentCommand(com) → Int(com, s: s′, out: #exit), controlData(out)

В принципе ручное и автоматическое управление реализуются как независимые параллельные процессы. Однако во избежание коллизий между ними ручное управление обычно проводится при отключенном автоматическом режиме.

Система управления должна быть *устойчивой*: при отсутствии возмущений ее параметры par должны приближаться к требуемым значениям, а при ограниченных возмущениях параметры par должны оставался в ограниченной зоне вблизи этих значений [12]. Свойство устойчивости является подвидом свойства безопасности реактивной системы.

2 Постановка задачи управления квадрокоптером

2.1 Беспилотные летательные аппараты

Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) - летательный аппарат без экипажа на борту. Управляется либо автономной бортовой системой, либо человеком дистанционно. Типы аппаратов: самолет, вертолет или ракета.

Области применения БПЛА: аэрофотосъемка, разведка, боевое применение, охрана сельхозугодий, картография, дистанционный химико-физический анализ, контроль всхожести и спелости урожая, химическая обработка, исследования птиц и животных, исследование стратосферы, работа в радиационных и токсичных зонах, поиск выживших, доставка лекарств в труднодоступные места и др. Производители БПЛА в России: Вега, Текнол, Zala, Иркут, Транзас, Аэрокон, Новик-XXI век и др.

Входные параметры (параметры in в обозначениях раздела1) определяют положение и ориентацию аппарата: координаты x, y, z центра масс аппарата в неподвижной декартовой системе координат; вектор скорости v_x, v_y, v_z; вектор ускорения a_x, a_y, a_z; углы Эйлера (Тэйта-Брайана) ψ, φ, θ; угловые скорости ψ', φ', θ'; угловые ускорения ψ'', φ'', θ''. С аппаратом жестко связана локальная система координат (X, Y, Z). Ее начало совпадает с центром масс аппарата. Ось X направлена вдоль продольной оси, Y – вдоль поперечной, Z – вдоль вертикальной. Чтобы перейти из неподвижной системы координат в локальную, нужно сначала сделать поворот вокруг оси z на *угол рысканья* ψ $(-\infty;+\infty)$, потом вокруг оси Y на *угол тангажа* θ $(-\pi/2;\ \pi/2)$, и, наконец, вокруг оси X на *угол крена* φ $(-\pi/2;\ \pi/2)$.

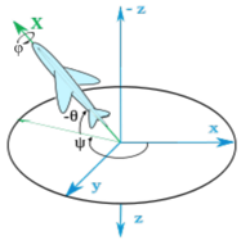


Рисунок 1 – углы Эйлера (Тэйта-Брайана)

Для определения положения и ориентации аппарата используется малогабаритная инерциальная интегрированная система, имеющая в своем составе инерциальные датчики (микромеханический гироскоп и акселерометр), а также барометрический высотомер и трехосный магнитометр. Интегрируя данные этих датчиков с данными приемника GPS/ГЛОНАСС, система вырабатывает полное навигационное решение по координатам и углам ориентации.

Управляющие параметры (параметры out в обозначениях раздела 1) определяют команды для установки требуемых показателей ориентации и скорости БПЛА.

2.2 Квадрокоптеры

Мультикоптер – вертолет с количеством несущих винтов более двух. Мультикоптеры с количеством винтов больше 4 используются, как правило, для повышения мощности, а также для отказоустойчивости – такие аппараты могут продолжить движение либо совершить мягкую посадку в случае отказа нескольких винтов.

Квадрокоптеры – мультикоптеры с четырьмя несущими винтами – получили широкое распространение в качестве гражданских легких недорогих аппаратов. В них обычно используются простые винты с *постоянным шагом* – углом наклона лопастей. Каждый винт управляется собственным двигателем. Два винта вращаются по часовой стрелке, два других – против часовой. Повороты реализуются изменением скорости вращения винтов, что ограничивает маневренность из-за инерции. Квадрокоптеры, как и другие вертолеты, способны двигаться в любую сторону, зависать на месте, осуществлять вертикальный взлет и посадку.

Ведущие лаборатории по изучению динамики и систем управления квадрокоптеров Aerospace Controls Lab of MIT, Flying machine arena of ETH Zurich, GRASP Lab of University of Pennsylvania проводят исследования оптимального управления экстремальных маневров, крутых виражей [23], управлением группой квадрокоптеров. Исследуются экспериментальные модели с изменяемым шагом винтов [22], обладающих лучшей маневренностью.

Входные параметры квадрокоптера AR.DRONE: x, y, z, ψ, φ, θ, v_{xb}, v_{yb}. Вместо v_x, v_y используются v_{xb}, v_{yb} – проекции вектора скорости (v_x, v_y, v_z) на локальные оси X, Y. Остальные параметры те же, что и для БПЛА. Аппарат 200 раз в секунду передает параметры на устройство дистанционного управления. Значения координат x, y, z поступают от внешних камер, либо вычисляются бортовой инерциальной системой [17] или с помощью компьютерного зрения [12].

Управляющие параметры квадрокоптера AR.DRONE: φ, θ, ψ', v_z. Значения этих параметров задаются в ограниченных диапазонах. Управляющие параметры трансформируются в команды управления квадрокоптером. Аппарат может принимать команды управления каждые 30мс.

2.3 Задача управления полетом квадрокоптера по заданному маршруту

Маршрут полета квадрокоптера определяется набором *контрольных точек* P_1, P_1, … ,P_n в пространстве координат x, y, z; где P_1 – начальная точка маршрута, а P_n – конечная точка. На первом этапе перед началом полета строится *траектория полета* – непрерывная кривая $T(u)=(x(u), y(u), z(u))$, $u\in[0,1]$, проходящая по контрольным точкам, причем $T(0)=P_1$ и $T(1)=P_n$. В случае, когда для каждой контрольной точки дополнительно фиксируется время ее прохождения, траектория принимает вид: $T(t)=(x(t), y(t), z(t))$, $t\in[0,t_{max}]$. Простейшая траектория – ломаная линия не оптимальна по времени, поскольку в контрольных точках аппарат будет вынужден полностью останавливаться. Оптимальные по времени траектории – гладкие кривые, построенные с учетом маневренности квадрокоптера.

Построение траектории полета обычно совмещается с планированием полета; например, определяется скорость движения на разных участках маршрута. В критических ситуациях построенная траектория может корректироваться в процессе полета [7].

Задача *управления полетом по траектории* часто ставится при наличии ограничений различного рода. Это могут быть как общие ограничения по времени, скорости, угловой скорости, высоте и т.д; так и ограничения в контрольных точках по времени, скорости [8] и ориентации аппарата. Более серьезными являются пространственные ограничения. Их нарушения оказываются фатальными. Требуется аккуратное планирование, гарантирующее полет на достаточном удалении от препятствий с запасом на возможные возмущения. Неподвижные препятствия могут задаваться в виде трехмерных объектов [8-10, 13]. Иногда фиксируется допустимый коридор отклонения траектории от ломаной, соединяющей контрольные точки [16]. Подвижные препятствия могут быть представлены трехмерными объектами с заданным законом движения [16]. В общем случае положение подвижного объекта необходимо непрерывно отслеживать в процессе полета в целях корректировки траектории полета.

Дополнительные трудности возникают при длительной потере сигнала со спутников, обслуживающих приемники GPS/ГЛОНАСС, когда при навигации лишь через инерциальные датчики [17] постепенно накапливаются ошибки в определении координат местоположения. Актуальной становится задача автоматического ориентирования в пространстве с использованием средств компьютерного зрения [12].

На очередной шаге управления полетом программа $Step$ по входным параметрам in (координатам, ориентации, скорости и угловой скорости квадрокоптера) вычисляет управляющие параметры out в целях изменения скорости и угловой скорости для достижения целевых параметров par (координат квадрокоптера через определенное время). В качестве par может выступать одна из точек на траектории полета. Возможны разные стратегии выбора такой точки как вблизи квадрокоптера, так и на достаточно большом удалении от него. Входные параметры in посылаются квадрокоптером в некоторый момент времени t_0, а управляющие команды out на срабатывают на квадрокоптере в другой момент времени t_1, когда его параметры уже другие. В принципе, значение параметров во время t_1 можно было бы вычислить, используя уравнения движения квадрокоптера [9, 13, 16], однако на практике такое редко реализуется, что порождает т.н. ошибку инерции. Сопоставляя фактические координаты с рассчитанными для момента времени t_1 и запоминая эту информацию в параметрах состояния s можно эффективно прогнозировать характер возмущений в целях внесения соответствующих компенсирующих поправок.

3 Обзор работ

Движение квадрокоптера описывает плоская система дифференциальных уравнений [9, 13, 16], позволяющая заменить нелинейную систему уравнений линеаризованной системой в окрестности положения равновесия [8, 14, 17]. Для линейной системы строится асимптотиче-

ски устойчивое решение с ограничением на угол крена. При больших углах крена линеаризованная модель дает значительную ошибку.

Нелинейные системы решаются методами обратного шага (back-stepping) нелинейного программирования [11, 15, 16, 24].

Для построения траектории для исходного маршрута полета строится гладкая кривая, заданная полиномиальными сплайнами. Далее траектория параметризуется временем так, чтобы траектория была осуществима, а общее время полета стало минимальным [8, 9, 10].

Планирование оптимальных траекторий с учетом препятствий реализуется методом графа видимости [8], быстрым маршевым методом [8] или алгоритмом RRT* [13].

Исследования по управлению квадрокоптером AR.DRONE проводились в Институте Автоматике (г. Новосибирск) [18, 19]. Построена модель бортовой системы управления, система управления и измерения положения в пространстве, метод фильтрации шумов с помощью фильтра Калмана.

Заключение

Настоящая работа преследует более общую цель – сформулировать задачу построения произвольной гибридной реактивной системы. Эта задача принципиально отличается от задачи дискретной и вычислительной математики для класса программ функций. Наш подход в постановке задачи управления полетом квадрокоптера реализуется в рамках концепции автоматного программирования [1] с применением аппарата определения требований. Данная задача определяется в виде последовательной конкретизации более общих задач построения: произвольной системы управления и системы управления БПЛА. Представленное описание является в значительной степени содержательным. Формальная постановка задачи управлением полета квадрокоптером является целью дальнейшего исследования. При этом разные аспекты задачи нуждаются в аккуратном уточнении.

Анализ работ по управлению полетом квадрокоптера показывает, что в решениях данной задачи весьма слабо используется состояние системы, определяемое параметрами `S` в разделе 1. В частности, почти не представлены методы компенсации возмущений на базе предыдущей истории, хранящейся в `S`. На базе анализа состояний системы можно было бы применить разнообразные методы искусственного интеллекта в решении задачи управлением полетом квадрокоптера.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-01-00686.

Список литературы

[1] Шелехов В.И. **Язык и технология автоматного программирования //** «Программная инженерия», №4, 2014. – С. 3-15. http://persons.iis.nsk.su/files/persons/pages/automatProg.pdf

[2] Карнаухов Н.С., Першин Д.Ю., Шелехов В.И. Язык предикатного программирования Р. – Новосибирск, 2010. – 42с. – (Препр. / ИСИ СО РАН; N 153).

[3] Shelekhov V. I. 2011. Verification and Synthesis of Addition Programs under the Rules of Correctness of Statements. *Automatic Control and Computer Sciences*. Vol. 45, No. 7, 421–427.

[4] Шелехов В.И. Верификация и синтез эффективных программ стандартных функций в технологии предикатного программирования // Программная инженерия, 2011, № 2. — С. 14-21.

[5] В.А. Вшивков, Т.В. Маркелова, В.И. Шелехов. Об алгоритмах сортировки в методе частиц в ячейках // Научный вестник НГТУ, Т.4(33), с. 79-94, 2008.

[6] Шелехов В.И. Разработка и верификация алгоритмов пирамидальной сортировки в технологии предикатного программирования. – Новосибирск, 2012. – 30с. – (Препр. / ИСИ СО РАН. N 164).

[7] M. Hehn, R. D'Andrea. Quadrocopter Trajectory Generation and Control. // IFAC World Congress, 2011, pp. 1485-1491.

[8] G.M. Hoffman, S.L. Waslander, C.J. Tomlin. Quadrotor Helicopter Trajectory Tracking Control. // In Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf, 2008.
[9] I.D. Cowling, O.A. Yakimenko, J.F. Whidborne. A Prototype of an Autonomous Controller for a Quadrotor UAV. // In European Control Conference, 2007.
[10] Y. Bouktir, M. Haddad, T. Chettibi. Trajectory Planning for a Quadrotor Helicopter. // In Mediterranean Conference on Control and Automation. IEEE, June 2008.
[11] L. Lai, C. Yang, C. Wu. Time-Optimal Control of a Hovering Quad-Rotor Helicopter. // Journal of Intelligent and Robotic Systems, 45(2), pp. 115-135, June 2006.
[12] S. Shen, Y. Mulgaonkar, N. Michael, V. Kumar. Vision-Based State Estimation and Trajectory Control Towards High-Speed Flight with a Quadrotor. // Proceedings of Robotics: Science and Systems IX, June 2013.
[13] R. Charles, A. Bry, N. Roy. Polynomial Trajectory Planning for Quadrotor Flight. // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA, 2013.
[14] K. Miller. Path tracking control for quadrotor helicopters, 2008.
[15] D. Xu, L. Wang, G. Li, L. Guo. Modeling and Trajectory Control of a Quad-rotor UAV // ICCASM-12, Advances in Intelligent Systems Research, July 2012.
[16] D. Mellinger, V. Kumar. Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors. // Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conf.
[17] R.W. Beard. Quadrotor Dynamics and Control. // Brigham Young University, Feb 2008
[18] Белоконь С.А., Золотухин Ю.Н., Мальцев А.С., Нестеров А.А., Филиппов М.Н., Ян А.П. Управление параметрами полёта квадрокоптера при движении по заданной траектории. // Автометрия, 2012. - С.32-42.
[19] Белоконь С.А., Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Мальцев А.С., Нестеров А.А., Филиппов М.Н., Ян А.П. Управление квадрокоптером AR.DRONE при движении по заданной траектории. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV международной конференции, 25-28 июня 2013 г., Самара, С.506-514.
[20] S.H. Yang, L.S. Tan, and X. Chen. Requirements specification and architecture design for Internet-based control systems. // Computer Software and Applications Conference, 2002. Proceedings. 26th Annual International , 26-29 Aug. 2002, Page(s): 75 -80.
[21] I.D. Cowling, J.F. Whidborne, A.K. Cooke. Optimal Trajectory Planning and LQR Control for a Quadrotor UAV. // in International Control Conference, 2006.
[22] M. Cutler, J.P. How. Actuator Constrained Trajectory Generation and Control for Variable-Pitch Quadrotors, 2012.
[23] Lupashin, S., Schollig, A., Sherback, M., and D'Andrea, R., "A simple learning strategy for high-speed quadro- copter multi-flips," IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2010, pp. 1642–1648.
[24] R. Cunha, D. Cabecinhas, C. Silvestre. Nonlinear Trajectory Tracking Control of a Quadrotor Vehicle. // In Proc. European Control Conference, 2009.
[25] Новиков Д.А. Теория управления организационными системами / МПСИ, Москва. – 2005. – С. 584.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МНОГОМЕРНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Д.К. Тюмиков

Самарский государственный университет путей сообщения
443066, Самара, 1-й Безымянный пер., 18
dktyumikov@mail.ru
тел: +7937 0792235

Ключевые слова: *сложные объекты, структура, статистические связи, многомерность, нелинейность, дисперсионные отношения, энтропийно-информационные меры.*

Abstract

An approach is suggested to investigate the structure of multidimensional statistical relationships of a complex object on the basis of variance ratio and informational entropic measures. The structural characteristics of the multidimensional relationships are studied. Conditions are identified to facilitate processing of multidimensional statistical data. The author suggests classifying objects on the basis of their nonlinearity. The ambiguity criterion is introduced.

Введение

При управлении сложным объектом в условиях априорной неопределенности по экспериментальной выборке «вход-выход» на первом этапе возникает необходимость предварительного решения задачи идентификации, в том числе задачи исследования структуры статистических связей между переменными этого объекта [1,2,3]. Знание структуры многомерных статистических связей значительно упрощает генерирование и выбор вида многомерной модели, что особенно важно в нелинейном случае. Основные трудности решения этой задачи связаны с многомерностью, многосвязностью и нелинейностью сложного объекта с одной стороны и отсутствием единого подхода идентификации многомерных нелинейных объектов с другой. Известные статистические методы в большей своей части рассматривают линейные многомерные объекты, методы имеют мощное теоретическое обоснование и поддерживаются разнообразным программным обеспечением (пакеты Statistica, SPSS, Statsoft, SAS и др.)

По отношению к нелинейным многомерным объектам в большинстве случаев решаются задачи параметрического оценивания нелинейных регрессионных моделей, вид которых задается из эвристических соображений или из предварительного накопленного опыта исследования сложных объектов.

1) В работе предлагается подход с применением корреляционного анализа и разработанного анализа дисперсионных отношений и энтропийно-информационных мер [2,3,5]. В основе анализа дисперсионных отношений лежит разложение множественного дисперсионного отношения (МДО) на составляющие, которые позволяет исследовать различные маргинальные элементы многомерной структуры: парные связи, эффекты взаимодействия, эффекты взаимосвязей и частные характеристики статистических связей между различными подмножествами входных и выходной переменных. Аналогично, рассмотренное разложение многомерной взаимной информации позволяет исследовать парные связи и парные условные различных порядков связи переменных сложных объектов, характеризующихся нелинейной (однозначной и неоднозначной по выходу) зависимостью (типа гистерезис).
2) Целью работы является исследование трех видов характеристик многомерных статистических связей для обоснования структуры многомерных статистических связей между

входными и выходными переменными сложных объектов на основе экспериментальных данных

1 Постановка задачи

Рассмотрим статический нелинейный объект с n входными переменными $x=\{x_1,\dots,x_n\}\in X^n\subset R^n$ и одной выходной переменной $y\in Y\subset R^1$. Пусть объект может быть описан некоторой зависимостью $y=f_k(x)+\varepsilon,\quad f_k(x)\in F(x),\ k=1..K$, - где $F(x)$ – множество классов функций: $F(x)=\{F_1(x)\ F_2(x)\ F_3(x)\ F_4(x)\ F_5(x)\}$. ε - ошибка, вызванная, например, неправильным выбором вида функции $f_k(x)$ и т п.

С объекта получена выборка экспериментальных данных $\{x_k, y_k\}$, k=1..N, $dimx_k$=n, $dimy_k$=1, N-объем выборки. Выборка удовлетворяет требованиям репрезентативности.

В общем случае структура многомерных статистических связей будет определяться видом зависимостей входящих в соответствующий класс функций $F(x)=\{F_1(x)\ F_2(x)\ F_3(x)\ F_4(x)\ F_5(x)\}$, включающих не только парные зависимости, но и многомерную композицию. Ставится задача определить парные статистические связи между входными и выходными переменными и исследовать возможные многомерные композиции по характеристикам статистических связей. Рассмотрим характеристики линейных и нелинейных статистических связей.

2 Характеристика многомерных статистических связей

Корреляционный анализ. Линейные объекты достаточно хорошо идентифицируются корреляционными мерами. Для этого достаточно вычислить коэффициенты парных корреляций (ПКК), на основании которых вычисляется множественный коэффициент корреляции (МКК) и частный коэффициент корреляции (ЧКК) [1,4]. При МКК $R\approx 1$ можно сделать вывод о линейности зависимости $y=M[y\mid x]=f(x)$. Где $M[y\mid x]$ - условное математическое ожидание.

Следовательно, в корреляционном анализе в качестве характеристик связи используются множественный коэффициент корреляции (МКК), парный коэффициент корреляции (ПКК) и частный коэффициент корреляции (ЧКК). ПКК изменяется в пределах: $-1\le r_{xy}\le 1$. Также изменяется ЧКК. МКК изменяется в диапазоне: $0\le R_{xy}\le 1$.

Метод дисперсионных отношений. Метод основывается на разложении [2,3]:

(1) $D[y]=M[D[y|X_{v,k}]]+D[M[y|X_{v,k}]]$,

где $D[M[y|X_{v,k}]]$ - представляет число, выражающее долю дисперсии $D[y]$, объясняемой переменными $x_i\in X_{v,k}$. (ν - номер подмножества размерности k из множества X^m). Это число, поделенное на дисперсию $D[y]$, является величиной, характеризующей степень идентичности (множественное дисперсионное отношение) $\eta_{v,k}$. По определению $0\le\eta_{v,k}\le 1$. При $\eta_{v,k}$=1 - зависимость детерминированная, при $\eta_{v,k}\approx 0$ статистическая зависимость отсутствует.

Величина $M[D[y|X_{v,k}]]$ представляет долю дисперсии y, вызванной помехами, не учтенными технологическими параметрами, ошибками в вычислении $D[M[y|X_{v,k}]]$. При моделировании с применением метода наименьших квадратов эту величину называют остаточной суммой квадратов. Рассмотрим соотношение (1) более подробно, разложив дополнительно $D[M[y|X^n]]$, то есть для случая, когда рассматриваются все n-переменных. Введем обозначение:

$n_1=C_n^{n-j}, j=\overline{0,n-1};\qquad n_2=C_{n-j}^{n-j-i}, i=\overline{1,n-j};$

$M[y\mid X_{v,k}]=M[y]$ при k=0.

Утверждение 1. Пусть справедливо соотношение (1), тогда имеет место следующее разложение:

$$D[y] = M\left[\left(y - M\left[y \mid X^n\right]\right)^2 + \right.$$

$$\left. \sum_{j=0}^{n-1}\sum_{v=1}^{n_1} M\left[\left(M[y \mid X_{v,n-j}] + \sum_{i=1}^{n-j}\sum_{v'=1}^{n_2}(-1)^i M[y \mid X_{v',n-j-i}]\right)^2\right]\right] +$$

$$(2)\quad + 2\sum_{j=0}^{n-1}\sum_{v=0}^{n_1}\sum_{j'=0}^{n'-1}\sum_{v''=1}^{n_1'} M\left[\left(M[y \mid X_{v,n-j}] + \sum_{i=1}^{n-j}\sum_{v'=1}^{n_2}(-1)^i M[y \mid X_{v',n-j-i}]\right)\times\right.$$

$$\left.\times\left(M[y \mid X_{v'',n-j'}] + \sum_{i'=1}^{n-j'}\sum_{v'''=1}^{n_2'}(-1)^{i'} M[y \mid X_{v''',n-j'-i'}]\right)\right]$$

$$X_{v',n-j-i} \subset X_{v,n-j}$$

$$X_{v''',n-j'-i'} \subset X_{v'',n-j'} \ .$$

Доказательство приведено в [6].

Для выяснения содержательного смысла разложения (2) рассмотрим пример для n=2.

$$D[y] = M[D[y|x_1x_2]] + M[(M[y|x_1x_2] - M[y|x_1] - M[y|x_2] + M[y])^2] +$$
$$+ M[(M[y|x_1] - M[y])^2] + M[(M[y|x_2] - M[y])^2] +$$
$$+ 2(M[(M[y|x_1x_2] - M[y|x_1] - M[y|x_2] + M[y])(M[y|x_1] - M[y])] +$$
$$+ M[(M[y|x_1x_2] - M[y|x_1] - M[y|x_2] + M[y])(M[y|x_2] - M[y])] +$$
$$+ M[(M[y|x_1] - M[y])\ (M[y \mid x_2] - M[y])]).$$

Если поделить левую и правую части разложения на $D[y]$ и ввести обозначение соответствующих слагаемых, то получим относительные величины:

$$(3)\quad 1 = \theta_{y\cdot x_1x_2} + \eta_{y(x_1x_2)} + \eta_{y\cdot x_1} + \eta_{y\cdot x_2} + 2(\eta_{y(x_1x_2)(x_1)} +$$

$$+ \eta_{y(x_1x_2)(x_2)} + \eta_{y(x_1)(x_2)})$$

где $\theta_{y\cdot x_1x_2}$ – доля (дисперсионное отношение) остаточной дисперсии (ДООД), $\eta_{y(x_1x_2)}$ – дисперсионное отношение эффекта взаимодействия двух переменных (ДОЭВД); η_{yx_1}, η_{yx_2} – парные дисперсионные отношения; $\eta_{y(x_1x_2)(x_i)}$ – дисперсионно-корреляционные отношения эффектов влияния взаимосвязей переменных x_1, x_2 и x_i, $i=1,2$ (ДКОЭВС).

Частное дисперсионное отношение (ЧДО) можно определить по следующей формуле [4]:

$$\eta_{yX_{v,k}(\overline{X}_{v,k})} = \frac{\eta_{yX^n} - \eta_{y\overline{X}_{v,k}}}{1 - \eta_{y\overline{X}_{v,k}}}.$$

где η_{yX^n} – множественное дисперсионное отношение.

$X_{v,k} \cup \overline{X}_{v,k} = X^n$, $X_{v,k} \cap \overline{X}_{v,k} = \varnothing$.

Переписывая для *dimx=2*, получим:

$$\eta_{yx_2(x_1)} = \frac{\eta_{yx_1x_2} + \eta_{yx_2} + \eta_{y(x_1x_2)(x_1)} + \eta_{y(x_1x_2)(x_2)} + \eta_{y(x_1)(x_2)}}{1 - \eta_{yx_1}}.$$

Следовательно, в методе дисперсионных отношений имеем: МДО, ПДО, ДОЭВД, ДКОЭВС, ЧДО.

Энтропийно-информационные характеристики статистической связи. Объекты с неоднозначной по значениям функции зависимостью могут быть выявлены энтропийно-информационными мерами [1,3,5]. Пусть имеет место следующее разложение[1]:

(4) $$H_y = I_{yx} + H_{y/x}$$

где H_y - энтропия выходной переменной, I_{yx} - совместная информация выходной переменной и входных, $H_{y/x}$ - условная энтропия выходной переменной относительно входных. Поделив это выражение на H_y получим:

$1 = q_{yx} + \overline{q_{yx}}$, где $q_{yx} = \frac{I_{yx}}{H_y}$; $\overline{q_{yx}} = \frac{H_{yx}}{H_y}$

или $q_{xy} = \frac{I_{yx}}{1 + I_{yx}}$; $\overline{q} = \frac{1}{1 + I_{yx}}$.

Полученные величины соответственно играют роль меры возможной идентичности (неидентичности) восстановленной модели (аналитической зависимости). Для исследования структуры многомерной зависимости меру идентичности необходимо разложить на маргинальные меры различных сочетаний входных переменных, аналогично разложению множественного дисперсионного отношения (1,2). Множественную взаимную информационную меру статистической связи *n* входных переменных с выходной можно представить в виде взвешенной суммы парных взаимных и взаимных условных информационных мер по всем возможным сочетаниям входных переменных [10].

Утверждение 2. Если верно разложение (4), то имеет место разложение взаимной информации:

$$I_{yx_1,x_2,\dots x_n} = \frac{1}{C_n^1 \cdot C_1^0} \cdot \sum_{i_1} I_{yx_{i_1}} + \frac{1}{C_n^2 \cdot C_2^1} \times \sum_{i_1} \sum_{i_2 (i_2 \neq i_1)} I_{yx_{i_1}/x_{i_2}} +$$

$$+ \frac{1}{C_n^3 \cdot C_3^2} \times \sum_{i_1} \sum_{i_2 (i_2 \neq i_1)} \sum_{i_3 [(i_3 \neq i_2),(i_3 \neq i_1)]} I_{yx_{i_1}/x_{i_2} x_{i_3}} + \dots \quad (5)$$

$$+ \frac{1}{C_n^n \cdot C_n^{n-1}} \times \sum_{i_1} \sum_{i_2 (i_2 \neq i_1)} \dots \sum_{i_n [(i_n \neq i_{n-1}),(i_n \neq i_{n-2}),\dots,(i_n \neq i_1)]} I_{yx_{i_1}/x_{i_2} x_{i_3} \dots x_{i_n}}$$

где n – количество входных переменных;

C_n^k – количество сочетаний по k элементов из n;

$i_1, i_2, \dots, i_n$ – индексы входных переменных, пробегающие значения в диапазоне $1 \dots n$;

$\sum_{i_k [(i_k \neq i_{k-1}),(i_k \neq i_{k-2}),\dots,(i_k \neq i_1)]} I_{yx_{i_1}/x_{i_2} x_{i_3} \dots x_{i_k}}$ – сумма по всем i_k, где i_k не равно i_{k-1}, i_k не равно i_{k-2}, …, i_k не равно i_1.

Преобразовав выражение (5) для *dimx=2,* получим:

$$I_{y(x_1,x_2)} = \frac{1}{2} \cdot (I_{yx_1} + I_{yx_2}) + \frac{1}{2} \cdot (I_{yx_2/x_1} + I_{yx_1/x_2}).$$

Аналогичные выкладки можно провести для любого числа переменных, например, при $n = 3$, получим:

$$I_{y(x_1,x_2,x_3)} = \frac{1}{3}\cdot(I_{yx_1} + I_{yx_2} + I_{yx_3}) + \frac{1}{6}\cdot(I_{yx_1/x_2} +$$
$$+ I_{yx_1/x_3} + I_{yx_2/x_1} + I_{yx_2/x_3} + I_{yx_3/x_1} + I_{yx_3/x_2}) +$$
$$+ \frac{1}{3}\cdot(I_{yx_1/x_2x_3} + I_{yx_2/x_1x_3} + I_{yx_3/x_1x_2});$$

Итак, в результате имеем множественную взаимную информационную меру (МВИМ), парную взаимную информационную меру (ПВИМ), условную различного порядка информационную меру (УВИМ).

Следует отметить некоторую аналогию разложений МКК, МДО и МВИМ, которая заключается прежде всего в наличии соответствующих парных характеристик связи. Остальные составляющие разложений представляют маргинальные характеристики статистических связей возрастающей размерности.

3 Исследование структуры статистических связей многомерных объектов

Из приведенных разложений и следуя [7] можно определить основные характеристики, необходимые для предварительного анализа данных, на основе которых можно выдвигать гипотезы о структуре взаимосвязей многомерного объекта. На основе выбранного класса парных характеристик (ПКК или ПДО) выбираются доминантные переменные: [6].

$$Q^* = \min_m Q(m) = \min\left(\frac{1}{n-m}\sum_{i=m+1}^{n}\omega_i \Big/ \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\omega_i\right),$$

m – число доминантных переменных, ω_i - веса переменных (ПКК или ПДО).

Дисперсионные характеристики позволяют проверить гипотезу синтеза аддитивной или мультипликативной многомерной регрессионной зависимости по парным зависимостям [8].

Утверждении 3 . Если переменные $x_r, r = \overline{1,m}$ статистически независимы и дисперсионные отношения ЭВД отсутствуют или ими можно пренебречь, то многомерная модель $y = M[y|x] + \varepsilon = f(x,c) + \varepsilon$ может быть представлена в виде парных регрессионных зависимостей:

$$y_r = M[y|x_r] + \varepsilon_r, \quad r = \overline{1,m}$$

Соотношением:

$$y = M[y|x] + \varepsilon = \sum_{r=1}^{m} M[y|x_r] - (m-1)M[y] + \varepsilon.$$

доказательство которого приведено в [8]. Соотношение определяет условия, при которых возможна аддитивная композиция многомерной регрессионной зависимости.

Наличие ДОЭВД в разложении (2) позволяет сделать вывод, что многомерную функцию $M[y|x_1x_2]$ нельзя представить в виде суммы парных регрессионных зависимостей, так как в этом случае ДОЭВД должны быть равны нулю. Однако охватить все виды неаддитивных комбинаций одномерных функций не представляется возможным из-за многообразия вариантов. Поэтому выделим наиболее распространенную схему - мультипликативную: представление $y = M[y|x]$ произведением парных зависимостей

$$y = c\prod_{r=1}^{m} f(x_r) + \varepsilon;$$

или в виде парных регрессионных зависимостей

$$M[y|x] = \frac{c}{(m-1)M[y]}\prod_{r=1}^{m} M[y|x_r].$$

Для определения степени нелинейности используется характеристика[2.3]:

$n_{yx}^2 = \eta_{yx}^2 - r_{yx}^2$.

В случае неоднозначности нелинейной зависимости вводится характеристика-индикатор неоднозначности:

$nn_{yx}^2 = q_{yx}^2 - \eta_{yx}^2$,

где $0 \le nn_{yx}^2 \le 1$, при значения nn_{yx}^2 близких к единице имеет место зависимость неоднозначная по значения функции.

Заключение

Рассмотрены три вида характеристик многомерных статистических связей: корреляционные, дисперсионные отношения и энтропийно-информационные. Два последних вида представлены с соответствующими разложениями интегрированных многомерных характеристик, что позволяет исследовать сложные объекты как в общем виде, так и по маргинальным компонентам различного порядка [9]. И, следовательно, анализировать составляющие структуры многомерных статистических связей. В целях уменьшения вычислительных трудностей предложен критерий уменьшения размерности вектора входных переменных, использующий парные дисперсионные отношения (ПДО) или парные энтропийно-информационные меры (ПЭИМ). Совместно с характеристикой степени нелинейности статистических связей сложных объектов, предложена характеристика степени неоднозначности статистической зависимости. Получены положительные результаты при обработке технологических и биомедицинских данных, в том числе и с переменными, измеренных в номинальных шкалах[9]. Предложенный подход значительно расширяет класс идентифицируемых многомерных нелинейных объектов.

Список литературы

[1] Айвазян С.А., Енюков И.С. Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей. – М.: Финансы и статистика, 1985.

[2] Дисперсионная идентификация / под ред. Н.С. Райбмана. – М.: Наука, 1981.

[3] Райбман Н.С. Построение моделей процессов производства / Н.С. Райбман, В.М. Чадеев. – М.: Энергия, 1975.

[4] Рао С.Р. Линейные статистические методы и их применение. – М.: Наука, 1968.

[5] Стратонович Р.Л. Теория информации. – М.: Советское радио, 1975.

[6] Тюмиков Д.К. Алгоритм определения доминантных переменных в задачах нелинейной регрессии / Д.К. Тюмиков, О.А. Кацюба // Автометрия СО АН СССР. – Новосибирск, 1983. – № 3. http://jglobal.jst.go/public/20090422/200902055881836174. 21.01.2011. Japan Science and Technology Agency.

[7] Тюмиков Д.К. Идентификация многомерных нелинейных объектов на основе дисперсионных отношений. – Самара : СНЦ РАН, 2008. – 162 с

[8] Тюмиков Д.К. Выбор композиции многомерной зависимости в задаче нелинейной регрессии.//Автометрия СО АН, – Новосибирск; 2010. №5. D.K. Tyumikov Choosing the composition of multivariate relationships in nonlinear regression problem. Physics and Astronomy. Optoelectronics, instrumentation and data processing. Volume 46, Number 5, 443-449.

[9] Тюмиков Д.К. Регрессионно-логическая модель диагностики заболеваний / Д.К. Тюмиков, С. А. Блашенцева, А.М. Субботин, Н.Н. Савченков // Проблемы управления. – 2011. – № 1.

[10] Тюмиков Д.К. Энтропийно-информационные меры многомерных статистических связей Самара, СамГУПС, 2012. – 134 с.

ПОЛИЭДРАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ УПРЕЖДАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ С РЕСУРСНЫМИ И ФАЗОВЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ*[1]

А.Б. Филимонов[1], Н.Б. Филимонов[2]

[1]Московский государственный технический университет
радиотехники, электроники и автоматики,
119454, Москва, просп. Вернадского, д. 78, Россия
filimon_ab@yandex.ru
тел/факс: +7 (499) 237-28-82

[2]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, Россия
nbfilimonov@mail.ru
тел/факс: +7 (499) 269-55-10

Ключевые слова: *терминальное управление, ресурсные и фазовые ограничения, многошаговый прогноз, полиэдральная оптимизация, принцип погружения, экстремальное прицеливание.*

Abstract

The polyhedral methodology of the solution of discrete terminal control problems by dynamic objects in conditions of resource constraints is discussed. The formalism of the polyhedral optimization and three theoretical constructs such as the prediction extrapolation of controlled movements of object, the principle of immersion of input optimization problem in a number of the simpler computing problems algorithmically and mechanism of the extreme aiming lies at its basis.

Введение

В современной теории и практике автоматического управления сложными динамическими объектами все большую популярность приобретают стратегии управления с прогнозом, обладающие способностью на основе информации о динамике управляемого объекта предвосхищать его будущее поведение [1]. В отечественной литературе для управления с прогнозом используются такие термины, как «метод управления с прогнозом» или «управление методом прогнозирующей модели». В зарубежной литературе данное направление в теории управления именуется как «Predictive Control» или «Model Predictive Control». В дальнейшем управление с прогнозом будем именовать просто *упреждающим управлением*.

Упреждающее управление находится на стадии интенсивного развития, о чем свидетельствует зарубежная библиография опубликованных за последние годы научных работ, посвященных данной проблеме (см., например, [2–8]). В рамках данной проблемы наиболее перспективными являются полиэдральные задачи дискретного упреждающего управления, предложенные и получившие развитие в работах авторов [9-14]. Среди зарубежных исследований полиэдральных задач дискретного упреждающего управления следует выделить работы P.Bumroongsri (см., например, [15]).

В настоящей работе обсуждается полиэдральная методология решения дискретных задач терминального управления динамическими объектами в условиях ресурсных ограничений. Ее основу составляет формализм полиэдральной оптимизации и три теоретические конструкции: прогнозная экстраполяция управляемых движений объекта, принцип погружения исходной

[1] Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты: № 13-08-00161 и № 13-08-00948.

оптимизационной задачи в ряд алгоритмически более простых вычислительных задач и механизм экстремального прицеливания.

1 Концепция упреждающего управления с многошаговым прогнозом

Рассматриваемый класс линейных дискретных объектов управления описывается векторным разностным уравнением состояния вида

(1) $\mathbf{x}[\theta+1]=\mathbf{A}\mathbf{x}[\theta]+\mathbf{B}\mathbf{u}[\theta]$,

(2) $\mathbf{x}[0]=\mathbf{x}_0$,

где $\theta\in\mathbf{Z}_+=\{0,1,2,\ldots\}$ - дискретное время; $\mathbf{x}\in\mathbf{X}=\mathbf{R}^n$ - состояние, $\mathbf{u}\in\mathbf{R}^r$ - управляющий вход; $\mathbf{A}\in\mathbf{R}^{n\times n}$, $\mathbf{B}\in\mathbf{R}^{n\times r}$.

Полагаем, что управление ограничено, т.е. задана область допустимых управлений:

(3) $\mathbf{u}\in\mathbf{U}\subseteq\mathbf{R}^r$.

Задано *целевое* множество состояний объекта $\mathbf{G}\subset\mathbf{X}$, являющееся в частном случае одноточечным множеством:

(4) $\mathbf{G}=\{\mathbf{x}_\mathrm{F}\}$, $\mathbf{x}_\mathrm{F}\in\mathbf{X}$.

Рассмотрим следующую *задачу терминального управления*: объект (1) необходимо перевести за конечное время из начального состояния (2) в целевое множество (4) в условиях ресурсных ограничений (3).

Пусть $\theta_\mathrm{F}\in\mathbf{Z}_+$ - момент времени перевода объекта в целевое множество:

(5) $\mathbf{x}[\theta_\mathrm{F}]\in\mathbf{G}$.

Полагаем, что требование *оптимальности процесса управления* заключается в его завершении за минимальное время:

(6) $\theta_\mathrm{F}\to\min$.

Обозначим через θ_F^* минимальное значение критерия (6) а через $\mathbf{u}^*[\theta]$ и $\mathbf{x}^*[\theta]$ - соответствующие ему оптимальные управляющее воздействие и фазовую траекторию.

Решение задачи будем основывать на прогнозной экстраполяции управляемых движений объекта. Пучок всех возможных траекторий его движения из некоторого состояния $\mathbf{x}$ длительностью в h шагов можно описать дискретной формулой Коши:

(7) $\tilde{\mathbf{x}}=\mathbf{A}^\tau\mathbf{x}+\sum_{\nu=0}^{\tau-1}\mathbf{A}^{\tau-\nu-1}\mathbf{B}\mathbf{u}[\nu],\ \tau=1:h$.

Введем дополнительные обозначения:

- $\mathbf{\Omega}_h(\mathbf{x})\subset\mathbf{X}$ - множество состояний объекта, достижимых из состояния $\mathbf{x}$ не более чем за h шагов;
- $\mathbf{\Omega}(\mathbf{x})\subset\mathbf{X}$ - множество всех достижимых из $\mathbf{x}$ состояний объекта: $\mathbf{\Omega}(\mathbf{x})=\lim_{h\to\infty}\mathbf{\Omega}_h(\mathbf{x})$.

Элементы данных множеств, очевидно, представляются формулой (7).

Далее полагаем, что исследуемая задача терминального управления разрешима, т.е.

(8) $\mathbf{G}\subset\mathbf{\Omega}(\mathbf{x}_0)$.

Условие (5), (6) означает, что $\mathbf{\Omega}_h(\mathbf{x}_0)\bigcap\mathbf{G}=\varnothing\ \to h<\theta_\mathrm{F}$.

Алгоритмизацию решения данной задачи будем основывать на *принципе инвариантного погружения* [16] в ряд алгоритмически более простых вычислительных задач.

2 Стратегия упреждающего управления на основе многошагового прогноза и принципа экстремального прицеливания

Введем некоторую меру расстояния точек пространства состояний $\mathbf{x}\in\mathbf{X}$ до целевого множества (8) - $\mathrm{dist}(\mathbf{x},\mathbf{G})$.

Для применения принципа погружения введем в рассмотрение вспомогательную оптимизационную задачу в следующей формулировке.

Заданы:

- критерий близости состояний к целевому множеству $Q(\mathbf{x})=\mathrm{dist}(\mathbf{x},\mathbf{G})$;
- интервал времени управления: $\theta=0:h-1$;
- точка пространства состояний $\xi\in\mathbf{X}$, лежащая вне целевого множества: $\xi\notin\mathbf{G}$.

Требуется найти управляющее воздействие $\hat{\mathbf{u}}[\theta]$ $(\theta=0:h-1)$ и порождаемую им траекторию $\hat{\mathbf{x}}[\theta]$ $(\theta=1:h)$, выпущенную из точки ξ :

(9) $\hat{\mathbf{x}}[0]=\xi$,

Обеспечивающее приближение состояния объекта к целевому множеству $\mathbf{G}$ на минимальное расстояние:

(10) $Q(\hat{\mathbf{x}}[h])\to\min$.

Данную задачу будем называть *базовой задачей оптимального планирования траекторий*, сокращенно - БЗОПТ(ξ,h), а финальную точку $\hat{\mathbf{x}}[h]$ - *точкой прицеливания.*

Траектория движения объекта в соответствии с (7) определяется равенствами

(11) $\hat{\mathbf{x}}[\theta]=\mathbf{A}^{\theta}\xi+\sum_{\nu=0}^{\theta-1}\mathbf{A}^{\theta-\nu-1}\mathbf{B}\hat{\mathbf{u}}[\nu]$ $(\theta=1:h)$,

где

(12) $\hat{\mathbf{u}}[\nu]\in\mathbf{U}$ $(\nu=0:h-1)$.

Предложение. Пусть в семействе задач:

(13) БЗОПТ$(\mathbf{x}_0,1)$, БЗОПТ$(\mathbf{x}_0,2)$, …, БЗОПТ$(\mathbf{x}_0,h^*)$

точка прицеливания $\hat{\mathbf{x}}[h^*]$ последней задачи и только она попадает в целевое множество $\mathbf{G}$:

(14) $Q(\hat{\mathbf{x}}[h^*])=0$.

Тогда решение последней задачи БЗОПТ$(\mathbf{x}_0,h^*)$ дает также решение исходной задачи предельного быстродействия (6):

$\mathbf{u}^*[\theta]=\hat{\mathbf{u}}[\theta]$, $\mathbf{x}^*[\theta]=\hat{\mathbf{x}}[\theta]$, $\theta^*_{\mathrm{F}}=h^*$.

Здесь принцип погружения воплощается семейством вспомогательных задач (9), (10), решением которых являются *стратегии упреждающего управления* на основе концепции многошаговой экстраполяции динамики объекта и механизма экстремального прицеливания.

3 Полиэдральная формализация задачи упреждающего управления

Задачи (13) относятся к классу задач математического программирования и характеризуются выбором целевой функции $Q(\mathbf{x})$, критерием оптимальности (10) и ограничениями (9), (11), (12). Формализацию и метод решения БЗОП будем основывать на концепции и аппарате полиэдрального программирования [13, 14].

Применение полиэдральной методологии требует постулирования полиэдральной структуры области управления $\mathbf{U}$, целевого множества состояний $\mathbf{G}$ и целевой функции $Q(\mathbf{x})$.

Полагаем, что область допустимых управлений $\mathbf{U}$ является r-мерным параллелепипедом:

$$\mathbf{U} = \{\mathbf{u} = \mathrm{col}(u_1, u_2, \ldots, u_r) \,|\, \underline{u}_i \le u_i \le \overline{u}_i, i = 1:r\},$$

где $\underline{u}_i < 0 < \overline{u}_i$ - заданные предельные значения управляющего входа u_i.

Считаем, что целевое терминальное множество состояний $\mathbf{G}$ также является полиэдром и задано полиэдральным неравенством

$$\mathbf{G} = \{\mathbf{x} \,|\, V(\mathbf{x}) \le 0\},$$

где $V(\mathbf{x})$ - некоторая полиэдральная функция.

Функция $V(\mathbf{x})$ вне множества $\mathbf{G}$ принимает положительные значения и *может служить мерой расстояния до его границы*. В качестве такой меры будем использовать следующую целевую функцию $Q(\mathbf{x})$, совпадающую вне множества $\mathbf{G}$ с функцией $V(\mathbf{x})$:

$$Q(\mathbf{x}) = \max\{V(\mathbf{x}), 0\}.$$

В случае, когда $\mathbf{G}$ является одноточечным множеством (4), можно положить

$$Q(\mathbf{x}) = V(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\mathrm{F}}),$$

где $V(\mathbf{x})$ - некоторая полиэдральная норма.

Ясно, что решаемые оптимизационные задачи БЗОПТ(ξ, h) будут иметь полиэдральную структуру, причем алгоритмизация данных задач в конечном итоге основана на их сведении к задачам линейного программирования (ЗЛП) [13, 14].

Важно подчеркнуть, что линейная структура оптимизационной задачи БЗОПТ(ξ, h) сохраняется при введении полиэдральных фазовых ограничений, т.е. ограничений на траектории управляемого движения объекта.

Для организации оптимального процесса программного управление $\mathbf{u}^*[\theta]$ по принципу обратной связи целесообразно воспользоваться сформулированной Дрейфусом (S.E.Dreyfus) стратегией *программно-позиционного управления* - формировать гибкие, циклически обновляемые (в частности, на каждом шаге) программы. Именно, полагаем

$$\xi = \mathbf{x}[\theta]$$

и решаем семейство задач $\{\text{БЗОПТ}(\xi, h), h = 1:h^*\}$ до выполнения условия (14). Задаче БЗОПТ(ξ, h^*) отвечает управляющая программа

$$\{\hat{\mathbf{u}}[0], \hat{\mathbf{u}}[2], \ldots, \hat{\mathbf{u}}[h^* - 1]\},$$

первая дискрета которой и определяет текущее значение управляющего входа:

$$\mathbf{u}[\theta] = \hat{\mathbf{u}}[0].$$

Итак, на каждом шаге управления объект *направляется* по вычисленной экстремальной траектории - благодаря рекуррентному характеру такой процедуры как раз и формируется *управляющая обратная связь*.

В конкретных инженерных приложениях может возникнуть необходимость в снижении вычислительной нагрузки на управляющий контроллер посредством априорного фиксирова-

ния *глубины прогноза* $h \in \mathbf{Z}_+$, $h > 0$, и решения на каждом шаге управления лишь одной экстремальной задачи БЗОПТ(ξ, h). Прогноз повторяется на каждом шаге и в итоге получается двойной эффект: во-первых, реализуется *виртуальная* обратная связь; во-вторых, реализуется «управление со скользящем интервалом прогноза».

4 Гибридная схема терминального управления

Полиэдральную методологию терминального управления возможно распространить также на класс аналоговых объектов посредством применения схем импульсного управления.

Положим, что динамика объекта описывается дифференциальным уравнением

(15) $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0\mathbf{x} + \mathbf{B}_0\mathbf{u}$,

где $\mathbf{x} = \mathrm{col}(x_1, x_2, \ldots, x_n) \in \mathbf{X} = \mathbf{R}^n$, $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^r$; $\mathbf{A}_0 \in \mathbf{R}^{n\times n}$, $\mathbf{B}_0 \in \mathbf{R}^{n\times r}$.

Пусть задана рабочая зона объекта управления $\mathbf{G} \subset \mathbf{X}$ - в ней действуют некоторые штатные регуляторы. В критических случаях, при выходе объекта из рабочей зоны, объект должен принудительно возвращаться в рабочую зону наискорейшим образом.

Применим схему импульсного управления с амплитудной модуляцией, полагая, что измеряемые аналоговые сигналы квантуются по времени с периодом T_d, а управляющие импульсы формируются экстраполятором нулевого порядка. Введем дискретное время

$t_d = \theta T_d, \quad \theta \in \mathbf{Z}_+$.

Дискреты процесса управления определяются равенствами

$u[\theta] = u(\theta T_d), \quad x[\theta] = x(\theta T_d)$.

Из (16) получаем дискретную модель объекта управления (1) с коэффициентными матрицами

$$\mathbf{A} = e^{\mathbf{A}_0 T_d}, \quad \mathbf{B} = \int_0^{T_d} e^{\mathbf{A}_0 \tau}\mathbf{B}_0 d\tau .$$

Теперь мы вправе применить изложенный выше полиэдральный формализм. В результате получаем двухслойную гибридную схему управления, в которой один слой представлен аналоговым объектом, а второй - дискретным алгоритмом управления. Заметим, что здесь дискретизация процессов управления обусловлена не аппаратной особенностью реальных каналов управления и измерения (т.е. наличием модулей ЦАП и АЦП в технической структуре системы управления), а исключительно алгоритмическими соображениями. Существенное преимущество такого подхода также состоит в возможности адаптивного изменения периода квантования T_d в зависимости от сложившейся текущей динамической ситуации, что в итоге позволяет редуцировать размерность решаемых оптимизационных задач.

5 Пример

Обратимся к задаче стабилизации бокового движения судна на воздушной подушке (СВП), линеаризованная модель динамики которого в переменных состояния описывается следующей системой дифференциальных уравнений ($n = 5$, $r = 1$) [17]:

$$(16)\quad \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 + b_2 u, \\ \dot{x}_3 = a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + a_{34}x_4 + b_3 u, \\ \dot{x}_4 = x_5, \\ \dot{x}_5 = a_{52}x_2 + a_{53}x_3 + a_{54}x_4 + a_{55}x_5. \end{cases}$$

Здесь $x_1 = \varphi$, $x_2 = \omega_y$, $x_3 = \beta$, $x_4 = \theta$, $x_5 = \omega_x$ - соответственно угол и угловая скорость рыскания; угол дрейфа; угол и угловая скорость крена; $u = \delta$ - угол перекладки аэроруля, причем: $|u| \le M = 35$.

Численные значения коэффициентов модели (17) для СВП массой $m = 26{,}6 \cdot 10^3$ кГ, длиной $l = 20$ м, шириной $b = 7{,}6$ м, площадью подушки $S = 146$ м и скоростью хода $V_0 = 25{,}4$ м/с имеют вид:

$a_{22} = -0{,}185$, $a_{23} = -0{,}07$, $a_{24} = 0{,}01$, $a_{33} = -0{,}085$, $a_{34} = 0{,}01$,

$a_{52} = 0{,}05$, $a_{53} = 0{,}05$, $a_{54} = -1{,}625$, $a_{55} = -0{,}5$; $b_2 = 0{,}313$, $b_3 = 0{,}052$.

Реализуем описанную выше схему упреждающего импульсного управления применительно к СВП с периодом квантования $T_d = 0.25$, для случая, когда целевое множество (15) задано в виде многомерного куба: $V(\mathbf{x}) = \max\{|x_i|, i = 1:n\} - 3$.

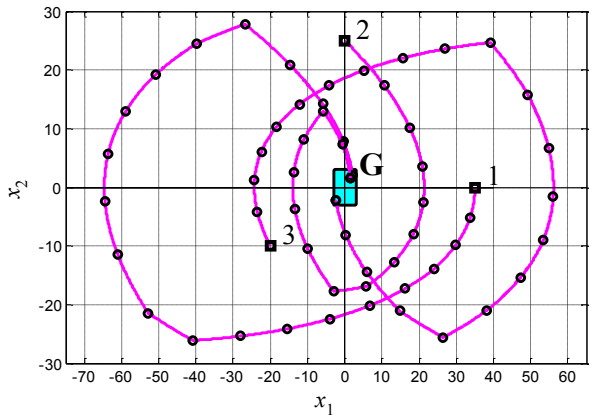


Рисунок 1

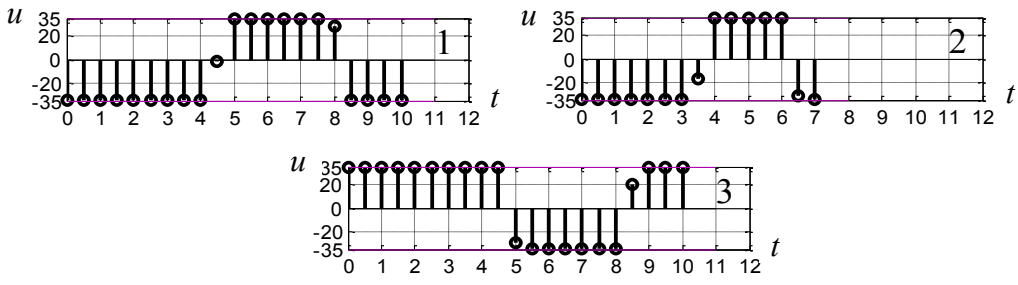


Рисунок 2

На рис. 1 показаны проекции дискрет фазовых траекторий управляемых движений объекта $\mathbf{x}[\theta]$ на плоскость (x_1, x_2) и целевого полиэдра $\mathbf{G}$ для трех начальных состояний:

1) $\mathbf{x}(0)=\mathrm{col}(35,0,0,0,0)$; 2) $\mathbf{x}(0)=\mathrm{col}(0,25,0,0,0)$; 3) $\mathbf{x}(0)=\mathrm{col}(-20,-10,10,0,0)$.

На рис. 2 приведены соответствующие графики дискретных управляющих сигналов $u[\theta]$.

Заключение

Рассмотрена полиэдральная методология решения дискретных задач терминального управления динамическими объектами в условиях ресурсных ограничений. Ее основу составляет формализм полиэдральной оптимизации и три теоретические конструкции: прогнозная экстраполяция управляемых движений объекта, принцип погружения исходной оптимизационной задачи в ряд алгоритмически более простых вычислительных задач и механизм экстремального прицеливания.

Список литературы

[1] Модельное прогнозирующее управление / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребе, М.Э. Сальгадо. Проектирование систем управления. Гл. 23. М.: БИНОМ. Лаборат. знаний, 2004. - С. 739-769.

[2] Rossiter J.A. Model predictive control: A practical approach. CRC Press LLC, Boca Rotaton, 2003.

[3] Camacho E.F., Bordons C. Model Predictive Control (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing). Springer, 2007.

[4] Wang L. Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB. Springer, 2009.

[5] Rawlings J.B., Mayne D.Q. Model Predictive Control: Theory and Design. Nob Hill Publishing, Madison, WI, 2009.

[6] Grüne L., Pannek J. Nonlinear Model Predictive Control: Theory and Algorithms. Springer, 2010.

[7] Holkar K.S., Wagh K.K. An Overview of Model Predictive Control // Int. J. of Control and Autom. 2010. V. 3, No 4, December. – P. 47-63.

[8] Lee J.H. Model Predictive Control: Review of the Three Decades of Development // Int. J. Control Autom. 2011. V. 9(3). – P. 415-424.

[9] Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Дискретное регулирование линейных объектов методом наискорейшего спуска // Современные технологии в задачах управления и обработки информации: Труды междунар. науч.-техн. семинара. М.: МАИ, 1997. - С. 96-98.

[10] Filimonov A.B., Filimonov N.B. Technicues of Polihedral Set in Discrete Control Tasks by Finite State // Proc. of the 4th Int. Scien.-Techn. Conf. «Actual Problems of Electronic Instrument Engineering». V. 1. Novosibirsk: NSTU, 1998. - P. 384-385.

[11] Demenkov M.N., Filimonov N.B. Variable Horizon Robust Predictive Control via Adjustable Controllability Sets // European Journal of Control. 2001. V. 7, No 6. - P. 596-604.

[12] Filimonov N.B. Discrete Control by Dynamic Objects with Multistep Prediction // Proc. of the 16th Int. Conf. on Systems for Autom. of Engineering and Research. Sofia: Print. House of USB, 2002. - P. 53-57.

[13] Филимонов Н.Б. Полиэдральное программирование в дискретных задачах управления // Информационные технологии. Приложение. 2004. № 1.

[14] Филимонов Н.Б. Методы полиэдрального программирования в дискретных задачах управления и наблюдения / Методы классической и современной теории автоматического управления. Учебник в 5-и тт. Т. 5. Методы современной теории автоматического управления. Гл. 7. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. - С. 647-720.

[15] Bumroongsri P., Arundechachai P., Kheawhom S. An Efficient Formulation of Off-line Model Predictive Control for Nonlinear Systems Using Polyhedral Invariant Sets // Int. Trans. J. of Eng., Manag. & Applied Sci. & Tech. 2014. V. 5, No 1. – P. 25-37

[16] Касти Дж., Калаба Р. Методы погружения в прикладной математике. М.: Мир, 1976.

[17] Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А. Навигация и управление движением судов. - СПб.: Элмор, 2002.

ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ АВИАЦИОННО-ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ПУТЕМ ПАРИРОВАНИЯ КРИТИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ

Л.Ю. Филимонюк

Институт проблем точной механики и управления РАН
410028, Саратов, ул. Рабочая, 24, Россия
filimonyukleonid@mail.ru
тел: +7 (8452) 22-23-76, факс: +7 (8452) 22-23-40

Ключевые слова: *авиационно-транспортная система, парирование критических ситуаций, сочетание событий, безопасность, ресурс*

Abstract

An approach to analysis and parrying of critical situations during an aviation-transport systems' functioning is offered. A method of a formal description of events combination and appraisal of their parrying difficulty is developed. Indications of events' combination and their common classes are allocated. The approach can be used during development and improvement of teaching and suggesting systems and simulators.

Введение

В настоящее время особую актуальность в связи с имевшими место происшествиями имеет проблема поддержания и повышения безопасности авиационно-транспортных систем (АТС) [1]. На безопасность АТС оказывают влияние действия человека (членов экипажа, диспетчеров, служб наземной подготовки и т.д.), ошибки в командно-информационном обеспечении, дефекты техники, нарушения топливо- и энергообеспечения, а также воздействия внешней среды, обусловленные метеоусловиями.

Для обеспечения и поддержания безопасности АТС путем парирования критических ситуаций проводится ее процессно-объектная и причинно-следственная декомпозиция [2]. Основным подходом к решению данного класса задач является построение математических моделей и анализ причинно-следственных комплексов (ПСК), рассматриваемых как модели систем [3], и ресурсный поход [4].

Целью исследования является обеспечение безопасности функционирования АТС путем контроля ее параметров и парирования дефектов техники и ошибок экипажа и диспетчера.

1 Постановка задачи

Под обеспечением безопасности на заданном отрезке функционирования АТС понимается выполнение совокупности условий, важнейшим из которых является недопущение угрозы жизни и здоровью людей вследствие нарушений функционирования этой системы. В сущности, задача состоит:

1) в достижении максимально возможной ширины коридора безопасного функционирования при ограниченных ресурсах АТС;
2) в недопущении выхода АТС за пределы этого коридора.

Введем следующие обозначения: X – множество характеристик состояний системы. U - множество управлений (парирующих воздействий). G – множество возмущений. R – комплексный ресурс подсистем АТС, $\overline{R}_{\text{j}}$ – предельное значение комплексного ресурса, V – множество вариантов построения структуры АТС $i = \overline{1,l}$. Предполагается, что имеется необходи-

мая статистическая информация и соответствующая авиационная документация о полетах воздушных судов по выбранному маршруту.

Первая задача формулируется следующим образом:

Требуется максимально расширить коридор безопасного функционирования АТС и определить его границы, исходя из решения следующей задачи:

$\Delta(\vec{x}(t), \vec{u}(t), R_j(t), v_i, \vec{g}(t)) \to \max$ при ограничениях на комплексные ресурсы подсистем F_j ($\vec{x}(t)$, $\vec{u}(t)$, $R_j(t)$, v_i, $\vec{g}(t)) > \overline{R}_j$, где $\vec{x}(t) = (x_1, x_2, ..., x_k)$, $x_q \in X$, $\vec{u}(t) \in U$, $= (u_1, u_2, ..., u_k)$, $u_q \in U$, $\vec{g}(t) \in G$, $= (g_1, g_2, ..., g_k)$, $g_q \in G$, $v_i \in V$, $R_j(t) \in R$, $t \in [0, T]$, $i = \overline{1,l}$, $q = \overline{1,k}$, $j = \overline{1,m}$.

На основе определения границ коридоров штатного функционирования и эффективного парирования необходимо решить задачу удержания АТС в пределах этих границ.

Вторая задача формулируется следующим образом.

Функционирование АТС в пределах коридора безопасного функционирования на отрезке времени $[0, T]$ определяется выражением $x_i(t) \in \Delta(t)$, $i = \overline{1,l}$, $t \in [0, T]$.

Требуется, чтобы в каждый момент $t \in [0, T]$ выполнялось условие

$$(1) \quad \&_{i=1}^{l} x_i(t) \in \Delta(t), t \in [0, T].$$

Наличие в системе ресурса для парирования ошибок и отказов, связанных с выходом $x_i(t)$ за границы штатного функционирования выразим в виде условий $Q_i(x_i(t), u_i(t))$, $i = \overline{1,l}$. Тогда для возврата АТС в коридор безопасного функционирования требуется выполнение условия

$$(2) \quad \&_{i=1}^{l} ((x_i(t) \in \Delta(t)) \vee (Q_i(x_i(t), u_i(t))), \ t \in [0, T].$$

Нарушение условий (1) и (2) в рассматриваемый момент времени t означает возникновение критического сочетания отказов, которое приводит АТС к выходу за пределы коридора безопасного функционирования и, следовательно, к аварийной ситуации.

2 Подход к решению задачи

Пусть задана подсистема a_1 авиационно-транспортной системы. В качестве причины её отказа в момент времени t_1 будем рассматривать достижение ее ресурсом $r(a_1, t_1)$ некоторого критического значения $\underline{r(a_1)}$ при условии, что данная подсистема должна продолжать выполнять свои функции.

Ситуация отказа подсистемы a_1 характеризуется неравенством $r(a_1, r_1) < \underline{r(a_1)}$. Если ресурс подсистемы выражается не одним числом, а совокупностью n компонент (чисел, мультимножеств), то данное неравенство следует понимать следующим образом: существует $i \le n$ такое, что не выполняется ни одно из условий $[\underline{r(a_1)}]_i \subseteq [r(a_1)]_i$, $[\underline{r(a_1)}]_i \le [r(a_1)]_i$. То есть, совокупность $r(a_1, r_1)$ меньше совокупности $\underline{r(a_1)}$ хотя бы в одной компоненте.

Для того чтобы избежать аварийной ситуации, связанной с подсистемой a_1, должна существовать возможность парирования её отказа за счет ресурсов других подсистем на отрезке времени $[t_1, t_1 + \Delta_{a_1}]$. Величина Δ_{a_1} обозначает максимальное время, в течение которого должен быть парирован отказ подсистемы a_1. Если отказ не парируется в течение этого времени, последствия отказа значительно усугубляются, и развивается критическая ситуация.

Предположим, что любая из подсистем a_i, $i = 2, \ldots, n$ способна осуществить это парирование при условии наличия необходимого ресурса $\underline{r(a_i)}$. В этом случае необходимым условием безопасного продолжения работы будет $(r(a_2,t) \geq \underline{r(a_2)}) \vee \ldots \vee (r(a_n,t) \geq \underline{r(a_n)})$ при некотором $t \in [t_1, t_1 + \Delta_{a_1}]$. Далее, с учетом того, что отказ a_1 мог быть предотвращен, получаем следующее условие для возможности парирования отказа a_1:

(3) $(r(a_1,t) \geq \underline{r(a_1)}) \vee (r(a_2,t) \geq \underline{r(a_2)}) \vee \ldots \vee (r(a_n,t) \geq \underline{r(a_n)})$

при некотором $t \in [t_1, t_1 + \Delta_{a_1}]$. Отрицание условия (3) выражается в виде

(4) $(r(a_1,t_1) < \underline{r(a_1)}) \wedge (r(a_2,t) < \underline{r(a_2)}) \wedge \ldots \wedge (r(a_n,t) < \underline{r(a_n)})$.

Это формальное представление условия возникновения критического сочетания событий. Принцип связи между отказами различных подсистем раскрывается в следующем утверждении.

Утверждение. При отсутствии достаточно сильных внешних воздействий, непреодолимых ресурсами АТС, справедливо следующее. Пусть в момент времени T в АТС A зарегистрирована критическая ситуация. Тогда существуют совокупности подсистем A $\{a_1^1, \ldots, a_{n_1}^1\}$, …, $\{a_1^m, \ldots, a_{n_m}^m\}$ и моменты времени t_1, …, $t_m \leq T$ такие, что при истинности хотя бы одного из предикатов $P_1(R(a_1^1,t_1),\ldots,R(a_{n_j}^1,t_1))$, …, $P_m(R(a_1^1,t_m),\ldots,R(a_{n_j}^1,t_m))$, где $m, n_1, \ldots, n_m \in N$, функционирование АТС A в момент T происходило бы в штатном режиме.

Причиной аварийных ситуаций является невозможность своевременного парирования отказов подсистем по причине отказов средств парирования, т.е. когда истинно утверждение (4). Отказ a_1 не парируется своевременно по причине того, что еще раньше израсходованы ресурсы, которые для этого необходимы. По достижении момента $t_1 + \Delta_{a_1}$ ситуация, связанная с отказом подсистемы a_1, который не был парирован, может становиться аварийной как самостоятельно, так и в качестве причины развития отказа другой подсистемы, для которой a_1, в свою очередь, должна была послужить средством парирования. Таким образом, отказы подсистем a_2, …, a_n, хронологически предшествуя отказу a_1, являются также причинами для следствий, связанных с развитием отказа подсистемы a_1. Пары отказов (a_1, a_i) для $i = 2, \ldots, n$ являются потенциальными событиями возможных в будущем цепочек отказов, приводящих к аварийным ситуациям, что должно быть учтено при создании баз знаний условий безопасности для информационно-обучающих и советующих систем.

Такого рода декомпозицию группы событий – причин аварии на основе логических условий можно делать достаточно широкой по времени и стадиям функционирования авиационно-транспортной системы и достаточно глубокой по уровню исследуемых подсистем. В данной работе предлагается использование логических выражений при определении моментов возникновения особых состояний для выявления наиболее опасных из них и установления временной и логической последовательности.

Ресурсы, фигурирующие в условиях безопасности, могут иметь разную размерность и разный характер, что соответствует разнородному характеру подсистем АТС. По этой же причине количество условий безопасности, примером которых является (3), достаточно велико и здесь возможно возникновение более сложных логических выражений.

При проектировании системы разработчику, как правило, приходится решать прямую задачу, где он использует подход, связанный с описанием траектории полета ВС при помощи дифференциальных уравнений движения. При этом условно особые состояния (начало полета, переход от одного этапа к другому, штатные и критические ситуации) определяются проектировщиками на основе соответствующих нормативных документов опыта и статистики.

В условиях эксплуатации условно особые состояния в критических ситуациях заранее не известны, и моменты их возникновения определяются либо на основе расследования уже происшедших событий, либо прогнозируются путем математического моделирования.

3 Проблема парирования сочетаний отказов в критических ситуациях

Парирование сочетаний отказов является важнейшей задачей предотвращения аварий. Для эффективного решения этой проблемы не обязательно парировать все отказы, возникающие в системе, важно парировать отказы из некоторого критического множества, которое выбирается на основе формального анализа структуры возникающего сочетания и предыдущего опыта.

Для успешного применения имеющихся технических методов парирования необходима оценка степени тяжести возможных последствий аварии и затрат, которые потребуются на ее ликвидацию. Оценка трудности парирования сочетаний отказов базируется на оценке парирования отказов отдельных подсистем, определении критического множества отказов, являющихся определяющими для сочетаний, приводящих к авариям и катастрофам.

Пусть a_1, …, a_n – ключевые подсистемы системы A. Типичным отказам каждой подсистемы a_i соответствуют совокупность $M(a_i)$, состоящая из k_i моделей нарушенного функционирования системы: $M(a_i) = (\bar{a}_{i,1},...,\bar{a}_{i,k_i})$. Для каждого отказа $\bar{a} \in M(a_i)$ известен набор возможных средств его парирования $\Omega(\bar{a}) = \{\Omega_1(\bar{a}),...,\Omega_{k_{\bar{a}}}(\bar{a})\}$. Каждое средство парирования $\Omega_j(\bar{a}) \in \Omega(\bar{a})$ представляет собой последовательность воздействий, обеспечивающих возобновление работы отказавшей подсистемы или прекращения нештатного процесса в системе. Для каждой такой последовательности действия требуется затраты определенного количества ресурсов. Парирование $\Omega_j(\bar{a}) \in \Omega(\bar{a})$ возможно, если требуемые ресурсы доступны в системе на тот момент времени, в который требуется их применить.

Взвешенная оценка трудности парирования сочетания отказов зависит от оценок трудности парирования отдельных отказов. Для каждого сочетания существует, по крайней мере, один вариант его парирования – это парирование всех отказов, которые возникают в этом сочетании. В случае, если вариантов несколько, из доступных вариантов парирования может быть выбран вариант с наименьшей оценкой. В случае необходимости парирования нескольких отказов или сочетаний отказов список вариантов парирования каждого из них уменьшается с учетом требований на ресурсы для парирования других отказов. Для решения задач парирования и идентификации исследуемых ситуаций требуется ввести классификацию критических сочетаний событий.

4 Подход к классификации сочетаний событий, приводящих к критическим и аварийным ситуациям

Классификация сочетаний событий является проблемой, решение которой позволит обеспечить поиск причин аварийных ситуаций, а также развить методы прогнозирования и парирования потенциальных аварий и сочетаний событий.

Введем следующие признаки сочетаний событий в АТС:

K_1 – по времени возникновения относительно момента аварии: до аварии, во время аварии, после ее ликвидации т.д.;

K_2 – по продолжительности временного промежутка сочетания событий;

K_3 – по интенсивности появления данного вида сочетания событий на данном отрезке времени, частота появления сочетаний событий;

K_4 – по этапу развития отдельных отказов подсистем: частичный или полный функциональный отказ, инцидент;

K_5 – по объектам и элементам в соответствии с их иерархическим представлением, определяемым технической документацией (по подсистемам): P^*_1 – персонал управления; P^*_2 – программно-аппаратный комплекс управления; P^*_3 – техническая часть АТС; P^*_4 – энергетическая часть АТС; P^*_5 –грузы и пассажиры; P^*_6 – окружающая среда;

K_6 – по составу и количеству разнородных процессов, участвующих в сочетании событий: P_1 - процессы действий экипажей и диспетчеров; P_2 - командно-информационные, управляющие процессы; P_3 - процессы функционирования агрегатов и подсистем АТС; P_4 - процессы топливо- и энергообеспечения; P_5 - процессы действий пассажиров, перемещений грузов и т.д.; P_6 - процессы взаимодействий с внешней средой [3];

K_7 – по видам ошибок экипажа и диспетчеров: организационные ошибки халатность, преднамеренное или случайное искажение информации; ошибки при взаимодействии человека с технической подсистемой;

K_8 – по отношению АТС к окружающей среде: комбинированные многофакторные воздействия окружающей среды, наложение опасных воздействий окружающей среды на функциональные отказы подсистем АТС и другие сочетания этих ситуаций;

K_9 – по степени самостоятельной опасности отдельных отказов, составляющих изучаемое сочетание: сочетания некритичных отказов; сочетания с критичными отказами.

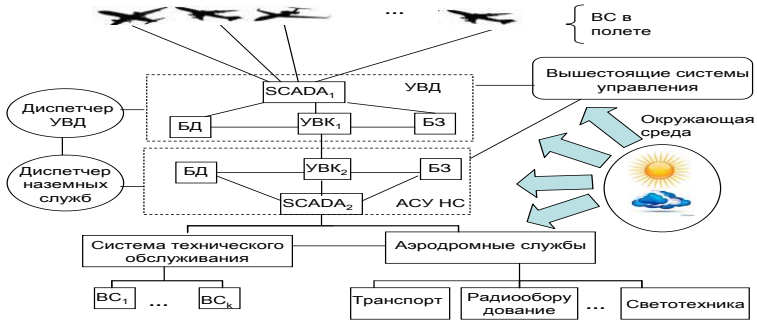
K_{10} – по сложности предотвращения и парирования на текущий момент. Имеется в виду, что на начальных этапах развития последовательности отказов сложность (стоимость) их парирования может быть существенно меньшей, а эффективность – большей и наоборот;

K_{11} – по влиянию на достижение главной цели функционирования системы.

Для различных задач и целей исследования могут быть построены разные иерархические классификации сочетаний событий.

5 Система автоматизированного управления авиационно-транспортной системой

Для практической реализации предлагаемого подхода к обеспечению и поддержанию безопасности АТС была разработана структура информационной системы для поддержки принятия решений при управлении АТС (рисунок 1).



ВС – воздушное судно; УВД – управление воздушным движением; ТС – транспортные средства; УВК – управляющий вычислительный комплекс; БД – база данных; БЗ – база зн ний; АСУ НС - автоматизированная система управления наземными службами; k – количество воздушных судов в контуре системы технического обслуживания.

Рисунок 1 – Система автоматизированного управления авиационно-транспортной системой

Решение задачи в контурах управления данной системой осуществляется на временных интервалах различной длины: час, сутки, месяц и год. На первом из этих интервалов с помощью систем диспетчерского управления и сбора данных $SCADA_1$ и $SCADA_2$ осуществляется сбор информации о процессе функционировании АТС, идентифицируются текущие ситуации, и определяется, какие события, входящие в состав дерева событий, произошли за рассматриваемый период времени. Из этих событий выбираются наиболее значимые, они упорядочиваются по степени их влияния на безопасность функционирования АТС, затем определяются средства их парирования. Соответствующая информация доводится до сведения лиц, принимающих решения, и заносится в компьютерный журнал на электронном носителе для диспетчеров УВД или наземных служб.

Заключение

В ходе проведенных исследований были получены следующие результаты.

Предложен и обоснован подход к решению задачи обеспечения безопасности авиационно-транспортных систем путем парирования критических ситуаций.

Разработаны методы, позволяющие определить ширину коридора безопасного функционирования при ограниченных ресурсах АТС и обеспечить парирование критических ситуаций в процессе ее функционирования.

Разработана структура информационно-обучающей и информационно-советующей систем автоматизированного управления, предназначенных для определения и предотвращения критических ситуаций при оперативном управлении АТС. Для реализации данной системы разработан программный комплекс с использованием интегрированной среды программирования и системы управления базами данных.

Полученные результаты исследований предлагается использовать при создании и совершенствовании тренажеров, информационно-обучающих и информационно-советующих систем, предназначенных для работы в комплексе «экипаж – воздушное судно – диспетчер» авиационно-транспортных систем.

Список литературы

[1] Новожилов Г.В., Неймарк М.С., Цесарский Л.Г. Безопасность полета самолета: Концепция и технология. М.: Изд-во МАИ, 2007. 196 с.

[2] Иванов А.С., Лапковский Р.Ю., Уков Д.А., Филимонюк Л.Ю. Кибернетический подход к моделированию разнородных процессов в мехатронных системах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. №1. С.16-20.

[3] Резчиков А.Ф., Твердохлебов В.А. Причинно-следственные комплексы взаимодействий в производственных процессах // Проблемы управления. 2010. № 3. С.51-60.

[4] Клюев В.В., Резчиков А.Ф., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю. Взаимодействие ресурсов сложных человеко-машинных систем в критических ситуациях // Контроль. Диагностика. 2013. №4. С. 41-45.

Biography

LEONID FILIMONYUK. A scientist of Laboratory of system problem of control science and automation in machine construction of Institute of precision mechanics and control science of Russian Academy of Sciences (IPMCS RAS). Graduated from Saratov State University as an engineer in computing machinery and as a translator of the English language. Worked towards a PhD thesis in IPMCS RAS and defended it. Research area: Cause-effect models for complex systems. The author of one monograph and 22 scientific publications in journals.

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ: ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ С ЭЛЕМЕНТАМИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

А.Г. Ченцов, М.С. Кошелева

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения РАН
620990, Екатеринбург, ул. Софьи. Ковалевской, 16, Россия
chentsov@imm.uran.ru, kosheleva.ms@gmail.com
тел: +7 (343) 374-83-32, факс: +7 (343) 374-25-81

Ключевые слова: *динамическое программирование, маршрут, условия предшествования*.

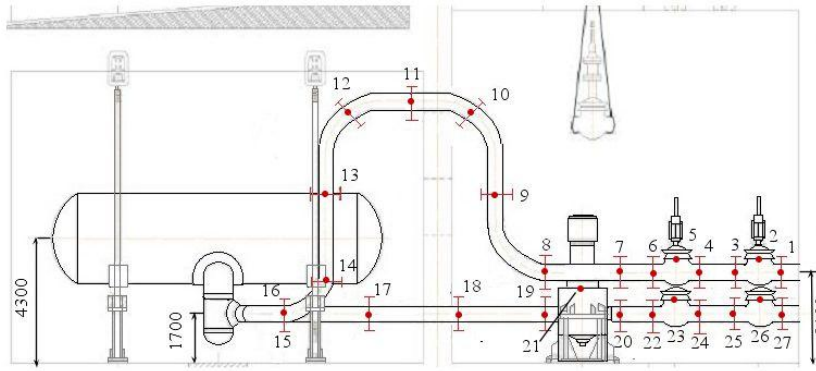
Abstract

We consider a routing problem arising from the real-life problem of dismantling a decommissioned nuclear power unit and investigate the possibility of parallel construction of the layers of the Bellman function in the economic way, without the need to calculate the whole array of its values. The proposed method is intended for real-life problems connected with nuclear power generation when there is a need to minimize the workers exposure to radiation.

Введение

Статья посвящена исследованию одной задачи маршрутизации перемещений с ограничениями и усложнёнными функциями стоимости упомянутых перемещений. Данное усложнение касается ситуации, когда стоимости текущих перемещений явным образом зависят от списка заданий, не выполненных на текущий момент. Эта особенность возникает, в частности, в актуальной инженерной задаче о демонтаже энергоблока АЭС, выведенного из эксплуатации. Речь идёт о маршрутизации перемещений при радиационном воздействии излучающих элементов, подлежащих демонтированию в той или иной очерёдности. При этом воздействие на этапе перемещений от одного излучающего элемента к другому определяется совокупностью излучателей, не демонтированных на момент данного перемещения. Кроме того, имеются многочисленные условия предшествования (условия типа «одно после другого»), порождённые требованиями технологического характера, геометрией системы излучателей и другими соображениями. Целью исследования в упомянутой конкретной задаче является определение маршрута перемещения работника (бригады работников), оптимального с точки зрения совокупной дозы радиации. Схема радиоактивного оборудования (одной циркуляционной петли) энергоблока АЭС представлена на рисунке 1. В связи с данной задачей, возникающей в атомной энергетике, см., в частности, [1,2].

С идейной точки зрения, рассматриваемая постановка имеет своим прототипом известную (труднорешаемую в традиционном понимании) задачу коммивояжёра (ЗК). В связи с последней отметим [3-7]. Для последующих построений особенно существенны исследования [6,7]. Полезно отметить, что в [3], наряду с самой ЗК, рассматривается целый ряд подобных задач маршрутизации, включающих различные особенности, связанные с приложениями. Среди упомянутых модификаций ЗК отметим и задачу курьера. Упомянутая задача имеет непосредственное отношение к последующим построениям, касающимся исследования постановки усложнённой (но также «точечной» в отличие от [8,9]). Ниже используются методы и подходы, разработанные в [10-13].



Радиоактивная система, включающая в себя оборудование, связанное между собой трубопроводами: 12 участков трубопроводов наружным диаметром 550 мм, четыре единицы запорной арматуры (задвижки), парогенератор, циркуляционный насос.

Рисунок 1- Схема одной циркуляционной петли энергоблока №1 Нововоронежской АЭС

1 Система обозначений и постановка задачи

В дальнейшем используется обычная теоретико-множественная символика, включая кванторы, пропорциональные связки; $\triangleq$– равенство по определению, $\emptyset$ – пустое множество. Семейством называем множество, все элементы которого сами являются множествами. В дальнейшем $\mathbb{R}$ – вещественная прямая с (неотрицательной) полуосью $[0,\infty[\triangleq \{\xi \in \mathbb{R} \mid 0 \leq \xi\}$ и для каждого непустого множества $\mathbf{S}$ через $\boldsymbol{\mathcal{R}}_+[\mathbf{S}]$ обозначается множество всех функций из $\mathbf{S}$ в $[0,\infty[$ (в качестве $\mathbf{S}$ в дальнейшем будут использоваться различные множества). Ниже широко используется индексная форма записи функций или отображений [14]. В частности, при $\boldsymbol{m} \in \mathbb{N}$ рассматриваем кортежи вида $(\boldsymbol{x_i})_{i\in\overline{\mathbf{0},\boldsymbol{m}}}$ и $(\boldsymbol{y_i})_{i\in\overline{\mathbf{1},\boldsymbol{m}}}$ со значениями в заданных априори множествах; строго говоря, данные кортежи являются отображениями на $\overline{\mathbf{0},\boldsymbol{m}}$ и $\overline{\mathbf{1},\boldsymbol{m}}$ соответственно, для записи которых удобна индексная форма. Через $\{x\}$ обозначаем одноэлементное множество, содержащее объект x. Если z – упорядоченная пара (УП) объектов x и y, т.е. $z = (x, y)$, то через $pr_1(z)$ и $pr_2(z)$ условимся обозначать соответственно первый и второй элементы z, т.е. $pr_1(z) = x$ и $pr_2(z) = y$. Пусть $\mathbb{N} \triangleq \{\mathbf{1}; \mathbf{2}; \ldots\}$ (множество всех натуральных чисел), $\mathbb{N}_\mathbf{0} \triangleq \{\mathbf{0}\} \cup \mathbb{N} = \{0;1;2\ldots\}$; $\overline{\boldsymbol{k},\boldsymbol{l}} \triangleq \{\boldsymbol{i} \in \mathbb{N}_\mathbf{0} | (\boldsymbol{k} \leq \boldsymbol{i}) \& (\boldsymbol{i} \leq \boldsymbol{l})\}$ $\forall \boldsymbol{k} \in \mathbb{N}_\mathbf{0}$ $\forall \boldsymbol{l} \in \mathbb{N}_\mathbf{0}$. Если $\boldsymbol{K}$ – непустое конечное множество, то $|\boldsymbol{K}| \in \mathbb{N}$ есть его мощность; (полагаем также $|\emptyset| \triangleq 0$). Наряду с УП рассматриваем триплеты: если a, b и c — объекты, то $(\boldsymbol{a},\boldsymbol{b},\boldsymbol{c}) \triangleq ((\boldsymbol{a},\boldsymbol{b}),\boldsymbol{c})$; если A, B и C — множества, то $\boldsymbol{A} \times \boldsymbol{B} \times \boldsymbol{C} \triangleq (\boldsymbol{A} \times \boldsymbol{B}) \times \boldsymbol{C}$. Следуем здесь стандартным определениям [15, с.17].

Всюду в дальнейшем фиксируем число $\boldsymbol{N} \in \mathbb{N}$, $\boldsymbol{N} \geq 2$, число 0 используем в качестве базы (начального пункта) процесса посещения «городов» с индексами из $\overline{1,N}$. Последующие определения извлекаются из [9, ч.2] для случая, когда рассматриваемые в [9, ч.2] мегаполисы являются одноэлементными множествами (синглетонами). Через $\mathbb{P}$ рассматриваем множество всех перестановок в $\overline{1,N}$, называемых (полными) маршрутами посещения «городов», определяемых соответствующими индексами из $\overline{1,N}$ (элементы $\mathbb{P}$ – суть биекции $\overline{1,N}$ на себя). Таким образом, рассматриваем процессы

(1) $\quad 0 \to \alpha(1) \to \cdots \to \alpha(N),$

где $\alpha \in \mathbb{P}$; на выбор α могут накладываться ограничения. С этой целью фиксируем множество $\mathbf{K}$, $\mathbf{K} \subset \overline{1,N} \times \overline{1,N}$ (случай $\mathbf{K} = \emptyset$ не исключается и отвечает отсутствию ограничений в виде условий предшествования). Элементы $\mathbf{K}$, являющиеся УП, называем адресными парами, для

каждой из которых первый элемент имеет смысл отправителя, а второй — получателя (сообщения, груза и т.п.). Постулируем, что для каждого непустого множества $\mathbf{K}_0$, $\mathbf{K}_0 \subset \mathbf{K}$, непременно существует УП $z_0 \in \mathbf{K}_0$, для которой [9, условие 2.2.1] $pr_1(z_0) \neq pr_2(z)\ \forall\, z \in \mathbf{K}_0$. Требуется, чтобы выбранный маршрут $\alpha \in \mathbb{P}$ обеспечивал более ранее (в сравнении с получателем) посещение отправителя для каждой адресной пары. Определяем при $\alpha \in \mathbb{P}$ обратную (к α) перестановку $\alpha^{-1} \in \mathbb{P}$ (итак, $\alpha^{-1}\big(\alpha(k)\big) = \alpha\big(\alpha^{-1}(k)\big) = k\ \ \forall\, k \in \overline{1,N}$). Тогда [9, ч.2]

(2) $\mathbb{A} \triangleq \big\{\alpha \in \mathbb{P} \big| \alpha^{-1}\big(pr_1(h)\big) < \alpha^{-1}\big(pr_2(h)\big)\ \ \forall h \in \mathbf{K}\big\} \neq \emptyset$

есть множество всех допустимых по предшествованию маршрутов, которые только и могут использоваться в (1).

Функции стоимости. Введем способы оценивания перемещения и терминального состояния. Фиксируем отображение $\boldsymbol{c} \in \mathcal{R}_+[\overline{0,N} \times \overline{0,N} \times \mathfrak{N}]$, где $\mathfrak{N}$ – семейство всех непустых подмножеств $\overline{1,N}$; используем $\boldsymbol{c}$ для оценивания перемещений между «городами». Кроме того, пусть $\boldsymbol{f} \in \mathcal{R}_+[\overline{0,N}]$ (содержательный смысл имеют значения $\boldsymbol{f}(t)$ при $t \in \overline{1,N}$; расширенное определение $\boldsymbol{f}$ выбрано из соображений согласования с [10]). На основе $\boldsymbol{c}$ и $\boldsymbol{f}$ формируем аддитивный критерий, полагая при $\alpha \in \mathbb{P}$, что

(3) $\mathfrak{C}_\alpha \triangleq \boldsymbol{c}(0, \alpha(1), \overline{1,N}) + \sum_{t=1}^{N-1} \boldsymbol{c}(\alpha(t), \alpha(t+1), \{\alpha(j): j \in \overline{t+1,N}\}) + \boldsymbol{f}\big(\alpha(N)\big).$

При этом $(\mathfrak{C}_\alpha)_{\alpha\in\mathbb{P}} \in \mathcal{R}_+[\mathbb{P}]$. Основная задача маршрутизации (ОЗМ) имеет следующий вид

(4) $\mathfrak{C}_\alpha \to min,\ \alpha \in \mathbb{A}.$

Через V обозначаем значение (экстремум) задачи (4), т.е. наименьшее из чисел $\mathfrak{C}_\alpha$, $\alpha \in \mathbb{A}$. Маршрут $\alpha_0 \in \mathbb{A}$ называем оптимальным, если $\mathfrak{C}_{\alpha_0} = V$. Наша цель состоит в определении V и построении какого-либо оптимального маршрута.

2 Расширение основной задачи и метод динамического программирования

Задача (4) содержит ограничение (в виде условий предшествования) на маршрут «в целом», чем затрудняется непосредственное применение аппарата на основе динамического программирования (ДП). В этой связи подобно [9, ч.2] мы сначала осуществляем преобразование системы ограничений, подменяя допустимость (маршрутов) по предшествованию допустимостью по вычёркиванию (заданий из списка). Новые ограничения сводятся к условиям на переход от выполнения одного задания к выполнению другого. Используя данные преобразования, наряду с ОЗМ (4) рассматриваем частичные задачи. Речь идет о случае посещения «городов» из множеств $K \in \mathfrak{N}$ при условии, что начальный пункт есть $s \in \overline{0,N}$ (разумеется, вариант $s = 0$ и $K = \overline{1,N}$ здесь также допускается). Для формирования упомянутых частичных задач мы, следуя [9], заменяем, как уже отмечалось, допустимость по предшествованию допустимостью «по вычеркиванию», используя при этом оператор I [9, (2.2.27), (2.2.28)], действующий в $\mathfrak{N}$.

В связи с построением расширения ОЗМ введем при $K \in \mathfrak{N}$ в рассмотрение множество $(\mathrm{bi})[K]$ всех биекций «отрезка» $\overline{1,|K|}$ на K (итак, элементы $(\mathrm{bi})[K]$ – суть взаимно однозначные отображения $\overline{1,|K|}$ на K и только они), а также множество $(\mathbf{I} - \mathrm{bi})[K]$ всех биекций $\alpha \in (\mathrm{bi})[K]$ со свойством $\alpha(k) \in \mathbf{I}(\{\alpha(l): l \in \overline{k,|K|}\})\ \forall k \in \overline{1,|K|}$. Биекции из множества $(\mathbf{I} - \mathrm{bi})[K]$ будем называть частичными маршрутами, допустимыми по вычеркиванию. Напомним, что [9, ч. 2] $(\mathbf{I} - \mathrm{bi})[K] \neq \emptyset\ \ \forall K \in \mathfrak{N}$. Кроме того, $\mathbb{A} = (\mathbf{I} - \mathrm{bi})[\overline{1,N}]$ [9, (2.2.32), теорема 2.2.1]; легко видеть, что $\mathbb{A} = \{\alpha \in \mathbb{P}\ |\alpha(k) \in \mathbf{I}(\overline{1,N} \backslash \{\alpha(l): l \in \overline{1,k-1}\})\ \ \forall k \in \overline{1,N}\}$. Условимся о соглашении: под расширением ОЗМ понимаем определенную ниже систему частич-

ных задач. Если $s \in \overline{0,N}$, $K \in \mathfrak{N}$ и $|K| \geq 2$, то рассматриваем задачу, которой сопоставляем экстремум (значение)

$$v(s,K) = \min_{\alpha \in (\mathbf{I}-\mathrm{bi})[K]} [\boldsymbol{c}(s,\alpha(1),K) + \sum_{t=1}^{|K|-1} \boldsymbol{c}\big(\alpha(t),\alpha(t+1),\{\alpha(j): j \in \overline{t+1,|K|}\}\big) + \boldsymbol{f}\big(\alpha(|K|)\big)]. \quad (5)$$

Если же (при $s \in \overline{0,N}$ и $K \in \mathfrak{N}$) $|K| = 1$, то определяем $\mathrm{v}(s,K) \triangleq \boldsymbol{c}(s,r,\{r\}) + \boldsymbol{f}(r)$, где $r \in \overline{1,N}$ есть такой единственный индекс, для которого $K = \{r\}$. В этом случае мы рассматриваем $\mathrm{v}(s,K)$ как значение простейшей задачи о переходе из «города» с номером s в «город» с номером r. Полагаем, наконец, что $\mathrm{v}(s,\emptyset) \triangleq \boldsymbol{f}(s)\ \forall s \in \overline{0,N}$. Определяя $\mathbf{N} \triangleq \mathfrak{N} \cup \{\emptyset\}$, мы получаем функцию Беллманаv: $\overline{0,\mathrm{N}} \times \mathbf{N} \to [0,\infty[$, определённую вышеупомянутыми условиями. Из теоремы [9, с.71] вытекает следующее

Предложение 1. Если $s \in \overline{0,N}$ и $K \in \mathfrak{N}$, то справедливо равенство

$$\mathrm{v}(s,K) = \min_{j \in \mathbf{I}(K)} [\boldsymbol{c}(s,j,K) + \mathrm{v}(j,K\backslash\{j\})].$$

Получено уравнение Беллмана. Напомним, что при $\alpha \in \mathbb{A}$ реализуется включение $\alpha \in (\mathbf{I}-\mathrm{bi})[\overline{1,N}]$, а тогда согласно (3) $\mathfrak{C}_\alpha$ есть критерий задачи (5) в условиях $s = 0$, $K = \overline{1,N}$. Поэтому имеем равенство $\mathrm{v}(0,\overline{1,N}) = V$. Таким образом, формирование маршрутов $\alpha \in \mathbb{A}$ сводится к организации последовательной процедуры: сначала выбирается $\alpha(1) \in \mathbf{I}(\overline{1,N})$, после чего вычёркивается; далее выбирается $\alpha(2) \in \mathbf{I}(\overline{1,N}\backslash\{\alpha(1)\})$ и снова вычёркивается и так далее. Конкретный выбор $\alpha(1),\ldots,\alpha(N-1)$ можно подчинить соображениям, связанным с оптимизацией в классе маршрутов, допустимых по вычёркиванию, а, стало быть, и по предшествованию. Вполне очевидно, что

$$V = \min_{j \in \mathbf{I}(\overline{1,N})} [\boldsymbol{c}(0,j,\overline{1,N}) + v(j,\overline{1,N}\backslash\{j\})].$$

3 Экономичный вариант метода динамического программирования: слои функции Беллмана

Предложение 1 в сочетании с ранее упомянутым краевым условием, формулируемым в терминах $\boldsymbol{f}$, определяет принципиальную возможность построения «всей» функции Беллмана v. Однако, практически это возможно лишь для задачи очень малой размерности. Можно, однако, ограничиться построением лишь некоторой «части» массива значений упомянутой функции. Для реализации данного подхода в дальнейшем используем конструкцию [9, §4.9], важную роль в которой играют существенные (по предшествованию) списки заданий: $\mathbf{G} \triangleq \{K \in \mathfrak{N} |\ \forall \mathrm{z} \in \mathbf{K}\ \ (pr_1(z) \in \mathrm{K}) \Rightarrow (pr_2(z) \in \mathrm{K})\}$ есть множество всех существенных списков. Элементы $\mathbf{G}$ ранжируем по мощности, полагая $\mathbf{G}_s \triangleq \{K \in \mathbf{G} |\ \mathrm{s} = |K|\}\ \forall \mathrm{s} \in \overline{1,N}$. Тогда $\mathbf{G}_N = \{\overline{1,\mathrm{N}}\}$ (одноэлементное семейство, содержащее $\overline{1,N}$); кроме того,

$$\mathbf{G}_{s-1} = \{K\backslash\{t\}: K \in \mathbf{G}_s,\ t \in \mathbf{I}(K)\}\ \forall \mathrm{s} \in \overline{2,\mathrm{N}}. \quad (6)$$

Тем самым реализуется рекуррентная процедура построения всех семейств $\mathbf{G}_1,\ldots,\mathbf{G}_N$ (подробнее см. в [12]). Отметим очень простое представление $\mathbf{G}_1$, полагая $\mathbb{K}_1 \triangleq \{pr_1(z): z \in \mathbf{K}\}$ и $\mathbf{M} = \overline{1,N}\backslash\mathbb{K}_1$: $\mathbf{G}_1 = \big\{\{\mathrm{t}\}: \mathrm{t} \in \mathbf{M}\big\}$. С каждым семейством $\mathbf{G}_1,\ldots,\mathbf{G}_N$ связываем соответствующий слой пространства позиций.

Полагаем, что $D_0 \triangleq \{(s,\emptyset): s \in \mathbf{M}\}$, что согласуется с [9, с.174]. Кроме того, $D_N \triangleq \{(0,\overline{1,N})\}$ (синглетон, содержащий УП $(0,\overline{1,N})$). Для построения слоёв $D_1,\ldots,D_{N-1}$напомним следующую конструкцию [9, §4.9]: если $s \in \overline{1,N-1}$, то $\mathcal{J}_s(K) \triangleq \{i \in \overline{1,N}\backslash K | \{i\} \cup K \in \mathbf{G}_{s+1}\}\ \forall K \in \mathbf{G}_s$; с учетом этого определяем слой

$$D_s \triangleq \bigcup_{K \in \mathbf{G}_s} \{(j,K): j \in \mathcal{J}_s(K)\}.$$

Таким образом, определены все слои $D_0, D_1, \ldots, D_N$ пространства позиций. При этом [9, предложение 4.9.3] упомянутые слои являются непустыми множествами: $D_s \neq \emptyset \ \ \forall s \in \overline{0,N}$. Напомним следующее важное свойство [9, предложение 4.9.4]

(7) $(l, K\backslash\{l\}) \in D_{s-1} \ \forall s \in \overline{1,N} \ \ \forall (i,K) \in D_s \ \ \forall l \in \mathbf{I}(K)$.

В этих терминах определяем слои самой функции Беллмана: если $s \in \overline{0,N}$, то v_s: $D_s \to [0,\infty[$ определяется правилом:

(8) $\mathrm{v}_s(i,K) \triangleq \mathrm{v}(i,K) \quad \forall (i,K) \in D_s$.

С учётом (7) и (8) мы получаем, что при всяком выборе $s \in \overline{1,N}$ и $(i,K) \in D_s$ определено значение $\mathrm{v}_{s-1}(l, K\backslash\{l\}) \in [0,\infty[$, где $l \in \mathbf{I}(K)$. Поэтому определено наименьшее из величин $\boldsymbol{c}(i,l,K) + \mathrm{v}_{s-1}(l, K\backslash\{l\}), l \in \mathbf{I}(K)$.

Предложение 2. Если $s \in \overline{1,N}$ и $(i,K) \in D_s$, то

$\mathrm{v}_s(i,K) = \min\limits_{l \in \mathbf{I}(K)} [\boldsymbol{c}(i,l,K) + \mathrm{v}_{s-1}(l, K\backslash\{l\})]$.

Доказательство извлекается из [10, (3.13), (3.15)]. При этом $\mathrm{v}_0(t,\emptyset) = \boldsymbol{f}(t) \ \forall t \in \mathbf{M}$. Далее, согласно предложению 2 при $m \in \overline{0,N-1}$ преобразование $\mathrm{v}_m \to \mathrm{v}_{m+1}$определяется условиями: если $(i,K) \in D_{m+1}$, то

(9) $\mathrm{v}_{m+1}(i,K) = \min_{l \in \mathbf{I}(K)} [\boldsymbol{c}(i,l,K) + \mathrm{v}_m(l, K\backslash\{l\})]$.

После исполнения N шагов типа (9) будет, в частности, определено значение $\mathrm{v}_{\mathrm{N}}(0,\overline{1,N}) \in [0,\infty[$ (см. представление D_N), для которого согласно (8) $\mathrm{v}_{\mathrm{N}}(0,\overline{1,N}) = \mathrm{v}(0,\overline{1,N}) = V$. Таким образом, определена рекуррентная процедура $v_0 \to v_1 \to \cdots \to v_N$, где v_N определяет экстремум V основной задачи.

Процедура построения оптимального маршрута подробно излагается в [11]; см. также [8, 12, 13].

4 Схема независимых вычислений

В настоящем разделе будет изложена конструкция положений [8, 12, 13] для рассматриваемого в настоящей работе «точечного» варианта маршрутной задачи. Для этого мы сначала отметим некоторые простые следствия построений раздела 3. Так, в частности, из (6) вытекает, что $\mathbf{G}_{N-1} = \{\overline{1,N} \setminus \{j\} : j \in \mathbf{I}(\overline{1,N})\}$. Мы можем занумеровать множества семейства $\mathbf{G}_{N-1}$ индексами из $\mathbf{I}(\overline{1,N})$. Полагаем в дальнейшем, что упомянутые множества распределяются между процессорами; каждому процессору соответствует, таким образом, индекс из $\mathbf{I}(\overline{1,N})$.

Напомним, что $\mathcal{J}_{N-1}(K) = \{i \in \overline{1,N}\backslash K \mid \{i\} \cup K = \overline{1,N}\} \quad \forall K \in \mathbf{G}_{N-1}$. Тогда определены множества $\mathcal{J}_{N-1}(\overline{1,N}\backslash\{j\}), \ j \in \mathbf{I}(\overline{1,N})$. Из [12, предложение 5] вытекает, что $\mathcal{J}_{N-1}(\overline{1,N}\backslash\{j\}) = \{j\} \ \ \forall j \in \mathbf{I}(\overline{1,N})$. Множество D_{N-1} принимает следующий вид

(10) $\mathrm{D}_{N-1} = \{(j, \overline{1,N} \setminus \{j\}) : j \in \mathbf{I}(\overline{1,N})\}$;

в силу (10) можно рассматривать позиции $(j, \overline{1,N} \setminus \{j\}), \ j \in \mathbf{I}(\overline{1,N})$, как стартовые в схеме построения слоёв функции Беллмана в режиме независимых вычислений: каждый процессор получит свою стартовую позицию. Напомним, что

(11) $\mathrm{V} = \min\limits_{j \in \mathbf{I}(\overline{1,N})} [\mathbf{c}(0, j, \overline{1,N}) + v_{N-1}(j, \overline{1,N} \setminus \{j\})]$.

Для вычисления V надо, следовательно, определить все значения $v_{N-1}(j, \overline{1,N} \setminus \{j\}), \ j \in \mathbf{I}(\overline{1,N})$.

В дальнейшем полагаем, что $3 \le N$. Следуя [12, 13] введём в рассмотрение траектории в пространстве списков: если $K \in \mathbf{G}_{N-1}$, то через $\mathsf{T}[K]$ обозначаем множество всех кортежей $(K_i)_{i \in \overline{0,N-2}}$: $\overline{0,N-2} \to \mathbf{G}$ для каждого из которых

(12) $(K_0 = K)$ & $(\forall j \in \overline{1,N-2} \;\; \exists\, s \in \mathbf{I}(K_{j-1}) : K_j = K_{j-1} \setminus \{s\})$

Тогда, в частности, определены множества $\mathsf{T}[\overline{1,N} \setminus \{j\}]$, $j \in \mathbf{I}(\overline{1,N})$, каждое из которых состоит из траекторий (12).

При этом [12, предложение 6] для $K \in \mathbf{G}_{N-1}$, $(K_i)_{i \in \overline{0,N-2}} \in \mathsf{T}[K]$ и $j \in \overline{0,N-2}$ выполняется $K_j \in \mathbf{G}_{N-(j+1)}$. Кроме того, из [12, предложение 7] вытекает, что

(13) $\mathsf{T}[K] \neq \emptyset \quad \forall K \in \mathbf{G}_{N-1}$.

С пучками траекторий $\mathsf{T}[K]$, $K \in \mathbf{G}_{N-1}$, естественным образом связывается понятие областей достижимости (ОД) [12, (62)]: если $K \in \mathbf{G}_{N-1}$ и $t \in \overline{0,N-2}$, то ОД в момент t есть $\widetilde{\mathbb{T}}[K;t] \triangleq \{K_t : (K_i)_{i \in \overline{0,N-2}} \in \mathsf{T}[K]\}$. Легко видеть, что (см. [12, (63)]) при всяком выборе $K \in \mathbf{G}_{N-1}$ $\big(\widetilde{\mathbb{T}}[K;0] = \{K\}\big)\&\big(\widetilde{\mathbb{T}}[K;N-2] \subset \mathbf{G}_1\big)$. Кроме того, согласно [12, предложение 11] $\widetilde{\mathbb{T}}[K;t] \subset \mathbf{G}_{N-(t+1)}$ $\forall K \in \mathbf{G}_{N-1}$. Из [12, предложение 12] вытекает, что справедлива система равенств

(14) $\mathbf{G}_{N-(t+1)} = \bigcup\limits_{K \in \mathbf{G}_{N-1}} \widetilde{\mathbb{T}}[K;t] \;\; \forall t \in \overline{0,N-2}.$

Вместе с тем согласно [12, предложение 13] имеем при $K \in \mathbf{G}_{N-1}$, $t \in \overline{0,N-3}$, $\mathrm{M} \in \widetilde{\mathbb{T}}[K;t]$ и $j \in \mathbf{I}(\mathrm{M})$ $\mathrm{M}\setminus\{j\} \in \widetilde{\mathbb{T}}[K;t+1]$. Отметим, что при $K \in \mathbf{G}_{N-1}$, $s \in \overline{2,N-1}$ и $\mathrm{M} \in \widetilde{\mathbb{T}}[K;N-(s+1)]$ $\mathrm{M}\setminus\{j\} \in \widetilde{\mathbb{T}}[K;N-s]$ $\forall j \in \mathbf{I}(\mathrm{M})$. С учётом [12, предложение 14] получаем, что

(15) $\widetilde{\mathbb{T}}[K;t] \in \mathcal{P}'\big(\mathbf{G}_{N-(t+1)}\big) \;\; \forall K \in \mathbf{G}_{N-1}, \forall t \in \overline{0,N-2}.$

Заметим, в частности, при $K \in \mathbf{G}_{N-1}$ и $(K_i)_{i \in \overline{0,N-2}} \in \mathsf{T}[K]$ $K_{N-2} \in \mathbf{G}_1$. Здесь уместна следующая конкретизация $\widetilde{\mathbb{T}}[K;N-2] \in \mathcal{P}'(\mathbf{G}_1)$ $\forall K \in \mathbf{G}_{N-1}$.

Отметим теперь следующее свойство (см. [12, предложение 16]):

(16) $\widetilde{\mathbb{T}}[K;t+1] = \{\mathrm{M}\setminus\{j\} : \mathrm{M} \in \widetilde{\mathbb{T}}[K,t], \quad j \in \mathbf{I}(\mathrm{M})\}$
$\forall K \in \mathbf{G}_{N-1} \;\; \forall t \in \overline{0,N-3}.$

Таким образом (см. (16)), мы располагаем рекуррентной процедурой построения ОД для каждого фиксированного списка $K \in \mathbf{G}_{N-1}$: $\big(\widetilde{\mathbb{T}}[K;0] = \{K\}\big) \to \widetilde{\mathbb{T}}[K;1] \to \cdots \to \widetilde{\mathbb{T}}[K;N-2]$.

5 Структура потоков значений функции Беллмана

Конструкцию настоящего раздела можно рассматривать как естественную конкретизацию положений [12, раздел 6] (см. также [12, 13]). В связи с построением слоёв $\mathrm{D}_1, \ldots, \mathrm{D}_{N-1}$ уместно ввести клетки пространства позиций: полагаем, что $\mathbb{D}_s[\mathrm{H}] \triangleq \{(j,\mathrm{H}) : j \in \mathcal{J}_s(\mathrm{H})\}$ $\forall s \in \overline{1,N-1}$ $\forall \mathrm{H} \in \mathbf{G}_s$. Легко видеть [12, (92)], что клетки являются непустыми; кроме того, $\mathbb{D}_s[\mathrm{H}] \subset \mathrm{D}_s$ $\forall s \in \overline{1,N-1}$ $\forall \mathrm{H} \in \mathbf{G}_s$. При $t \in \overline{0,N-2}$ имеем $N-(t+1) \in \overline{1,N-1}$, а потому определено семейство $\mathbf{G}_{N-(t+1)}$; при этом для $\mathrm{H} \in \mathbf{G}_{N-(t+1)}$ определена клетка $\mathbb{D}_{N-(t+1)}[\mathrm{H}]$. В этом построении согласно (14) можно полагать, что $\mathrm{H} \in \widetilde{\mathbb{T}}[K;t]$ при некотором $K \in \mathbf{G}_{N-1}$. Таким образом [12, (93)],

(17) $\mathbb{D}_{N-(t+1)}[\mathrm{H}] \in \mathcal{P}'\big(\mathrm{D}_{N-(t+1)}\big)\ \forall K \in \mathbf{G}_{N-1}\ \forall t \in \overline{0,N-2}\ \forall \mathrm{H} \in \widetilde{\mathbb{T}}[K;t]$.

С учётом (15) и (17) корректно определяются следующие множества-объединения

(18) $\bigcup\limits_{\mathrm{H}\in\widetilde{\mathbb{T}}[K;t]} \mathbb{D}_{N-(t+1)}[\mathrm{H}] \in \mathcal{P}'\big(\mathrm{D}_{N-(t+1)}\big) \forall K \in \mathbf{G}_{N-1} \forall t \in \overline{0,N-2}$.

Из (18) вытекает очевидное включение, отвечающее «моменту времени» $t = N-2$. Именно

(19)) $\bigcup\limits_{\mathrm{H}\in\widetilde{\mathbb{T}}[K;N-2]} \mathbb{D}_1[\mathrm{H}] \in \mathcal{P}'(\mathrm{D}_1)$.

Если же $s \in \overline{1,N-1}$, то $t_s \triangleq N-(s+1) \in \overline{0,N-2}$, а потому согласно (15) определена ОД $\widetilde{\mathbb{T}}[K;N-(s+1)] = \widetilde{\mathbb{T}}[K;t_s] \in \mathcal{P}'(\mathbf{G}_s)$, где $K \in \mathbf{G}_{N-1}$; в этом случае можно использовать (18): определено множество-объединение

(20) $\mathfrak{D}_s[K] \triangleq \bigcup\limits_{\mathrm{H}\in\widetilde{\mathbb{T}}[K;N-(s+1)]} \mathbb{D}_s[\mathrm{H}] \in \mathcal{P}'(\mathrm{D}_s) \forall s \in \overline{1,N-1}\ \ \forall K \in \mathbf{G}_{N-1}$.

В частности, из (20) получаем, что при $K \in \mathbf{G}_{N-1}$

(21) $\widetilde{\mathbb{T}}[K;N-2] \in \mathcal{P}'(\mathbf{G}_1)\colon\ \mathfrak{D}_1[K] = \bigcup\limits_{\mathrm{H}\in\widetilde{\mathbb{T}}[K;N-2]} \mathbb{D}_1[\mathrm{H}] \in \mathcal{P}'(\mathrm{D}_1)$.

Из [12, предложение 15] вытекает, что

(22) $(h, \mathbb{K}\backslash\{h\}) \in \mathfrak{D}_s[K]\ \forall K \in \mathbf{G}_{N-1}\ \ \forall s \in \overline{1,N-2}\ \ \forall (i,\mathbb{K}) \in \mathfrak{D}_{s+1}[K]\ \ \forall h \in \mathbf{I}(K)$.

Новые слои $\mathfrak{D}_1[K], \dots, \mathfrak{D}_{N-1}[K]$, образуют при выборе каждого списка $K \in \mathbf{G}_{N-1}$, поток пространства позиций. Совокупность таких потоков определяет прежние слои $\mathrm{D}_1, \dots, \mathrm{D}_{N-1}$. Действительно, согласно [12, предложение 17] $\forall s \in \overline{1,N-1}$

(23) $\mathrm{D}_\mathrm{s} = \bigcup\limits_{K\in\mathbf{G}_{N-1}} \mathfrak{D}_s[K] = \bigcup\limits_{j\in\mathbf{I}(\overline{1,N})} \mathfrak{D}_s[\overline{1,N}\backslash\{j\}]$.

С множествами (20) связываем потоки значений функции Беллмана. Итак, полагаем при $s \in \overline{1,N-1}$ и $K \in \mathbf{G}_{N-1}$, что $\mathcal{W}_s[K] \in \mathcal{R}_+\big[\mathfrak{D}_s[K]\big]$ определяется условиями (см. (9), (20))

(24) $\mathcal{W}_s[K](i,\mathrm{P}) \triangleq v_s(i,\mathrm{P})\ \ \forall (i,\mathrm{P}) \in \mathfrak{D}_s[K]$.

В частности, при $K \in \mathbf{G}_{N-1}\ \ \mathcal{W}_1[K] = \big(v(i,P)\big)_{(i,P)\in\mathfrak{D}_1[K]} \in \mathcal{R}_+\big[\mathfrak{D}_1[K]\big]$; ясно, что для $(\mathbb{j}, Q) \in \mathfrak{D}_1$ справедливо также равенство

(25) $\mathcal{W}_1[K](\mathbb{j}, Q) = v_1(\mathbb{j}, Q)$.

Напомним, что $v_1 \in \mathcal{R}_+[\mathrm{D}_1]$ и согласно предложению 2 для $(j,\mathrm{T}) \in \mathrm{D}_1\ \ \mathrm{T} = \{t\}$, где $t \in \overline{1,N}\backslash\mathbb{K}_1$, что означает $\mathbf{I}(\mathrm{T}) = \mathbf{I}(\{t\}) = \{t\} = \mathrm{T}$, а тогда при $l \in \mathbf{I}(\mathrm{T})$ имеем $l = t$; поэтому (см. (8)) $(l, \mathrm{T}\backslash\{l\}) = (t,\emptyset) \in \mathrm{D}_0$, где $t \in \mathbf{M}$, что доставляет, в частности равенства $v_0(l, \mathrm{T}\backslash\{l\}) = v_0(t,\emptyset) = \mathbf{f}(t)$. Возвращаясь к $(j,\mathrm{T}) \in \mathrm{D}_1$ получаем из предложения 2, что

(26) $v_1(j,\mathrm{T}) = \min_{l\in\mathrm{T}}[\mathbf{c}(j,l,\mathrm{T}) + \mathbf{f}(t)] = \mathbf{c}(j,t,\{t\}) + \mathbf{f}(t)$,

где $t \in \overline{1,N}\backslash\mathbb{K}_1$ таково, что $\mathrm{T} = \{t\}$. Это свойство (см. (26)) следует учесть в (25): если $K \in \mathbf{G}_{N-1}$ и $(\mathbb{j}, Q) \in \mathfrak{D}_1[K]$, то с учетом (21) имеем для некоторого $q \in \mathbf{M}$ равенство $Q = \{q\}$, а потому согласно (25), (26) $\mathcal{W}_1[K](\mathbb{j}, Q) = \mathbf{c}(\mathbb{j}, q, \{q\}) + \mathbf{f}(q)$. Согласно определению $\mathbf{G}_1$ (см. раздел 3) $\forall K \in \mathbf{G}_{N-1}\ \forall \mathrm{H} \in \widetilde{\mathbb{T}}[K;N-2]\ \exists h \in \mathbf{M}\colon \mathrm{H} = \{h\}$. Полагаем, что

(27) $\mathbf{M}_0[K] \triangleq \{h \in \mathbf{M} \mid \{h\} \in \widetilde{\mathbb{T}}[K;N-2]\}\ \forall K \in \mathbf{G}_{N-1}$.

Из (27) вытекает, что

(28) $\forall K \in \mathbf{G}_{N-1} \forall \mathrm{H} \in \widetilde{\mathbb{T}}[K;N-2]\ \exists h \in \mathbf{M}_0\colon \mathrm{H} = \{h\}$.

Поскольку при $K \in \mathbf{G}_{N-1}\widetilde{\mathbb{T}}[K; N-2]$ есть непустое множество, то согласно (28)

(29) $\mathbf{M}_0[K] \in \mathcal{P}'(\mathbf{M})$: $\widetilde{\mathbb{T}}[K; N-2] = \{\{h\} : h \in \mathbf{M}_0[K]\}$.

С учетом (29), модифицируем определение семейств $\mathfrak{D}_1[K]$, $K \in \mathbf{G}_{N-1}$; а именно:

(30) $\mathfrak{D}_1[K] = \bigcup_{\mathrm{h}\in\mathbf{M}_0[\mathrm{K}]} \mathbb{D}_1[\{\mathrm{h}\}] \quad \forall K \in \mathbf{G}_{N-1}$.

Учитываем, что при всяком выборе $K \in \mathbf{G}_{N-1}$ и позиции $(\mathbb{j}, Q) \in \mathfrak{D}_1[K]$ (см.(30)) при некотором $\bar{h} \in \mathbf{M}_0[\mathrm{K}]$ реализуется включение $(\mathbb{j}, Q) \in \mathbb{D}_1[\{\bar{h}\}]$; тогда $\{\bar{h}\} \in \widetilde{\mathbb{T}}[K; N-2]$ при $\bar{h} \in \mathbf{M}$. Это означает, что $Q = \{\bar{h}\}$ и $\mathbb{j} \in \mathcal{J}_1(\{\bar{h}\})$, т.е. $\mathbb{j} \in \overline{1,N}\backslash\{\bar{h}\}$ и $\{\mathbb{j}\} \cup \{\bar{h}\} = \{\mathbb{j}; \bar{h}\} \in \mathbf{G}_2$. В итоге $\mathcal{W}_1[K](\mathbb{j}, Q) = \mathbf{c}(\mathbb{j}, \bar{h}, \{\bar{h}\}) + \mathbf{f}(\bar{h})$. Получили систему равенств

(31) $\mathbb{D}_1[\mathrm{H}] = \{(j, \mathrm{H}): j \in \mathcal{J}_1(\mathrm{H})\} \ \forall \mathrm{H} \in \mathbf{G}_1$.

Как следствие из (21) и (31) имеем

(32) $\mathbb{D}_1[\mathrm{H}] = \{(j, \mathrm{H}): j \in \mathcal{J}_1(\mathrm{H})\} \ \forall K \in \mathbf{G}_{N-1} \forall \mathrm{H} \in \widetilde{\mathbb{T}}[K; N-2]$.

Согласно (27) и (21) при $K \in \mathbf{G}_{N-1}$ и $h \in \mathbf{M}_0[\mathrm{K}]$ имеем $\{h\} \in \mathbf{G}_1$, а потому (см. раздел 3) определено $\mathcal{J}_1(\{h\})$. С учётом (29) и (32) получаем, что

(33) $\mathbb{D}_1[\{h\}] = \{(j, \{h\}): j \in \mathcal{J}_1(\{h\})\} \ \forall K \in \mathbf{G}_{N-1} \forall h \in \mathbf{M}_0[K]$.

Из (33) и (30) вытекают равенства

(34) $\mathfrak{D}_1[K] = \bigcup_{\mathrm{h}\in\mathbf{M}_0[\mathrm{K}]} \{(j, \{h\}): j \in \mathcal{J}_1(\{h\})\} \quad \forall K \in \mathbf{G}_{N-1}$.

Следовательно, при $K \in \mathbf{G}_{N-1}$ и $(\mathbb{j}, Q) \in \mathfrak{D}_1[K]$ непременно реализуется равенство $(\mathbb{j}, Q) = (j, \{h\})$для некоторых $\mathrm{h} \in \mathbf{M}_0[\mathrm{K}]$ и $j \in \mathcal{J}_1(\{h\})$. При этом h определяется по $(\mathbb{j}, Q) \in \mathfrak{D}_1[K]$ единственным образом. Согласно (27) и (21) при $K \in \mathbf{G}_{N-1}$ и $\mathrm{h} \in \mathbf{M}_0[\mathrm{K}]$ имеем $\{h\} \in \mathbf{G}_1$ а потому (см. раздел 3) определено $\mathcal{J}_1(\{h\})$. Теперь мы получаем при $K \in \mathbf{G}_{N-1}$, $\mathrm{h} \in \mathbf{M}_0[\mathrm{K}]$ и $\mathbb{j} \in \mathcal{J}_1(\{h\})$, что

(35) $\mathcal{W}_1[K](j, \{h\}) = \mathbf{c}(j, h, \{h\}) + \mathbf{f}(h)$.

С учётом (34) получаем при $K \in \mathbf{G}_{N-1}$, что (35) полностью определяет функцию $\mathcal{W}_1[K]$.

При $K \in \mathbf{G}_{N-1}$, $l \in \overline{1, N-2}$, $(i, \mathrm{P}) \in \mathfrak{D}_{l+1}[K]$ и $h \in \mathbf{I}(\mathrm{P})$ определено значение $\mathcal{W}_l[K](h, \mathrm{P}\backslash\{h\}) = v_l(h, \mathrm{P}\backslash\{h\}) \in [0, \infty[$. Как следствие при $K \in \mathbf{G}_{N-1}$, $l \in \overline{1, N-2}$ и $(i, \mathrm{P}) \in \mathfrak{D}_{l+1}[K]$

(36) $\min_{h\in\mathbf{I}(\mathrm{P})}[\mathbf{c}(i, h, \mathrm{P}) + \mathcal{W}_l[K](h, \mathrm{P}\backslash\{h\})] = \min_{h\in\mathbf{I}(\mathrm{P})}[\mathbf{c}(i, h, \mathrm{P}) + v_l(h, \mathrm{P}\backslash\{h\})]$.

Предложение 5.1. Если $K \in \mathbf{G}_{N-1}$, $l \in \overline{1, N-2}$, $(i, \mathrm{P}) \in \mathfrak{D}_{l+1}[K]$, то

(37) $\mathcal{W}_{l+1}[K](i, \mathrm{P}) = \min_{h\in\mathbf{I}(\mathrm{P})}[\mathbf{c}(i, h, \mathrm{P}) + \mathcal{W}_l[K](h, \mathrm{P}\backslash\{h\})]$.

Доказательство. Будем использовать (36). Кроме того, учтём, что $l + 1 \in \overline{2, N-1}$, а потому согласно (22) $(h, \mathrm{P}\backslash\{h\}) \in \mathfrak{D}_l[K] \ \forall\, h \in \mathbf{I}(\mathrm{K})$. Вместе с тем $K \in \mathbf{G}_{N-1}$ и $l + 1 \in \overline{2, N-1}$, а потому согласно (24)

(38) $\mathcal{W}_{l+1}[K](i, \mathrm{P}) = v_{l+1}(i, \mathrm{P})$.

Отметим также, что согласно (23) $\mathfrak{D}_l[K] \subset \mathrm{D}_l$, $\mathfrak{D}_{l+1}[K] \subset \mathrm{D}_{l+1}$. Тогда, в частности, $(h, \mathrm{P}\backslash\{h\}) \in \mathrm{D}_l \ \forall\, h \in \mathbf{I}(\mathrm{K})$. По выбору (i, P) имеем, что $(i, \mathrm{P}) \in \mathrm{D}_{l+1}$. Тогда (см. [11], предложение 2)

(39) $v_{l+1}(i, \mathrm{P}) = \min_{h\in\mathbf{I}(\mathrm{P})}[\mathbf{c}(i, h, \mathrm{P}) + v_l(h, \mathrm{P}\backslash\{h\})]$.

Из (38), (36) и (39) получаем требуемое равенство (37).

С учётом (33) и (35) можно считать, что функции $\mathcal{W}_1[K]$, $K \in \mathbf{G}_{N-1}$, нам известны. Поэтому при $K \in \mathbf{G}_{N-1}$ предложение 5.1 определяет рекуррентную процедуру

(40) $\mathcal{W}_1[K] \to \mathcal{W}_2[K] \to \cdots \to \mathcal{W}_{N-1}[K]$,

отвечающую работе одного процессора. Это означает, что при $j \in \mathbf{I}(\overline{1,N})$ мы можем явным образом (см. (35)) определить $\mathcal{W}_1[\overline{1,N}\backslash\{j\}]$, после чего с учётом предложения 5.1 реализуем рекуррентную процедуру $\mathcal{W}_1[\overline{1,N}\backslash\{j\}] \to \mathcal{W}_2[\overline{1,N}\backslash\{j\}] \to \cdots \to \mathcal{W}_{N-1}[\overline{1,N}\backslash\{j\}]$. Учитывая (24) и (40), определяем посредством склеивания все функции $v_1, \ldots, v_{N-1}$. Именно, если $s \in \overline{1,N-1}$ и $(j,Q) \in \mathrm{D}_s$, то используя (23), надо выбрать $K \in \mathbf{G}_{N-1}$ такое, что $(j,Q) \in \mathfrak{D}_s[K]$, после чего положить, учитывая (24)

(41) $v_s(j,Q) = \mathcal{W}_s[K](j,Q)$.

Теперь, располагая, в частности, функцией v_{N-1}, мы по формуле (11) определяем V.

6 Алгоритм на функциональном уровне

В настоящем разделе обсуждается один гипотетический вариант реализации процедуры (40). Речь идет о ее реализации при введении определенной иерархии для гипотетических процессоров, обеспечивающих каждый построение соответствующей цепочки вида (40). Дело в том, что множества $\mathfrak{D}_s[K_1]$ и $\mathfrak{D}_s[K_2]$, где $s \in \overline{1,N-1}$ могут пересекаться при $K_1 \in \mathbf{G}_{N-1}$, $K_2 \in \mathbf{G}_{N-1}$, $K_1 \neq K_2$. Непосредственное использование процедуры типа (40) может приводить к многократному выполнению одних и тех же вычислений, что, в частности, может порождать дефицит памяти, выделяемой процессорам.

Ниже предлагается следующий поход к организации «совместных» вычислений.

Учитывается, что семейство $\mathbf{G}_{N-1}$ непусто и конечно. Полагаем, что

(42) $\mathbf{n} \triangleq |\mathbf{G}_{N-1}| \in \mathbb{N}$.

С учетом (42) введем биекцию $(\mathrm{L}_j)_{j\in\overline{1,\boldsymbol{n}}}$: $\overline{1,\boldsymbol{n}} \overset{\text{на}}{\to} \mathbf{G}_{N-1}$ «отрезка» $\overline{1,\boldsymbol{n}}$ на $\mathbf{G}_{N-1}$. Будем полагать, что иерархия списков определяется этой биекцией: список L_1 объявляется «самым главным», список L_2 следует за L_1, L_3 следует за L_2 и т.д.

В соответствии с этим процессор Π_1, ответственный за реализацию (40) при $K = \mathrm{L}_1$, получает для работы множества $\mathfrak{D}_s[\mathrm{L}_1]$, $s \in \overline{1,N-1}$.

Процессор Π_2, ответственный за реализацию цепочки (40) при $K = \mathrm{L}_2$, получает для работы множества $\mathfrak{D}_s[\mathrm{L}_2]\backslash\mathfrak{D}_s[\mathrm{L}_1]$, $s \in \overline{1,N-1}$, и возможность обращения к Π_1 за недостающей информацией (в силу предложения 5.1 для непосредственного применения (40) при $K = \mathrm{L}_2$ требуются также позиции из $\mathfrak{D}_s[\mathrm{L}_1] \cap \mathfrak{D}_s[\mathrm{L}_2]$, которые мы уже «отдали» процессору Π_1).

Процессор Π_3, ответственный за реализацию (40) при $K = \mathrm{L}_3$, получает множества

$\mathfrak{D}_s[\mathrm{L}_3]\backslash(\mathfrak{D}_s[\mathrm{L}_1] \cup \mathfrak{D}_s[\mathrm{L}_2])$, $s \in \overline{1,N-1}$

и возможность обращаться к процессорам Π_1 и Π_2 за недостающей информацией. Дальнейшее построение аналогично: процессору Π_m, где $m \in \overline{4,\boldsymbol{n}}$, выделяются множества

$$\mathfrak{D}_s[\mathrm{L}_m]\backslash\Big(\bigcup_{j=1}^{m-1} \mathfrak{D}_s[\mathrm{L}_i]\Big), \quad s \in \overline{1,N-1},$$

и возможность обращаться к процессорам $\Pi_1, \ldots, \Pi_{m-1}$ за недостающей информацией.

После этого процессор Π_1 самостоятельно реализует цепочку (40) при $K = \mathrm{L}_1$. Процессор Π_2 реализует цепочку (40) при $K = \mathrm{L}_2$, используя результаты счета от процессора Π_1. Дальнейшее распределение вычислений аналогично: процессор Π_m, где $m \in \overline{2,\boldsymbol{n}}$ реализует цепочку (40) при $K = \mathrm{L}_m$, используя результаты счета от $\Pi_1, \ldots, \Pi_{m-1}$.

После реализации всех цепочек (40), отвечающих случаям $K = \mathrm{L}_1, \ldots, K = \mathrm{L}_{\boldsymbol{n}}$, на основе (23), (24) и (41) осуществляется построение функций $v_1, \ldots, v_{N-1}$.

Случай $\boldsymbol{n} = 3$, $N > 6$. Итак, пусть на этапе I_1 процессор Π_1 осуществляет построение функции

(43) $\mathcal{W}_1[L_1]$: $\mathfrak{D}_1[\mathrm{L}_1] \to [0,\infty[$,

используя (35). После этапа I_1 процессор Π_1 располагает (дискретной) функцией $\mathcal{W}_1[L_1]$. На этапе I_2, непосредственно следующим за I_1, процессор Π_1 осуществляет построение функции

(44) $\mathcal{W}_2[L_1]\colon \mathfrak{D}_2[\mathrm{L}_1] \to [0,\infty[$,

а процессор Π_2 осуществляет насчитывание значений $\mathcal{W}_1[L_2](j,K)$, $(j,K) \in \mathfrak{D}_1[\mathrm{L}_2]\backslash\mathfrak{D}_1[\mathrm{L}_1]$, используя (35). В результате этих вычислений у процессоров Π_1, Π_2 будет сформирована функция

(45) $\mathcal{W}_1[L_2]\colon \mathfrak{D}_1[\mathrm{L}_2] \to [0,\infty[$

(функция (43) была построена ранее). Построением функции (45) завершается этап I_2.

На следующем этапе I_3 процессор Π_1 осуществляет построение функции

(46) $\mathcal{W}_3[L_1]\colon \mathfrak{D}_3[\mathrm{L}_1] \to [0,\infty[$.

На этом же этапе Π_2 осуществляет насчитывание значений

$\mathcal{W}_2[L_2](j,K), \quad (j,K) \in \mathfrak{D}_2[\mathrm{L}_2]\backslash\mathfrak{D}_2[\mathrm{L}_1]$.

С учетом (44) процессоры Π_1, Π_2 располагают к концу этапа I_3 функцией

(47) $\mathcal{W}_2[L_2]\colon \mathfrak{D}_2[\mathrm{L}_2] \to [0,\infty[$.

Действительно, на множестве $\mathfrak{D}_2[\mathrm{L}_1] \cap \mathfrak{D}_2[\mathrm{L}_2]$ значения функций $\mathcal{W}_2[L_1]$ и $\mathcal{W}_2[L_2]$ совпадают, поскольку согласно (41) для $(j,Q) \in \mathfrak{D}_2[\mathrm{L}_1] \cap \mathfrak{D}_2[\mathrm{L}_2]$

(48) $\mathcal{W}_2[L_1](j,Q) = v_2(j,Q) = \mathcal{W}_2[L_2](j,Q)$.

Кроме того, в начале этапа I_3 «включается» процессор Π_3, который реализует насчитывание значений

(49) $\mathcal{W}_1[L_3](j,K), \quad (j,K) \in \mathfrak{D}_1[\mathrm{L}_3]\backslash(\mathfrak{D}_1[\mathrm{L}_1] \bigcup \mathfrak{D}_1[\mathrm{L}_2])$;

это достаточно для того, чтобы у Π_1, Π_2, Π_3 сформировалась функция

(50) $\mathcal{W}_1[L_3]\colon \mathfrak{D}_1[\mathrm{L}_3] \to [0,\infty[$.

В самом деле, при $(j,Q) \in \mathfrak{D}_1[\mathrm{L}_1] \cap \mathfrak{D}_1[\mathrm{L}_3]$ согласно (41)

(51) $\mathcal{W}_1[L_1](j,Q) = v_1(j,Q) = \mathcal{W}_1[L_3](j,Q)$.

Кроме того, при $(j,Q) \in \mathfrak{D}_1[\mathrm{L}_2] \cap \mathfrak{D}_1[\mathrm{L}_3]$ имеем в силу (41), что

(52) $\mathcal{W}_1[L_2](j,Q) = v_1(j,Q) = \mathcal{W}_1[L_3](j,Q)$.

В силу (51) и (52) получаем, что на множестве $\mathfrak{D}_1[\mathrm{L}_3] \cap (\mathfrak{D}_1[\mathrm{L}_1] \cup \mathfrak{D}_1[\mathrm{L}_2])$ значения $\mathcal{W}_1[L_3](j,Q)$ уже насчитаны процессорами Π_1, Π_2. Таким образом (см. (49), (51), (52)), все значения $\mathcal{W}_1[L_3](j,Q)$, $(j,Q) \in \mathfrak{D}_1[\mathrm{L}_3]$, определены, а это и означает завершение построения функции (50).

Теперь после трех этапов I_1, I_2, I_3 «коалиция» (Π_1, Π_2, Π_3) располагают функциями:

1) $\mathcal{W}_1[L_1], \mathcal{W}_1[L_2], \mathcal{W}_1[L_3]$;
2) $\mathcal{W}_2[L_1], \mathcal{W}_2[L_2]$;
3) $\mathcal{W}_3[L_1]$

Дальнейшие построения на этапах $I_4, \ldots, I_{N-1}$ аналогичны и касаются построения каждым из процессоров следующих наборов функций:

(1) Процессором Π_1: $\mathcal{W}_4[L_1], \ldots, \mathcal{W}_{N-1}[L_1]$;
(2) Процессором Π_2: $\mathcal{W}_3[L_2], \ldots, \mathcal{W}_{N-2}[L_2]$;
(3) Процессором Π_3: $\mathcal{W}_2[L_3], \ldots, \mathcal{W}_{N-3}[L_3]$.

Значения всех функций вида (1) - (3) будут насчитаны к концу этапа I_{N-1}. На следующем этапе I_N процессор Π_2 досчитает значения функции $\mathcal{W}_{N-1}[L_2]$ и на этом же этапе процессор Π_3 досчитает значения функции $\mathcal{W}_{N-2}[L_3]$. На последнем этапе I_{N+1} процессор Π_3 досчитает зна-

чения функции $\mathcal{W}_{N-1}[L_3]$. Таким образом, после реализации всех этапов $I_1, \dots I_{N+1}$ на основе (23), (24) и (41) будут насчитаны функции $v_1, \dots, v_{N-1}$.

Заключение

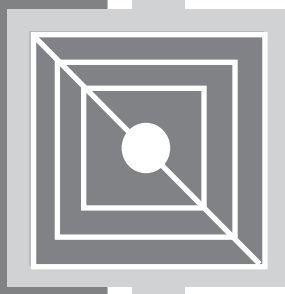
В работе предложен вариант реализации схемы независимых вычислений слоев функции Беллмана [8, 12, 13], определяемых на основе экономичной процедуры динамического программирования с использованием существенных (в смысле условий предшествования) списков заданий.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку в рамках грантов №13-01-90414 Укр_ф_а, № 13-08-00-643-а.

Список литературы

[1] Ташлыков О.Л. Методы оценки и снижения дозовых нагрузок при ремонте АЭС. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. 118с.
[2] Коробкин В.В., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Ченцов А.Г. Методы маршрутизации и их приложения в задачах повышения безопасности и эффективности эксплуатации атомных станций - М.: Новые технологии, 2012.-233 с.
[3] Меламед И.И., Сергеев С.И., Сигал И.Х. Задача коммивояжера. I. Вопросы теории; II. Точные алгоритмы. III. Приближенные алгоритмы // Автоматика и телемеханика. 1989. №9, С. 3- 34; №10, С. 3-29; №11, С. 3-26.
[4] Литл Дж., Мурти К., Суини Д., Кэрел К. Алгоритм для решения задачи о коммивояжере // Экономика и математические методы.-1965.-Т.1 (Вып.1) – С. 94-107.
[5] Gutin G., Punnen A.P. The Traveling Salesman Problem and Its Variations // Kluwer. 2002. 830 p.
[6] Беллман Р. Применение динамического программирования к задаче о коммивояжере /Кибернет. сборник. Т. 9. М.: Мир, 1964. - С. 219-228.
[7] Хелд М., Карп Р.М. Применение динамического программирования к задачам упорядочения / Кибернет. сборник. Т. 9. М.: Мир, 1964. - С. 202-218.
[8] Ченцов А.Г. К вопросу о маршрутизации комплекса работ // Вестник Удм. ун-та. Математика. Механика. Комп. науки.- 2013.- № 1.- С.59-82.
[9] Ченцов А.Г. Экстремальные задачи маршрутизации и распределения заданий: вопросы теории /А.Г. Ченцов. М.; Ижевск.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. 240 с.
[10] Сесекин А.Н., Ченцов А.А., Ченцов А.Г. Обобщенная задача курьера с функцией затрат, зависящей от списка заданий // Изв. РАН. ТиСУ, №2. 2010. С. 68-77.
[11] Кошелева М.С., Ченцов А.Г. Одна задача маршрутизации с ограничениями в виде условий предшествования // Тр. XV Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: Самар. НЦ РАН.-2013.-С. 523-532.
[12] Ченцов А.Г. Одна параллельная процедура построения функции Беллмана в обобщенной задаче курьера с внутренними работами // Вестник ЮУрГУ. Сер. Мат. моделирование и программирование. 2012. № 18, вып.12. С.53-76.
[13] Ченцов А.Г. Одна параллельная процедура построения функции Беллмана в обобщенной задаче курьера с внутренними работами // АиТ. - 2012. - № 3. - С. 134-149.
[14] Варга Дж. Оптимальное управление дифференциальными и функциональными уравнениями. – М.: Наука,1977. – 624 с.
[15] Дьедонне Ж. Основы современного анализа / Ж. Дьедонне. М.: Мир, 1964. 430 с.



Measuring, Control and Diagnostics in Extreme Conditions
Измерения, контроль и диагностика в экстремальных условиях

ВРЕМЯ ПРИНЯТИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

С.С. Анцыферов, К.Е. Русанов

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики» (МГТУ МИРЭА)
119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78, Россия
c_standard@fel.mirea.ru
тел: +8 (495) 494-81-38

Ключевые слова: *структурированное поле, уровень достоверности, последовательная обработка, информативность, существенный признак, порог, быстродействие, среднее время, апостериорная – априорная вероятность, правдоподобие*

Abstract
The analytical ratios allowing a priori to estimate processing speed of systems of structual-stochastic information processing in a mode of consecutive low-informative supervision in extreme conditions are established in this paper.

Введение

Экстремальные условия диагностики состояний объектов по их физическим пространственно-временным полям часто приводят к снижению уровня структурированности этих полей. Характерной особенностью слабо структурированных полей является, как правило, малая информативность каждой отдельной реализации из-за нечеткой выраженности существенных признаков, "размытости" элементарных компонентов. Поэтому, для обеспечения требуемого уровня достоверности, приходится осуществлять последовательную обработку целого ряда реализаций, полученных в режиме динамических наблюдений. В этих случаях принятие решения о состоянии объекта возможно только при достижении мерой информативности существенных признаков поля некоторого установленного порога. Так, согласно ранее разработанному методу структурно-стохастической аппроксимации изотропных полей [1-7], для повышения достоверности распознавания (диагностики) пограничных состояний исследуемых объектов, на них оказывается определенное тестовое воздействие, приводящее к вариативности структуры реализаций поля во времени. В процессе обработки реализаций происходит постепенное накопление информации и соответствующее повышение информативности признаков до уровня достаточного для принятия решения. С помощью предварительно сформированной шкалы информационной сложности [8], установлено пороговое значение меры информативности признаков, обеспечивающее высокий уровень достоверности формирования опорных и распознавания текущих образов поля. Для оптимизации параметров и оценки быстродействия системы обработки в режиме динамических наблюдений важно установление среднего числа тактов или среднего времени до достижения установленного порога, а фактически до принятия того или иного решения (время задержки принятия решения). Цель работы – установление аналитических соотношений, позволяющих априорно оценивать быстродействие систем структурно-стохастической обработки информации в режиме последовательных малоинформативных наблюдений в экстремальных условиях.

Определение среднего времени до принятия решения

В процессе обработки реализаций полей на каждом такте возможны следующие ситуации, характеризующиеся соответствующими вероятностями:

– признак присутствует в реализации и выявлен в процессе обработки – $P_1(1)$;

– признак присутствует в реализации, но в процессе обработки не выявлен – $P_1(0)=1-P_1(1)$;

– признак отсутствует в реализации, но в процессе обработки он выявлен – $P_0(1)$;

– признак отсутствует и в процессе обработки не выявлен – $P_0(0)=1-P_0(1)$.

Апостериорная вероятность наличия того или иного признака на каждом k-м такте обработки может быть найдена с помощью рекуррентного алгоритма, аналогичного введенному в работе [4]:

$$(1)\quad \hat{P}_k(1)=\frac{P_k(1)\,p_1[\beta(x,y)]}{P_k(1)\,p_1[\beta(x,y)]+[1-P_k(1)]p_0[\beta(x,y)]},$$

где

$$(2)\quad P_k(1)=\hat{P}_{k-1}(1)P_\tau(1|1)+[1-\hat{P}_{k-1}(1)]P_\tau(1|0)$$

– априорная вероятность наличия признака;

$p_1[\beta(x,y)]$ – двумерная плотность распределения значений интенсивности реализации при наличии β-го признака;

$p_0[\beta(x,y)]$ – двумерная плотность распределения при отсутствии β-го признака;

τ – межтактовый интервал;

$P_\tau(1|1)$ – вероятность того, что признак, выявленный на $k-1$-м такте, будет выявлен на k-м;

$P_\tau(1|0)$ – вероятность выявления признака на k-м интервале, если на $k-1$-м он не выявлен.

Переходя к указанным выше возможным ситуациям и вводя в рассмотрение отношение правдоподобия $l=P_1(1)/P_0(1)$, преобразуем соотношение (1) к следующему, более простому, виду:

$$(3)\quad \hat{P}_k(1)=\begin{cases}\dfrac{P_k(1)}{1+P_k(1)(l-1)}, & \text{если признак присутствует,}\\[2ex] \dfrac{P_k(1)[1-P_1(1)]/[1-P_0(1)]}{1+P_k(1)\{[1-P_1(1)]/[1-P_0(1)]-1\}}, & \text{если признак отсутствует.}\end{cases}$$

Используя обозначение (2) для вероятности наличия признака, экстраполированной на время τ вперед, получим уравнение для среднего числа тактов до достижения порога $P_{пор}$ при наличии признака:

$$(4)\quad \begin{aligned}N_1(\hat{P})&=1+P_1(1)N_1\left[\frac{P_k(1)l}{1+P_k(1)(l-1)}\right]+\\&+[1-P_1(1)]N_1\left[\frac{P_k(1)[1-P_1(1)]/[1-P_0(1)]}{1+P_k(1)\{[1-P_1(1)]/[1-P_0(1)]-1\}}\right],\ \hat{P}<P_{пор};\end{aligned}$$

$$N_1\left(\hat{P}\right)=0, \quad \hat{P} \geq P_{пор}.$$

Аналогично можно определить среднее число тактов до достижения порога при отсутствии признака

$$N_0\left(\hat{P}\right)=1+P_0(1)N_0\left[\frac{P_k(1)l}{1+P_k(1)(l-1)}\right]+$$

(5)

$$+\left[1-P_0(1)\right]N_0\left[\frac{P_k(1)\left[1-P_1(1)\right]/\left[1-P_0(1)\right]}{1+P_k(1)\left\{\left[1-P_1(1)\right]/\left[1-P_0(1)-1\right]\right\}}\right], \hat{P} < P_{\text{пор}};$$

В общем случае, при произвольных значениях параметров, функциональные уравнения (4) и (5) аналитически не разрешимы. Поэтому, для представляющего наибольший интерес случая пограничных состояний, будем полагать, что вероятность $P_\tau\left(1|0\right)$ довольно мала. Положив ее равной нулю в (4) и (5), получим следующие решения этих уравнений:

(6) $$N_1\left(\hat{P}\right)=G_1+\frac{H_1}{P(1)}-h_1 ln\frac{P_k(1)}{1-P_k(1)};$$

(7) $$N_0\left(\hat{P}\right)=G_0+\frac{H_0}{P_k(1)}-h_0 ln\frac{P_k(1)}{1-P_k(1)}.$$

Коэффициенты h_1 и h_0 равны, соответственно:

$$h_1=\left\{P_1(1)ln\, l+\left[1-P_1(1)\right]ln\frac{\left[1-P_1(1)\right]}{\left[1-P_0(1)\right]}\right\}^{-1},$$

(8)

$$h_0=\left\{P_0(1)ln\, l+\left[1-P_0(1)\right]ln\frac{\left[1-P_1(1)\right]}{\left[1-P_0(1)\right]}\right\}^{-1}.$$

Произвольные константы при условии $N_1\left(P_{пор}\right)=N_0\left(P_{пор}\right)=0$ будут иметь следующий вид:

$$G_1=h_1 ln\frac{P_{пор}}{1-P_{пор}}; \quad H_1=0;$$

$$G_0=-\frac{H_0}{1-P_{пор}}=\infty.$$

Отсюда следует

(9) $$N_1\left(\hat{P}\right)=h_1\, ln\, A,$$

где

(10) $$A=\frac{P_{пор}\left[1-P_k(1)\right]}{P_k(1)\left(1-P_{пор}\right)};$$

$$N_0(\hat{P})=\infty.$$

Из соотношений (9) и (10) следует, что среднее время до достижения порогового значения $N_1(P)\tau$ равно бесконечности при $P_k(1)=0$. Действительно, при $P_\tau\left(1|0\right)=0$ точка $P_k(1)=0$ является устойчивой в том смысле, что во всех обозначенных ситуациях апостериорная веро-

ятность равна нулю, а в связи с этим и среднее время оказывается бесконечным. При $P_\tau(1|0) \neq 0$ $N_1(\hat{P})$ и $N_0(\hat{P})$ бесконечными уже не будут.

Заметим, что пограничные состояния характеризуются не только малыми $P_\tau(1|0)$, но и мало отличающимися $P_1(1)$ и $P_0(1)$. В этом случае

(11) $h_1 = \dfrac{2}{P_1(1)\ln^2 P_1(1)/[1-P_1(1)]} = \dfrac{2}{R}$;

(12) $N_1(\hat{P}) = h_1 r^2 \ln A$;

(13) $N_0(\hat{P}) \approx \dfrac{1}{P_0(1)} \dfrac{P_{пор} - P(1)}{(1-P_{пор})[1-P(1)]}$,

где $P(1)$ имеет смысл начального (априорного) значения вероятности выявления признака, т.е. в момент от которого начинается отсчет времени до принятия решения (достижения порога $P_{пор}$); r – коэффициент, характеризующий структурно-пространственную зависимость, коррелированность шума с элементарными компонентами (существенными признаками) поля. Этот коэффициент может принимать значения от нуля (белый шум) до единицы (изотропные, сильнокоррелированные поля).

В реальных системах обработки значения апостериорных вероятностей $\hat{P}$ не могут оказаться ниже некоторого минимального уровня P_{min}. Значение P_{min}, согласно (1) и (4), должно удовлетворять следующему уравнению:

(14) $P_{min} = \dfrac{\left[P_{min} + (1-P_{min})P_\tau(1|0)\right]\dfrac{1-P_1(1)}{1-P_0(1)}}{1+\left[P_{min} + (1-P_{min})P_\tau(1|0)\right]\left[\dfrac{1-P_1(1)}{1-P_0(1)} - 1\right]}$.

Для малых $P_\tau(1|0)$

(15) $P_{min} \approx P_\tau(1|0)\left[\dfrac{1-P_1(1)}{1-P_0(1)}\right]$.

С учетом r

(16) $P_{min} \approx r\dfrac{P_\tau(1|0)[1-P_1(1)]}{P_1(1)\ln\left[1/P_1(1)\right]}$.

Подставив (16) в (12), получим

(17) $N_1(\hat{P}) = N_1(P_{min}) \approx h_1 r^2 \ln\left[\dfrac{P_{пор} r \cdot R}{(1-P_{пор})P_\tau(1|0)\ln\left(1/P_1(1)\right)}\right]$.

Учитывая, что количество ложных выявлений признака, приходящееся на один такт, составляет, как следует из (13)

(18) $n \approx P_0(1)\dfrac{1-P_{пор}}{P_{пор}}$,

получим

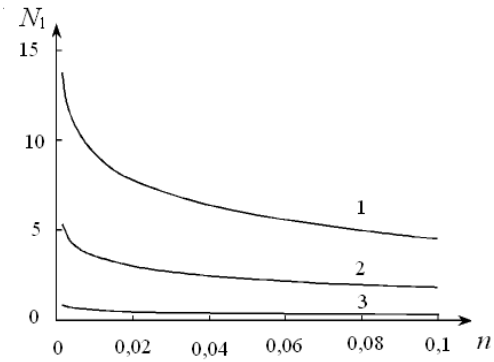
(19) $N_1 \approx h_1 r^2 ln\left[\dfrac{r \cdot R}{n\, ln\left[1/P_1(1)\right]}\right]$.

При малых n соотношение (19) приобретает вид

(20) $N_1 = -h_1 r^2 \ln n$.

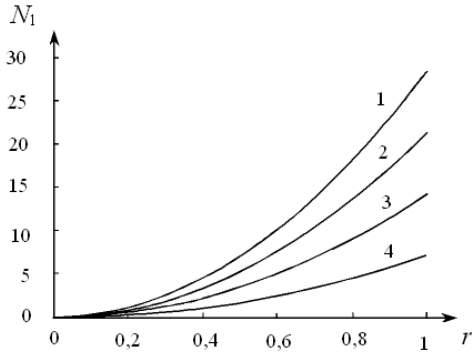
Если в последнее соотношение подставить оптимальные значения $P_1(1)$ и R_{max}, то выражение для N_1 будет зависеть от r, n (рис. 1-3) и уровня "интеллектуальности" I системы

(21) $N_1 \approx -\dfrac{1}{I}\, r^2 ln\, n$.



1 – r=0,8; 2 – r=0,5; 3 – r=0,2.

Рисунок 1 – Зависимость числа тактов обработки от n



1 – n=0,0001; 2 – n=0,001; 3 – n=0,01; 4 – n=0,1.

Рисунок 2 – Зависимость числа тактов обработки от r

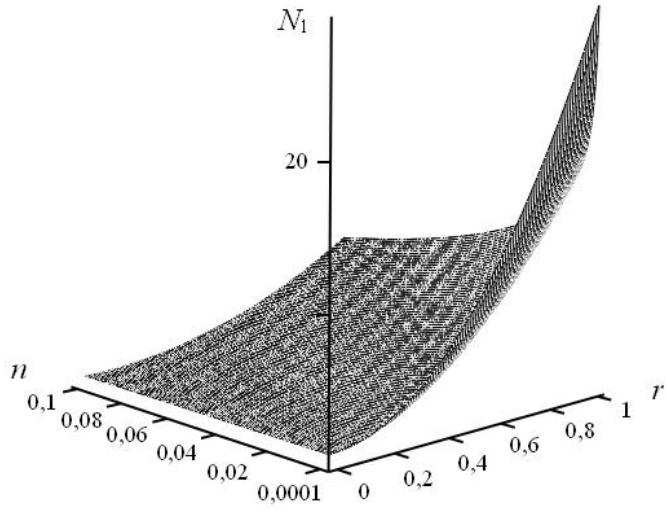


Рисунок 3 – Зависимость числа тактов обработки от n и r

Заключение

Установлены аналитические соотношения, позволяющие априорно оценивать быстродействие систем структурно-стохастической обработки информации в режиме последовательных малоинформативных наблюдений в экстремальных условиях.

Список литературы

[1] Анцыферов С.С. Формирование спектра тепловых изображений и распознавание их образов // Оптический журнал, 1999, т. 66, № 2, с. 44-48.

[2] Antsyferov S.S. Forming the spectrum of thermal images of objects and recognizing their patterns //J.Opt. Technol, 1999, t. 66(12), p. 1047-1049.

[3] Анцыферов С.С., Евтихиев Н.Н. Адаптация информационно-распознающих биомедицинских систем // Биомедицинская радиоэлектроника, 2001, т. 3, № 10, с. 52-57.

[4] Анцыферов С.С. Метрология виртуальных систем //Измерительная техника, 2003, № 5, с. 17-21.

[5] Анцыферов С.С., Евтихиев Н.Н. Адаптивные системы распознавания образов пространственно-временных полей // Искусственный интеллект, 2004, № 3, с. 405-416.

[6] Анцыферов С.С., Евтихиев Н.Н. Адаптивная обработка информации пространственно-временных изотропных полей // Оптический журнал, 2006, т. 3, № 10, с. 52-57.

[7] Анцыферов С.С. Метрология интеллектуальных систем // Искусственный интеллект, 2008, № 3, с. 18-27.

[8] Анцыферов С.С. Метрологические основы формирования информационного пространства образов в интеллектуальных системах обработки // Искусственный интеллект, 2012, № 4, с. 283-291.

СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ РАЗНОВЫСОТНОСТИ ГОЛОВОК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК АТОМНОГО РЕАКТОРА

С.Л. Балабаев, Т.А. Корнилова, Е.Г. Лозовская, К.Е. Румянцев

Южный федеральный университет
347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, оф. 207, Россия
sbalabaev@sfedu.ru, ek.lozovskaya@yandex.ru, rke2004@mail.ru
тел: +7 (863) 432-87-25, факс: +7 (863) 437-19-02

Ключевые слова: *атомный реактор, тепловыделяющая сборка, контроль разновысотности, стереоскопическая система*

Abstract
The paper deals with stereoscopic nuclear reactor heat release assemblies heads height difference control system. It describes the method of contactless control of fuel assemblies height difference in the reactor active zone. The ratio for height difference definition by the stereoscopic system of two coaxial cameras and stereoscopic system with two misaligned cameras are considered.

Введение

В процессе эксплуатации реакторов типа ВВЭР-1000 (В-320) происходит снижение устойчивости к формоизменению и геометрической стабильности тепловыделяющих сборок в активных зонах. Для оценки механического состояния активной зоны и его прогноза на предстоящую кампанию на действующих энергоблоках с ВВЭР-1000 имеется определенный перечень проверок и измерений. Проверки проводятся при остановке блока на планово-предупредительные ремонты (ППР), при операциях по перегрузке топлива [1]. Перед сборкой реактора после перегрузки топлива проводятся ещё и работы по определению повысотного распределения головок тепловыделяющих сборок (ТВС) в активной зоне реактора.

В настоящее время при проведении процедуры контроля разновысотности ТВС применяются контактные автоматизированные методы, основными недостатками которых являются:

- большое время проведения работ;
- необходимость активного участия оператора;
- использование дополнительного (нештатного) оборудования МП;
- механический контакт с ТВС после их установки в реактор.

Указанные недостатки можно устранить за счет разработки бесконтактных методов контроля разновысотности ТВС. Предлагаемый метод бесконтактного определения разновысотности головок ТВС, находящихся в водной среде активной зоны реактора ВВЭР-1000, основан на реконструкции трёхмерной сцены по серии фотографических изображений головок ТВС, полученных с помощью видеокамеры системы телевизионной специальной, выпускаемой ЗАО "ДИАКОНТ" [2].

1 Метод бесконтактного контроля разновысотности ТВС в активной зоне реактора

Во время проведения контроля повысотного распределения измерениям подвергаются все 163 тепловыделяющие сборки активной зоны реактора, представленные на рисунке 1. При выполнении измерения видеокамера формирует изображение от семи ТВС, шесть из которых расположены вокруг седьмой опорной ТВС контролируемой сцены.

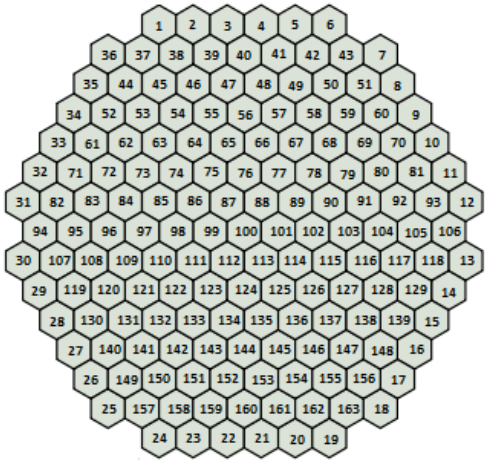


Рисунок 1 – Структура зоны реактора

Для охвата измерениями всей активной зоны реактора, в зависимости от алгоритма ее обхода стереоскопической системой, требуется не менее 27 точек последовательной установки. В большинстве случаев количество таких точек установок оказывается значительно большим.

Для охвата измерениями всей активной зоны реактора, в зависимости от алгоритма ее обхода стереоскопической системой, требуется не менее 27 точек последовательной установки стереоскопической системы. В большинстве случаев количество таких точек установок оказывается значительно большим.

Для измерения разновысотности ТВС применяется метод фотограмметрии, заключающийся в восстановлении трехмерной картины наблюдаемой сцены по стереоскопической паре изображений. В зависимости от числа видеокамер, участвующих в формировании изображения, это может быть классическая стереоскопическая система из двух соосных видеокамер и система, в которой стереопара изображений формируется последовательно одной видеокамерой с двух различных ракурсов.

При реконструкции трехмерной картины наблюдаемой сцены восстанавливаются трехмерные координаты центра окружности, образующей верхнюю грань ТВС [3]. Соответственно, разница координат *y* различных ТВС и будет описывать их разновысотность.

2 Стереоскопическая система с двумя соосными видеокамерами

В этом случае одинаковые камеры расположены так, что их оптические оси параллельны, а прямая, проходящая через оптические центры, перпендикулярна оптическим осям. Положим длину базы равной b. Определим глобальную систему координат, начало которой O расположено на базовой линии посередине между оптическими центрами камер, ось OZ параллельна оптическим осям, а ось OX направлена вдоль базовой линии (рисунок 2). Начала координат в плоскостях изображений камер совпадают с главными точками ($u_0 = v_0 = 0$), а единицы измерения координат в глобальной системе и в плоскостях изображения камер одинаковы ($w = h = 1$).

Точка M с глобальными координатами (X, Y, Z) соответствует центру окружности, образующей верхнюю грань одной из ТВС.. Координаты ее проекции в плоскости изображения первой (левой) камеры обозначим через (x', y'), а в плоскости изображения второй (правой) камеры – через (x'', y''). Проекции одной и той же точки M в плоскостях изображений разных камер являются *сопряженными точками.*

Очевидно, что $x' = f(X + b/2)/Z$, $x'' = f(X - b/2)/Z$, $y' = y'' = fY/Z$. Из первых двух соотношений следует, что $Z = fb/(x' - x'')$.

Зная геометрию съемки и выполнив измерения координат проекций одной и той же точки в плоскостях изображения видеокамер, можно вычислить глубину (координату Z) этой точки. Более того, полученные соотношения позволяют вычислить полностью трехмерные координаты точки:

$$X = b\frac{(x'+x'')}{2(x'-x'')}, \quad Y = b\frac{(y'+y'')}{2(x'-x'')}.$$

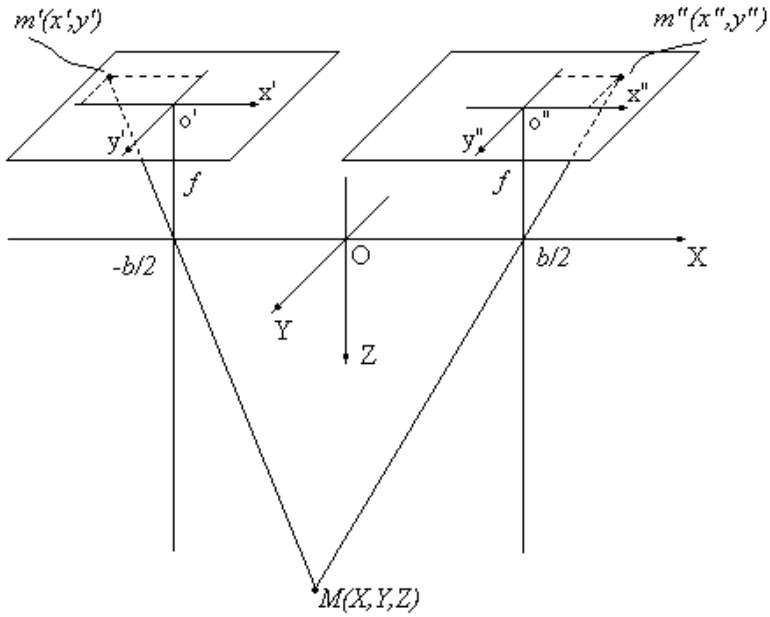


Рисунок 2 – Простейшая стереоскопическая система

3 Стереоскопическая система с одной видеокамерой

Теперь рассмотрим случай, когда формирование стереопары изображений осуществляется последовательно одной видеокамерой с разных ракурсов. Оптические оси видеокамеры в разных ракурсах не параллельны, а направление смещения оптического центра камеры в одной положении относительно оптического центра в другом произвольно (рисунок 3).

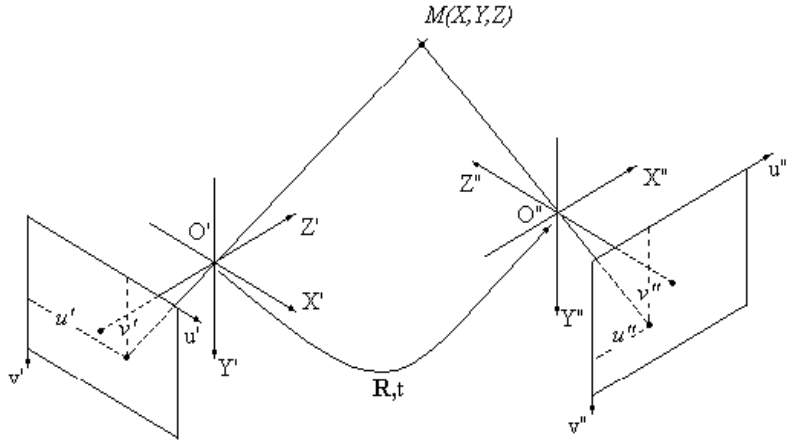


Рисунок 3 – Стереоскопическая система с одной видеокамерой

Введем трехмерный вектор $\mathbf{M} = (X, Y, Z)^T$, соответствующий точке M, и двумерный вектор $\mathbf{m} = (x, y)^T$, соответствующий точке m в плоскости изображения с координатами (x, y). Определим также вектор однородных внутренних координат камеры $\mathbf{v} = (u, v, 1)^T$. Используя эти обозначения, соотношения координаты проекции точки m можно представить в компактной векторно-матричной записи:

$$Z\mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{M},$$

где $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f/w & 0 & u_0 \\ 0 & f/h & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ - матрица, известная под названием матрицы *внутренних параметров* камеры, поскольку она содержит только параметры оптической системы и фотоприемника камеры.

Введем для каждой камеры свою стандартную систему координат. Пусть первой камере соответствует система координат O′X′Y′Z′, а второй – O″X″Y″Z″ (рисунок 3). Вектор $\mathbf{M}' = (X', Y', Z')^T$ характеризует координаты точки M трехмерного пространства в системе первой камеры, а вектор $\mathbf{M}''(X'', Y'', Z'')^T$ – в системе второй. Переход от глобальной системы координат к стандартным системам первой и второй камер осуществляется с помощью преобразований $\mathbf{M}' = \mathbf{R}'\mathbf{M} + \mathbf{t}'$ и $\mathbf{M}'' = \mathbf{R}''\mathbf{M} + \mathbf{t}''$ соответственно. Здесь $\mathbf{M}$ – вектор пространственных координат точки M в глобальной системе, $\mathbf{M}'$ и $\mathbf{M}''$ – векторы пространственных координат точки M в стандартных системах координат первого и второго положений камеры соответственно; $\mathbf{R}'$ и $\mathbf{R}''$ – матрицы размерности 3×3, описывающие, соответственно повороты стандартных систем координат видеокамер в первом и втором положениях относительно глобальной. Компонентами матриц $\mathbf{R}'$ и $\mathbf{R}''$ являются направляющие косинусы осей глобальной системы в соответствующих стандартных системах координат; $\mathbf{t}'$ и $\mathbf{t}''$ трехмерные векторы смещения начала координат глобальной системы относительно начала соответствующих стандартных систем координат.

Разрешая эту систему относительно Z' и Z'', получим

$$\begin{bmatrix} Z' \\ Z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}'^T \mathbf{A}_1^{-T} \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{v}' & -\mathbf{v}'^T \mathbf{A}_1^{-T} \mathbf{R}^T \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{v}'' \\ -\mathbf{v}'^T \mathbf{A}_1^{-T} \mathbf{R}^T \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{v}'' & \mathbf{v}''^T \mathbf{A}_2^{-T} \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{v}'' \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\mathbf{v}'^T \mathbf{A}_1^{-T} \mathbf{R}^T \\ \mathbf{v}''^T \mathbf{A}_2^{-T} \end{bmatrix} \mathbf{t}$$

Тогда вектор трехмерных координат точки M в системе любой из камер:

$$\mathbf{M}' = Z' \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{v}', \quad \mathbf{M}'' = Z'' \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{v}''$$

Подставляя вместо Z' и Z'' рассчитанные для них выражения, получаем выражения для вектора трехмерных координат точки M в системе любой из камер.

Таким образом, определена методика реконструкции трехмерной сцены, использующая два изображения, полученные с разных ракурсов.

Заключение

На основе предложенных соотношений разработана математическая модель системы, позволяющая определять координаты точек центров верхней грани ТВС в глобальной системе координат (ГСК). Получены соотношения для пересчета координат из ГСК в ССК с последующим смещением начала координат; рассчитаны координаты в естественных единицах фотоприемника; реконструированы трехмерные координаты объектов ССК на основе координат их проекций в изображениях стереопары; произведен обратный пересчет координат из ССК в ГСК.

Благодарности

Работа поддержана грантом РФФИ № 14-08-00071.

Список литературы

[1] Хайретдинов В.У., Родионов А.Б., Лященко В.В., Рыжов А.С. Определение физико-механических характеристик ТВС с помощью переносных систем контроля // Вопросы атомной науки и техники. - 2002. Выпуск 1. - С.46-52.

[2] Система телевизионная специальная СТС-ПМ-100. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ИТЦЯ.463432.005 ТО 2000.

[3] Балабаев С.Л., Балабаева И.Ю., Радецкий В.Г. Определение сопряженных точек для задачи восстановления трехмерных координат верхних плоскостей цилиндрических объектов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2008. Т. 80. № 3. С. 87-94.

АППРОКСИМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИГНАЛОВ В БАЗИСЕ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

В.И. Батищев, И.И. Волков, А.Г. Золин

Самарский государственный технический университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
datatech@samgtu.ru
тел: +7 (846) 337-12-74

Ключевые слова: *аппроксимация, обратный фильтр, восстановление сигнала, реконструкция изображений*

Abstract

We consider the approximation approach for constructing an inverse filter to restore signals on the solution actual problem of the reconstruction of blurred images with the known function of the point spread. The studies were obtained in the implementation of simple algorithms for determining the estimates of the original image.

Введение

Задача восстановления сигнала, подвергшегося преобразованию некоторого фильтра с известной конечной импульсной характеристикой, в настоящее время подтверждает свою актуальность в области реконструкции смазанных или расфокусированных изображений.

Современные космические системы высокодетального наблюдения (КСВН) Земли, для получения изображений используют съемочные устройства на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). Для правильной работы в режиме накопления видеосигнала, необходимо, чтобы скорость движения космического аппарата была точно согласована с периодом опроса матрицы. На практике, это условие может нарушаться из-за ошибки вычисления скорости спутника и неточности задания частоты опроса ПЗС-матрицы. В результате возникают смазанные изображения [1].

Параметры смаза могут существенно варьироваться от долей до десятков пикселей и иметь как одну, так и две пространственные составляющие.

В настоящее время известны основные подходы к решению задачи восстановления смазанных изображений, однако их практическое применение связано с различными недостатками конкретных реализаций. Так, в статье [2] рассматривается метод восстановления изображения с неизвестным параметром смаза. Тем не менее, описанная итерационная процедура восстановления, требует наличия не смазанной области, что может быть труднодостижимо в КСВН.

В статье [3] рассматривается подход, рассматривающий процессы смаза и восстановления с точки зрения динамических систем с использованием методов регуляризации. К сожалению, при реализации такого подхода имеет место достаточно длительный переходный процесс, продолжительность которого увеличивается при попытке улучшить качество восстановления.

В настоящем докладе рассматривается метод восстановления смазанного изображения с известным параметром смаза с точностью 3-5%, имеющего одну пространственную составляющую. Задача получения параметров смаза рассматривается в [4].

Описание алгоритма

Пусть наблюдается сигнал полученный в результате работы КИХ-фильтра с известной весовой функцией $h_0(k)$.

(1) $y(m) = \sum_{k=0}^{N_0-1} h_0(k)x(m-k)$,

Требуется восстановить по значениям $y(m)$ входной сигнал $x(m)$ этого фильтра.

Будем искать оценку восстановленного сигнала в виде следующей модели

(2) $x'(m) = \sum_{v=0}^{p} C_v \lambda^{(v+1)m}$,

где: p – порядок модели; C_v – параметры модели; $\lambda=exp(-a\Delta)$; Δ – шаг дискретизации.

Подставив $x`(m)$ в (1), получим выходной сигнал прямого фильтра в виде

(3) $y'(m) = \sum_{v=0}^{p} C_v \alpha(v) \lambda^{(v+1)m}$,

где $\alpha(v) = \sum_{k=0}^{N_0-1} h_0(k)\lambda^{-k(v+1)}$

Значения C_v будем определять по выборке $\{y(i)\}$, $i=0,...,N$ на основе обеспечения минимума квадратической погрешности

(4) $E = \sum_{i=m-N+1}^{m} (y'(i) - y(i))^2 = \sum_{i=0}^{N-1} (y'(m-i) - y(m-i))^2$.

Значение E зависит от величин $C_0, ..., C_p$.

Для обеспечения минимума этого значения должно быть выполнено условие:

$$\frac{dE}{dC_k} = 0, k = \overline{0, p}.$$

С учетом (2) эти условия примут вид

$$\sum_{i=0}^{N-1} (y'(m-i) - y(m-i)) \frac{dy'(m-i)}{dC_k} = 0, k = \overline{0, p}.$$

Подставив сюда $y`(m-i)$ из (3), будем иметь

$$\sum_{v=0}^{p} C_v \alpha(v) \sum_{i=0}^{N-1} \lambda^{(v+k+2)(m-i)} = \sum_{i=0}^{N-1} y(m-i)\lambda^{(k+i)(m-i)}, k = \overline{0, p}.$$

Умножив левую и правую части этой системы на $\lambda^{-(k+1)m}$, приведем ее к виду:

(5) $\sum_{v=0}^{p} C_v \alpha(v) \lambda^{(v+1)m} E(k+v) = \sum_{i=0}^{N-1} y(m-i)\lambda^{-i(k+1)}, k = \overline{0, p}$,

где:

(6) $E(v) = \frac{1-\lambda^{-N(v+2)}}{1-\lambda^{-(v+2)}}, v = \overline{0,2p}.$

Для простоты дальнейших выкладок введем обозначение:

(7) $A_v(m) = C_v \lambda^{(v+2)m}$.

С учетом этого модель (2) и система уравнений (5) примут вид:

(8) $$x'(m) = \sum_{v=0}^{p} A_v(m),$$

(9) $$\sum_{v=0}^{p} \alpha(v) A_v(m) E(k+v) = \sum_{i=0}^{N-1} y(m-i)\lambda^{-i(k+1)},\ k = \overline{0, p}.$$

Пусть $\beta(i,j)$ – элементы матрицы, обратной матрице коэффициентов $E(k+v)$. Тогда, как известно, решение системы уравнений будет таким:

(10) $$A_v(m) = \frac{1}{\alpha(v)} \sum_{i=0}^{N-1} y(m-i) \sum_{k=0}^{p} \beta(v,k)\lambda^{-i(k+1)},\ v = \overline{0, p}.$$

Подставив $A_v(m)$ из (10) в (7), получим следующий алгоритм восстановления сигнала $x(m)$:

(11) $$x'(m) = \sum_{i=0}^{N-1} h(i) y(m-i),$$

где:

(12) $$h(i) = \sum_{v=0}^{p} \frac{1}{\alpha(v)} \sum_{k=0}^{p} \beta(v,k)\lambda^{-i(k+1)},$$

здесь $h(i)$ - весовая функция обратного (восстанавливающего) фильтра.

Рассмотренный способ построения весовой функции обратного фильтра требует определить элементы обратной матрицы коэффициентов. Для выполнения этой процедуры был разработан более простой алгоритм:

(13) $$\begin{cases} \Psi(k,v) = E(k+v) - \sum_{q=0}^{v-1} C(v,q)\Psi(k,q) \\ C(k,v) = \dfrac{\Psi(k,v)}{\Psi(v,v)} \\ v = \overline{0,k} \\ k = \overline{0,p} \\ g(m,m) = 1 \\ g(m,q) = -\sum_{k=q+1}^{m} g(m,k)C(k,q) \\ q = \overline{m-1,0} \\ h(i) = \sum_{k=0}^{p} \lambda^{-i(k+1)} \sum_{q=k}^{p} \dfrac{g(q,k)}{\Psi(q,q)} \sum_{v=0}^{q} \dfrac{g(q,v)}{\alpha(v)} \end{cases}$$

Свойства полученного обратного фильтра будут зависеть от значений трех величин: N – длины весовой функции обратного фильтра, p – порядка модели (2), λ – выбранных базисных функций. Путем вариации этих параметров для каждого прикладного случая возможно добиться того, чтобы погрешность восстановления не превышала заданной величины.

Идея предлагаемого подхода может быть использована для построения модели восстанавливаемого сигнала в системе любых базисных функций.

Апробация алгоритма

Для апробации алгоритма было взято изображение, полученное из КСВН. Был выполнен смаз изображения вдоль горизонтальной оси на четыре пикселя, после чего предприняты по-

пытки восстановления по алгоритму (13). Было проведено исследование поведения алгоритма при различных значениях *N, p*. На рисунке 1 показан фрагмент строки исходного и восстановленного (пунктирная линия) изображений при *N*=4, *p*=5. Относительная среднеквадратическая погрешность составила 0,0289.

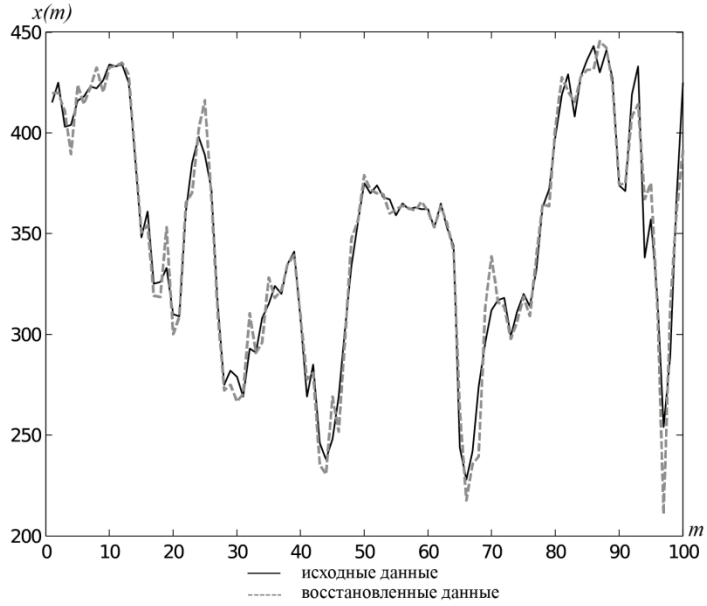


Рисунок 1 - Фрагмент строки исходного и восстановленного изображений

Заключение

В результате исследований был поучен простой в реализации алгоритм восстановления смазанных изображений. Приведенные результаты апробации показали достаточно высокое качество реконструкции исходного изображения. В настоящее время ведутся исследования по использованию других базисных функций, а также работы по применению данного алгоритма к изображениям, смаз которых имеет две пространственные составляющие.

Список литературы

[1] Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Коррекция смаза изображений в системах космического наблюдения земли // Цифровая обработка сигналов. 2010. №4.

[2] Jian-Feng Cai, Hui Ji, Chaoqiang Liu, Zuowei Shen Blind motion deblurring using multiple images//Journal of Computational Physics 228 (2009) 5057–5071.

[3] Батищев В.И., Воклов И.И., Золин А.Г. Синтез фильтров для восстановления смазанных изображений с использованием методов регуляризации // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV Международной конференции/Под ред.:акад. Е.А.Федосова, акад. Н.А.Кузнецова, проф.В.А.Виттиха. - Самара: Самарский научный центр РАН.-2013.-708с.

[4] 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.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЕМЕЙСТВ ГРАДУИРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ ЛОПАТОК

В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, П.Е. Подлипнов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
borovik@iccs.ru
тел: +7 (846) 333-26-77, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *одновитковый вихретоковый датчик, системы измерения координат смещений, семейства градуировочных характеристик, автоматизация экспериментальных исследований, аппаратно-программные средства автоматизации.*

Abstract

The paper describes hardware and software tools of automated system for experimental researches of calibration characteristics sets of measuring channels of systems for compilation of data of coordinate displacements of turbine and compressor blades tips. The systems based on using of single-coil eddy-current sensors with sensitive elements made as a conductor strip.

Введение

Известны методы и средства измерения координат смещений торцов лопаток компрессоров и турбин газотурбинных двигателей (ГТД), построенные на основе применения одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника в сочетании с импульсным преобразованием выходных параметров ЧЭ ОВТД (индуктивностей) в напряжение и далее в цифровой код [1, 2]. ОВТД способны работать в тяжелых и даже экстремальных условиях эксплуатации при температуре среды в зоне измерения до 1200^{o}C, в условиях загрязнения в зоне расположения датчиков продуктами горения углеводородных топлив, высоких уровнях вибраций и т.д.

Известно также, что для получения информации о нескольких координатах смещений торцов лопаток, ОВТД объединяют в кластеры – группы одинаковых датчиков, ЧЭ которых определенным образом ориентированы относительно торца лопатки, а число датчиков в составе кластера соответствует числу искомых координат смещений [3].

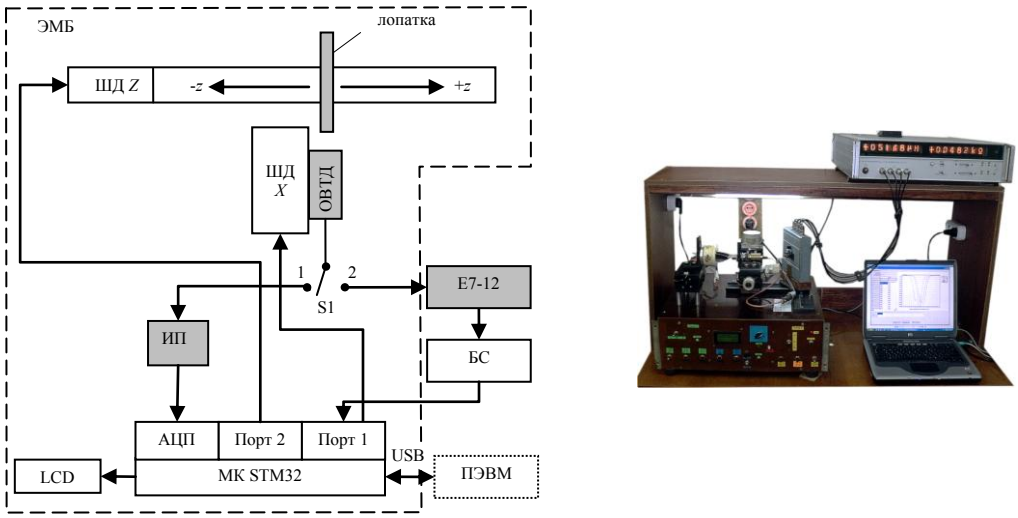
Все методы измерения, как «кластерные», так и «не кластерные» разновидности, для вычисления координат смещений торцов лопаток предусматривают использование экспериментально полученных семейств градуировочных характеристик (ГХ) измерительных каналов систем, связывающих цифровые коды, соответствующих выходным параметрам (индуктивностям) ОВТД, с искомыми координатами с учетом мешающих факторов, основным из которых является высокая температуры в зоне измерения [1, 2]. Очевидно, что индивидуальная градуировка измерительных каналов таких систем является весьма трудоёмкой операцией, сложность которой в значительной степени возрастает с увеличением каналов, а также числа измеряемых координат и мешающих факторов. Вышесказанное определяет необходимость автоматизации получения и исследования ГХ измерительных каналов систем, которая должна существенно сократить временные затраты на проведение метрологических экспериментов и повысить их качество за счет уменьшения влияния человеческого фактора. Решению указанной задачи и посвящена настоящая статья, в которой рассматриваются технические и программные средст-

ва автоматизированной установки для экспериментальных исследований семейств ГХ измерительных каналов систем сбора и обработки информации о координатах смещений торцов рабочих лопаток компрессоров и турбин ГТД.

1 Структура технических средств автоматизированной градуировочной установки (АГУ)

Автоматизированная градуировочная установка (АГУ) предназначена для проведения метрологических экспериментов с одним ОВТД типа ОВТД-Т(К)-0.3(НС/Л) [1] в нормальных условиях. Она обеспечивает перемещение лопатки и ОВТД по трём координатам в декартовой системе координат *XYZ* с автоматической фиксацией измерительных сигналов в канале с ОВТД при заданном взаимном положении торца лопатки и ЧЭ датчика. Перемещения по координатам *x* и *z* автоматизированы и осуществляются в диапазоне ±20 мм в направлении каждой оси с шагом 1.0 и 0.5 мм, соответственно. Перемещение по координате *y* осуществляется в ручном режиме с помощью микрометрического винта и контролируется по шкале нониуса.

Структура технических средств (а) и внешний вид (б) АГУ представлены на рисунке 1.



а) б)

Рисунок 1 – Структура технических средств (а) и внешний вид (б) АГУ

АГУ состоит из электромеханического блока (ЭМБ) и блока сопряжения (БС) с измерителем иммитанса Е7-12. Для архивирования и расширенной обработки результатов метрологических экспериментов в АГУ предусмотрена возможность подключения персонального компьютера (ПЭВМ) по USB-кабелю через виртуальный COM-порт.

ЭМБ выполнен на микроконтроллере (МК) STM32F407VG [4] и, помимо платы микроконтроллера, включает в себя две подвижки с шаговыми двигателями (ШД), обеспечивающими перемещения ОВТД и лопатки в направлениях *x* и *z,* соответственно, подвижку с микрометрическим винтом для перемещения ОВТД в направлении *y* (на рисунке 1 она не показана), панель управления с жидкокристаллическим дисплеем (LCD) и светодиодами индикации, а также плату управления работой ШД. При этом для управления ШД используется алгоритм половинного шага, который позволяет частично избавиться от явления резонанса [5] и обеспечивает большую точность позиционирования ОВТД и лопатки. Метрологический шаг пере-

мещения ШД составляет 0.5 мм и реализовывается выдачей управляющих последовательностей на двигатель, количество которых рассчитывается исходя из количества шагов соответствующего ШД на миллиметр.

В АГУ предусмотрено два режима преобразования выходных параметров ОВТД, выбор которых осуществляется с помощью переключателя S1. Первый режим предусматривает использование встроенных в линию связи преобразователей индуктивностей ОВТД в напряжение (измерительные преобразователи - ИП) [2]. При этом АГУ может быть настроена как на фиксацию напряжений на выходе ИП, так и на фиксацию цифровых кодов с выхода встроенного в МК аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Второй режим преобразования выходных индуктивностей предполагает применение в составе АГУ цифрового измерителя иммитанса (LCR) Е7-12 [6]. Для ввода результатов измерений индуктивностей ОВТД в АГУ используется специально разработанный БС, который выполнен на микроконтроллере PIC18F252 и представляет собой преобразователь данных с блока цифровой индикации Е7-12 в последовательный код UART.

Результаты замеров сохраняются в оперативной памяти МК и отображаются на жидкокристаллическом дисплее. При необходимости они могут быть переданы в ПЭВМ через USB-порт компьютера.

2 Программное обеспечение АГУ

В соответствии с рассмотренной выше структурой технических средств, в программном обеспечении (ПО) АГУ можно выделить два уровня реализации: *уровень центрального микроконтроллера* и *уровень преобразования, визуализации и сохранения данных*.

Уровень центрального микроконтроллера содержит в себе ПО для МК STM32F407VG, предназначенное для реализации программы метрологического эксперимента и обеспечивающее управление ШД, фиксацию в оперативной памяти МК результатов преобразования выходных параметров (индуктивностей) ОВТД, их вывод на жидкокристаллический дисплей АГУ для контроля процесса градуировки и, в случае необходимости, передачу данных в ПЭВМ.

Уровень преобразования, визуализации и сохранения данных состоит из ПО для БС Е7-12 с АГУ и ПО для ПЭВМ. В задачи ПО БС входит обеспечение передачи данных с результатами измерений индуктивностей ОВТД от Е7-12 к АГУ, а ПО ПЭВМ содержит в себе функции получения данных от АГУ, их архивирования в формате MS Excel и визуализации результатов метрологических экспериментов в графическом и табличном виде.

Ниже приводятся краткое описание особенностей функционирования ПО обоих уровней реализации.

2.1 ПО центрального микроконтроллера

ПО центрального МК содержит три программные секции, отвечающие за соответствующий режим работы ЭМБ: секцию тестирования панели управления, секцию тестирования ШД и секцию градуировки. Выбор конкретной программной секции (режима работы ЭМБ) осуществляется вручную с помощью соответствующего переключателя на панели управления АГУ.

Секции тестирования панели управления выполняет сервисные функции и обеспечивает проверку работоспособности всех её компонентов - тумблеров, кнопок, светодиодов и LCD.

Секция тестирования ШД обеспечивает проверку работоспособности ШД *X* и ШД *Z* (рисунок 1, а) и позволяется задать их начальные настройки, которые сохраняются в энергонезависимой памяти МК. В частности, в данном режиме работы ПО, осуществляется подсчет числа шагов ШД *X* и ШД *Z* на миллиметр перемещения соответствующей подвижки, а также на их полный проход (±20 мм).

Секция градуировки является основной рабочей секцией ПО центрального МК и обеспечивает реализацию программы проведения метрологических экспериментов измерительного канала с ОВТД в одном из трёх возможных режимов:

1) *Автоматический Z режим.* Предназначен для автоматической фиксации результатов опроса измерительного канала с ОВТД при заданном фиксированном смещении лопатки относительно датчика по оси *Y* и её автоматическом перемещении вдоль оси *Z* с шагом 0.5 мм.
2) *Автоматический XZ режим.* Предназначен для автоматической фиксации результатов опроса измерительного канала с ОВТД при заданном фиксированном смещении лопатки относительно датчика по оси *Y* и её автоматическом перемещении вдоль осей *X* и *Z* с шагом 1 и 0.5 мм, соответственно.
3) *Ручной режим.* Путём ручного управления ШД позволяет выставить заданное взаимное расположение ОВТД и торца лопатки с дальнейшей фиксацией результата опроса измерительного канала с ОВТД в оперативной памяти МК. Обычно используется для юстировки АГУ и градуировки измерительных каналов с ОВТД по радиальному зазору (*y*-координате).

Помимо вышеописанных программных секций, в ПО центрального МК реализованы процедуры взаимодействия с ПО БС и ПО для ПЭВМ. Также предусмотрена возможность ввода данных в АГУ в виде последовательного кода по UART, что, при незначительных доработках ПО, позволит существенно нарастить возможности установки путём подключения сторонних устройств и приборов, поддерживающих указанный формат обмена данными.

2.2 ПО преобразования, визуализации и сохранения данных

Как уже отмечалось выше, ПО преобразования, визуализации и сохранения данных состоит из ПО для БС измерителя иммитанса Е7-12 с АГУ и ПО верхнего уровня для ПЭВМ.

ПО БС обеспечивает получение АГУ данных с измерителя иммитанса (RLC) Е7-12 через последовательный порт UART. Подключение БС осуществляется непосредственно к блоку индикации Е7-12. ПО БС, путём программной обработки прерываний от блока индикации Е7-12, формирует число, соответствующее текущим показаниям прибора и заданному пределу измерений, которое затем, в виде последовательного кода, передается в центральный МК АГУ по протоколу UART.

В функции ПО верхнего уровня для ПЭВМ входят:

- приём результатов метрологических экспериментов от АГУ и их отображение на экране монитора в графическом и табличном виде (рисунок 2);
- первичная обработка экспериментальных данных (поиск глобальных экстремумов функций, определение максимальной крутизны характеристики и др.);
- архивирование и просмотр результатов метрологических экспериментов в формате MS Excel.

При этом передача данных из АГУ в ПЭВМ осуществляется через USB порт с использованием технологии виртуального COM-порта. Такой подход позволяет достаточно просто с программной точки зрения реализовать обмен данными между АГУ и ПЭВМ и не требует программной реализации обмена по USB-протоколу или использования специальных драйверов для работы через порт USB. Оправданным также представляется и использование для хранения архивов результатов метрологических экспериментов широко распространенного формата представления данных в виде электронных таблиц MS Excel, что, при незначительных объёмах хранимой информации для одного эксперимента, позволяет широко использовать как возможности самого пакета MS Excel, так и возможности стороннего ПО для обработки экспериментальных данных

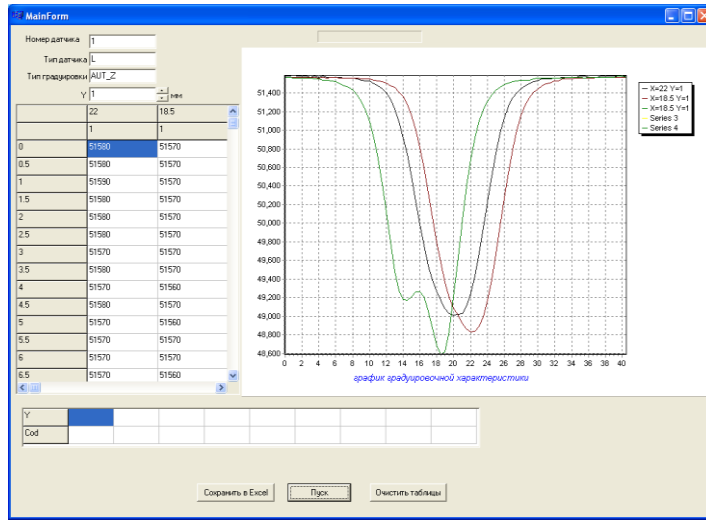


Рисунок 2 – Графический интерфейс ПО верхнего уровня

Заключение

Рассмотрена структура технических средств и приведено описание ПО АГУ для экспериментальных исследований семейств ГХ измерительных каналов систем сбора и обработки информации о координатах смещений торцов рабочих лопаток компрессоров и турбин ГТД на основе применения ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника. Использование указанной установки в метрологических экспериментах с ОВТД позволяет существенно сократить временные затраты и уменьшить влияния человеческого фактора при их проведении.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №14-08-00802).

Список литературы

[1] Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / под ред. Секисова Ю.Н., Скобелева О.П. -Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2001. -188 с.

[2] Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / под общ. ред. Скобелева О.П. -М.: Машиностроение, 2011. -298с.

[3] Боровик, С.Ю. Кластерные методы и системы измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / Автореферат дис. д-ра техн. наук: 05.11.16. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т. -2012. – 35 с.

[4] RM0090 Reference manual STM32F405xx, STM32F407xx, STM32F415xx and STM32F417xx advanced ARM-based 32-bit MCUs. September 2011. (http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/ reference_manual/DM00031020.pdf)

[5] Способы управления фазами шагового двигателя (http://electroprivod.ru/halfstep.htm).

[6] Е7-12, Е7-12/1 измерители L, C, R цифровые. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 1991.

УЛУЧШЕНИЕ СИММЕТРИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ С ПРИБЛИЖЁННЫМ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕМ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНДУКТИВНОСТЕЙ ОДНОВИТКОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ

Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук

443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия

borovik@iccs.ru

тел: +7 (846) 333-26-77, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *симметрия, дифференциальная измерительная цепь, одновитковые вихретоковые датчики, преобразователи «ток-напряжение», импульсное питание, аналого-цифровой преобразователь*

Abstract

The description of a new kind of differential measuring circuit, oriented for inductance conversion of two single-coil eddy-current sensors composed of distributed cluster, is given. As compared with existent measuring circle the new one has not additional inductance coil in it input. A difference voltage from outputs of "current-voltage" transducer is given directly on the differential inputs of analog-digital converter with enhanced digit capacity. By means of it the necessity in zoom amplifier is fall away, the symmetry of measuring circuit becomes better while it structure becomes simpler.

Введение

Известны метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы, применяемых в турбинах современных и перспективных энергосиловых установок, а также система, реализующая этот метод [1]. В состав технических средств системы входят одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника и преобразователь индуктивностей ЧЭ в цифровой код [1, 2].

Метод предусматривает применение распределённого кластера (РК) из двух ОВТД, центры ЧЭ которых размещены в установочных отверстиях статорной оболочки турбины на расстоянии $1.5\psi_л$, где $\psi_л$ – угловой шаг замков лопаток рабочего колеса. При этом в процессе вращения колеса происходит смена функций каждого ЧЭ РК ОВТД с рабочих на компенсационные [1, 3].

ЧЭ через согласующие трансформаторы (СТ) ОВТД включаются в дифференциальную измерительную цепь (ИЦ) преобразователя. Разность токов в первичных обмотках СТ обоих датчиков преобразуется в разностное напряжение с выходов преобразователей «ток-напряжение» (ПТН), которое через дифференциальные входы масштабирующего усилителя (МУс) подается на однополярный вход десятиразрядного АЦП.

Особенность существующей разновидности ИЦ состоит в том, что во входную её часть последовательно с первичной обмоткой СТ одного из датчиков вводится дополнительная катушка, индуктивность которой выбирается равной полезной девиации индуктивности первичной обмотки СТ датчика, выполняющего рабочую функцию при прохождении торца лопатки в непосредственной близости к его ЧЭ. Тогда при отсутствии лопатки в зонах чувствительности обоих датчиков напряжение на выходе МУс составит 0.5 В (половину от максимально возможного 1 В) и код на выходе АЦП – 512 ед. (половину от максимально возможного 1024 ед.),

а при вхождении лопатки в зону чувствительности одного из ЧЭ (выполняющего рабочую функцию) будет либо увеличиваться до 1024 ед., либо уменьшаться до 0.

Однако, несмотря на хорошую работоспособность преобразователя, демонстрируемую в экспериментальных исследованиях системы измерения радиальных и осевых смещений, следует обратить внимание на несимметрию входной части ИЦ, вносимую дополнительной катушкой индуктивности, которая может быть причиной существенных погрешностей ИЦ и, как следствие, потерей точности в измерении искомых смещений, включая радиальные зазоры между статорной оболочкой и торцами лопаток, оказывающих сильное влияние на показатели надёжности и экономичности лопаточных энергосиловых установок [4].

В настоящей статье предлагается новая разновидность дифференциальной ИЦ с приближённым дифференцированием, в которой отсутствует дополнительная катушка индуктивности, а несимметрия входной части ИЦ зависит в основном от различий в параметрах ОВТД. Приводится описание структурной схемы и её функционирования. Отмечаются дополнительные преимущества по сравнению с существующей разновидностью ИЦ.

Предлагаемая структурная схема и её функционирование

Входная часть предлагаемой разновидности ИЦ – дифференциальная схема, которая включает ЧЭ и СТ обоих ОВТД (ЧЭ$_1$, СТ$_1$ в ОВТД$_1$ и ЧЭ$_2$, СТ$_2$ в ОВТД$_2$), а также два ПТН (ПТН$_1$ и ПТН$_2$) (рисунок 1). Питание датчиков в виде коротких прямоугольных импульсов длительностью около $0.2 \cdot 10^{-6}$ с формируется бесконтактными ключевыми элементами (K_1, K_2) в цепи источника постоянного напряжения E. Ключевые элементы и источник шунтируют резисторы R_{p_1} и R_{p_2}, через которые производится рассеяние энергии, накопленной во входной дифференциальной схеме за время импульса питания (при рассеянии энергии ключевые элементы K_1, K_2 - разомкнуты).

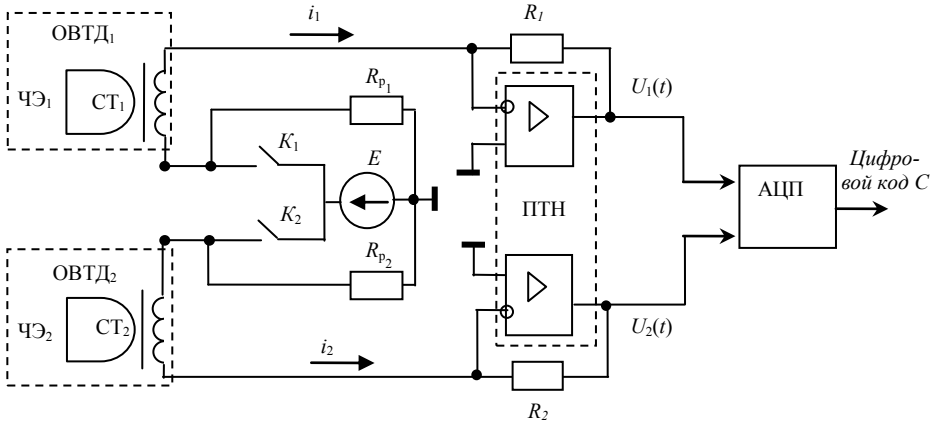


Рисунок 1 – Структурная схема предлагаемой разновидности ИЦ

Предполагается идеальная симметрия ИЦ, которая обеспечивается равенством индуктивностей ЧЭ (ЧЭ$_1$ и ЧЭ$_2$) при отсутствии лопаток в зоне чувствительности, первичных обмоток СТ (СТ$_1$ и СТ$_2$) и их омических сопротивлений, а также остаточных параметров ключей, параметров операционных усилителей (ОУ) в ПТН и резисторов R_1 и R_2 в их обратных связях.

Как и в существующей разновидности ИЦ (это отмечалось во Введении), во входной части рассматриваемой ИЦ осуществляется преобразование токов $i_1(t)$ и $i_2(t)$ в напряжения $U_1(t)$ и $U_2(t)$ на выходах ПТН$_1$ и ПТН$_2$. При этом необходимо подчеркнуть, что выходные напряжения ПТН (U_1, U_2) поступают непосредственно на дифференциальные входы АЦП и это обеспечи-

вает получение цифрового кода на его выходе пропорционального разности напряжений $\Delta U=U_1-U_2$ в момент окончания импульса питания.

Отсутствие МУс в предлагаемой разновидности ИЦ упрощает схему и это является её преимуществом, но вызывает необходимость в применении АЦП с повышенной разрядностью[1].

Функционирование ИЦ поясняют временные диаграммы, приведенные на рисунке 2.

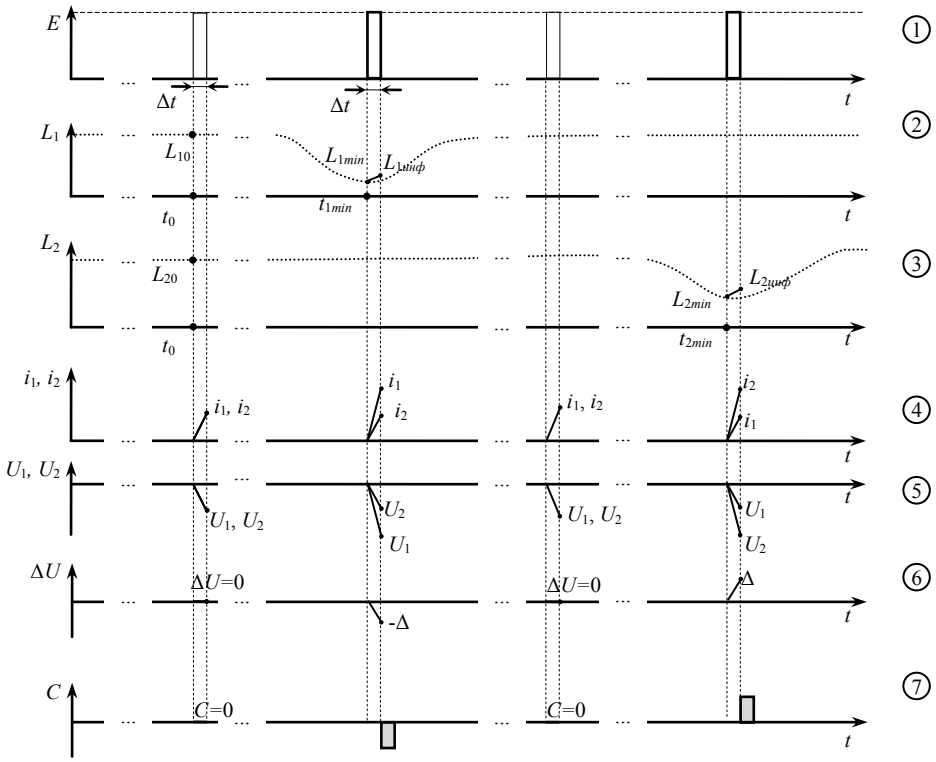


Рисунок 2 – Временные диаграммы функционирования предлагаемой разновидности ИЦ

На эпюре 1 изображено импульсное питание, амплитуда которого практически равна E (напряжению источника), а его частота зависит от минимально возможной длительности прохождения торцевой частью лопатки в зоне чувствительности датчика, которая, в свою очередь, зависит от максимально возможной линейной скорости торца лопатки, ее ширины, длины ЧЭ и определяемого ею диаметра тоководов между ЧЭ и СТ, а также размеров соответствующей им зоны чувствительности[2]. Интервалы времени, соответствующие прохождению торцом выбранной лопатки зоны чувствительности датчика, показаны на эпюрах 2 и 3. Согласно изложенному в работе [1] методу измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в ка-

[1] В продукции ведущих в мире производителей АЦП наблюдается стремительный прогресс в ассортименте и в основных показателях эффективности предлагаемых пользователям микросхем. И если в существующей разновидности ИЦ применяется одновходовый десятиразрядный АЦП, то уже сегодня для предлагаемой разновидности ИЦ можно найти восемнадцатиразрядный АЦП с дифференциальными входами [5], причем новейшие разработки с более высокими показателями с большой вероятностью ожидаются уже в ближайшее время.

[2] Нетрудно показать, что при частоте вращения 10000 об/мин и линейной скорости торцов лопатки около 500 м/с, длине ЧЭ и внутреннем диаметре тоководов 10 мм, длительность прохождения торцевой частью зоны чувствительности составляет $20\cdot10^{-6}$ с. Тогда при частоте импульсов 1 МГц (период 10^{-6}с) в указанном интервале окажется 20 импульсов питания. Однако на эпюре 1 рисунка 2 показано только по одному импульсу питания из последовательности импульсов как во время прохождения лопаткой ЧЭ, так и при ее отсутствии.

ждом из интервалов указаны минимальные значения индуктивностей (L_{1min}, L_{2min}), которые названы информативными. Однако преобразование L_{1min}, L_{2min} в моменты времени t_{1min}, t_{2min} возможно только в гипотетической цепи (построенной на основе известного метода первой производной (ПП) [3, 6]), в которой производные токов или их разности фиксируются в момент подачи напряжения (переднего фронта импульса питания). Вместе с тем, в соответствии с результатами моделирования электромагнитного взаимодействия ЧЭ с торцевой частью лопатки [7] в тот же момент времени индуктивность ЧЭ имеет минимальное значение, а затем с течением времени монотонно возрастает. Поэтому в предлагаемой разновидности ИЦ, как и в существующей, в которых выполняется приближенное дифференцирование, за время Δt произойдет увеличение индуктивности от L_{1min} и L_{2min} до некоторых значений, соответствующих моментам окончания импульса питания. Именно эти значения следует считать информативными ($L_{1инф}$, $L_{2инф}$) с учетом изменений индуктивностей во времени ($L_1(t)$, $L_2(t)$ на отрезке Δt).

На эпюрах 4, 5, 6 изображены изменения токов i_1 и i_2 на входе обоих ПТН и напряжений U_1 и U_2 на их выходах, а также разностное напряжение ΔU во времени.

В момент времени t_0 в ответ на передний фронт импульса питания начинается переходный процесс в датчиках. Поскольку индуктивности первичных обмоток $СТ_1$, $СТ_2$ и их омические сопротивления одинаковы, а постоянные времени обеих ветвей входной цепи равны, то токи i_1 и i_2 также равны и в течение малого отрезка времени Δt (длительность импульса питания) изменяются по линейному закону (эпюра 4). Таким же образом (с учетом инвертирования), оставаясь равными, изменяются во времени напряжения U_1 и U_2 (эпюра 5). Поэтому разностное напряжение на выходах ПТН $\Delta U=U_1-U_2$ (с учетом знака $\Delta U=-U_1-(-U_2)$) остается нулевым, как и цифровой код на выходе АЦП (C=0) (эпюры 6, 7).

При этом предполагается, что по окончании импульсного питания (через время Δt от момента t_0) рассеяние энергии происходит мгновенно (эпюры 4-6). Кроме того, предполагается, что моменты времени t_{1min}, t_{2min} совпадают с передними фронтами импульсов питания, а также соответствуют минимальным значениям индуктивностей L_{1min} и L_{2min} (эпюры 2, 3)[3].

В момент t_{1min} индуктивность $L_{1min}<L_{10}$, причем $L_{10}=L_{20}$, где L_{10}, L_{20} – индуктивности в момент времени t_0, а L_2 сохраняет свое значение и в момент t_{1min}. Тогда в момент t_{1min} постоянная времени $ОВТД_1$ будет меньше постоянной времени $ОВТД_2$ и, как следствие, функция $i_1(t)$ окажется круче, чем $i_2(t)$.

Также круче будет и функция $U_1(t)$ по сравнению с $U_2(t)$ (эпюры 4, 5). А это означает, что разностное напряжение ΔU по окончании интервала времени Δt станет отрицательным ($\Delta U=-U_1-(-U_2)=-U_1+U_2<0$) (эпюра 6). Цифровой код на выходе АЦП также будет отрицательным.

В момент t_{2min} индуктивность $L_{2min}<L_{20}$, но $L_{10}=L_{20}$ и L_{10} сохраняет свое значение до момента t_{2min}. Тогда в момент t_{2min} постоянная времени $ОВТД_2$ будет меньше постоянной времени $ОВТД_1$ и функция $i_2(t)$ окажется круче, чем $i_1(t)$.

В конечном счете, разностное напряжение ΔU будет положительным, равно, как и цифровой код на выходе АЦП (эпюры 4-7).

Представляется очевидным, что напряжение ΔU за время Δt является результатом приближённого дифференцирования разностного напряжения с выходов ПТН (dU/dt при $t\to t_{min}$), которое, в свою очередь, соответствует производной разности токов (i_1-i_2) во входной части ИЦ ($d(i_1-i_2)/dt$ при $t\to t_{min}$), а это означает, что предполагаемая разновидность ИЦ (рисунок 1), как и существующая, дополняют коллекцию ИЦ, построенных на основе метода ПП.

[3] Разумеется, в реальных условиях рассеяние энергии, накопленной за время Δt, требует времени. Также возможны (и даже более вероятны) несовпадения переднего фронта импульса питания с моментами времени t_{1min}, t_{2min} , что может стать одной из причин появления методической погрешности.

Заключение

Предложена новая разновидность дифференциальной ИЦ, предназначенной для преобразования индуктивностей двух ОВТД в составе РК, в которой осуществляется приближённое дифференцирование. Её преимущества по сравнению с существующей разновидностью ИЦ – это улучшение симметрии входной части ИЦ и упрощение структурной схемы, что связано с применением АЦП повышенной разрядности с дифференциальными входами, подключаемыми непосредственно к выходам ПТН, а также с устранением дополнительной катушки индуктивности и МУс (применяемых в существующей разновидности ИЦ).

Список литературы

[1] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов О.П., Скобелев О.П. Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихретоковых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление, 2013. -№10. -С.38-46.

[2] Беленький Л.Б., Логвинов А.В., Скобелев О.П. Преобразователь индуктивностей одновитковых вихретоковых датчиков в цифровой код // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. –С.642-645.

[3] Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / под общ. ред. Скобелева О.П. -М.: Машиностроение, 2011. -298с.

[4] DeCastro J., Melcher K. A Study on the Requirements for Fast Active Turbine Tip Clearance Control Systems // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, Florida, July 11-14, 2004.

[5] PRODUCT SELECTION TABLES / http://www.analog.com/en/analog-to-digital-converters/ad-converters/products/index.html.

[6] Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / под ред. Секисова Ю.Н., Скобелева О.П. -Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2001. -188 с.

[7] Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика с торцом лопатки сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. –С.627-635.

МОДЕЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ С ПЕРЕМЕННЫМИ ВО ВРЕМЕНИ ЭКВИВАЛЕНТНЫМИ ИНДУКТИВНОСТЯМИ ОДНОВИТКОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ

С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
borovik@iccs.ru
тел: +7 (846) 333-26-77, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *модель, измерительная цепь, приближенное дифференцирование, переменная во времени эквивалентная индуктивность, одновитковые вихретоковые датчики*

Abstract

A description of the universal model of a present and a new one variants of measuring circuit with approximate differentiation is given. These variants of circuit are intended for sensitive elements inductance transformation of two single-coil eddy-current sensors composed of distributed cluster of sensors. The time-varying equivalent inductances of "work" sensitive elements are used as an input data in the model. These inductances were obtained as a result of modeling of electromagnetic interaction of sensitive element and a tip of blade with complex shape being used in turbines of power plant installations. The model is oriented for use in computing experiments for examination of time-varying currents and voltages in different points of measuring circuit. It can be used also for obtaining of transformation functions sets as dependences of numeric code from radial and axial displacements.

Введение

Известно, что в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы, применяемых в турбинах энергосиловых установок, используется распределённый кластер (РК) из двух одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД$_1$ и ОВТД$_2$) с чувствительными элементами (ЧЭ$_1$ и ЧЭ$_2$) в виде отрезков проводника [1], причём преобразование индуктивностей ЧЭ производится в дифференциальной измерительной цепи (ИЦ), которая в работе [2] получила название «ИЦ с приближённым дифференцированием».

В существующей разновидности такой ИЦ [3] ЧЭ$_1$ и ЧЭ$_2$ (через согласующие трансформаторы (СТ), встроенные в ОВТД и короткие линии связи (ЛС)) включены во входную часть дифференциальной ИЦ с импульсным питанием прямоугольной формы, длительность которого не превышает $0.2 \cdot 10^{-6}$ с. С помощью преобразователей «ток-напряжение» (ПТН) разность токов в первичных обмотках СТ (СТ$_1$ и СТ$_2$) в обоих датчиках преобразуется в разностное напряжение на выходах ПТН$_1$ и ПТН$_2$, подаваемое на дифференциальные входы масштабирующего усилителя (МУс) и далее на однополярный вход АЦП. По окончании кратковременного импульса питания цифровой код на выходе АЦП соответствует разностному напряжению (току) в начале переходного процесса в датчиках, а, следовательно, приближённому значению производной разностного напряжения (тока) и изменениям индуктивности ЧЭ, выполняющих рабочие функции в РК, а также вызывающих эти изменения смещений торцов лопаток.

В работах [2, 4] приведено описание модели существующей разновидности ИЦ, а также результатов применения этой модели для исследования процессов накопления и рассеяния энергии, оценки быстродействия с учётом статических и динамических характеристик операционных усилителей (ОУ) в ПТН и МУс, *RLC*-параметров ЛС, ЧЭ и первичных обмоток СТ ОВТД. Следует отметить, что та же модель может быть использована для аналогичных иссле-

дований новой разновидности ИЦ с приближённым дифференцированием [5], поскольку её входная часть (до ПТН включительно) практически идентична существующей (за исключением дополнительной катушки индуктивности, соединённой последовательно с первичной обмоткой СТ одного из датчиков).

Вместе с тем, в работах [6, 7] рассматривается модель электромагнитного взаимодействия ЧЭ с торцевой частью лопатки сложной формы и показано, что эквивалентная индуктивность ЧЭ зависит не только от радиальных и осевых смещений торцов лопаток, но и от времени с момента подачи переднего фронта импульса питания. Однако в моделях ИЦ, рассматриваемых в работах [2, 4], изменения во времени индуктивностей ЧЭ (или первичных обмоток СТ) не учитывались (они оставались постоянными на всём протяжении импульса питания).

Следует также отметить, что попытки построения моделей ИЦ с переменными во времени индуктивностями датчиков предпринимались и ранее, но в работах [8, 9] исследовались только ИЦ с неравновесными мостами и дифференцирующим усилителем (предшествующие появлению рассматриваемых разновидностей), а результаты моделирования можно считать лишь предварительными и приближенными, поскольку численные расчеты велись с большим временным шагом для гипотетических исходных данных об изменении индуктивности ОВТД во времени. В работе [10], ориентированной на исследования ИЦ того же «поколения», при разработке модели автор ограничился составлением системы дифференциальных уравнений для эквивалентной схемы ИЦ с переменными во времени индуктивностями ЧЭ, но в последующем анализе использовал упрощенную и фактически идеализированную модель с постоянными во времени параметрами.

Поэтому представляется очевидной необходимость разработки модели существующей и новой разновидностей ИЦ с приближённым дифференцированием, отличающейся от известной модели переменными во времени эквивалентными индуктивностями ЧЭ (первичных обмоток СТ), причём исходными данными в вычислительных экспериментах с использованием разработанных моделей, должны быть результаты моделирования электромагнитного взаимодействия ЧЭ и лопаток сложной формы, применяемых в турбинах [6, 7]. Описанию такой модели ИЦ и посвящена настоящая статья.

Модель измерительной цепи

Как отмечалось во Введении, в работах [2, 4] приведены результаты исследований существующей разновидности ИЦ с приближенным дифференцированием, выполненные на модели, в которой учитывались основные и паразитные параметры ОВТД и ЛС (индуктивности, емкости и омические сопротивления), статические и динамические параметры ОУ в ПТН и МУс.

Было показано, что ёмкости короткой ЛС, хотя и усиливают колебательные процессы во входной части ИЦ, но они сравнительно быстро затухают к моменту фиксации входных напряжений АЦП и их влияние можно не учитывать. Показано также, что динамические характеристики ОУ (при частоте единичного усиления в несколько сотен МГц) практически не оказывают влияние на результат преобразования (тем более это влияние пренебрежимо мало при использовании более высокочастотных ОУ, выпускаемых промышленностью в настоящее время [11]).

Поэтому для моделирования процессов в существующей и новой разновидностях ИЦ предлагается использовать существенно упрощенные эквивалентные схемы, в которых емкость линии суммируется с собственной емкостью первичной обмотки СТ, а динамические характеристики ОУ идеальны и выходное напряжение ПТН определяется только входным током и сопротивлением резистора в цепи обратной связи. Эквивалентная схема новой разновидности ИЦ [5] изображена на рисунке 1, *а*. При этом процесс моделирования (как и моделирование, выполненное в работах [2, 4]), производится в два этапа. На первом предполагается,

что в эквивалентную схему включен ОВТД$_1$ и ток $i_1(t)$ преобразуется в соответствующее напряжение $U_1(t)$ на выходе ПТН$_1$. На втором этапе в эквивалентную схему включен ОВТД$_2$ и ток $i_2(t)$ преобразуется в напряжение $U_2(t)$ на выходе ПТН$_2$. Далее вычисляется разность полученных напряжений $\Delta U(t)=U_1(t)-U_2(t)$. Кроме того, предполагается, что согласно работам [12, 13] индуктивности первичных обмоток СТ$_1$ и СТ$_2$ датчиков в составе РК определяются по формуле $L=w^2 \cdot L_{\text{ЧЭ}}$, где w – число витков первичной обмотки, а $L_{\text{ЧЭ}}$ – индуктивность ЧЭ, которая либо является монотонно нарастающей функцией времени, если ЧЭ ОВТД выполняет рабочие функции, либо – постоянной во времени величиной, равной установившемуся значению той же функции $L(t)$ при $t\to\infty$ ($L_{\text{уст}}$), если ЧЭ ОВТД выполняет компенсационные функции [6, 7].

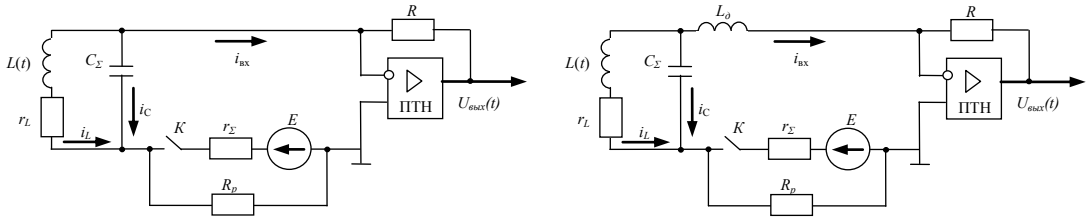


Рисунок 1 – Эквивалентные схемы новой (*а*) и существующей (*б*) разновидностей ИЦ

Возвращаясь к эквивалентной схеме на рисунке 1, *а*, следует обратить внимание на обозначение параметров и их изменения в зависимости от этапа моделирования: $i_{\text{вх}}(t)=i_{1(2)}(t)$ ($i_1(t)$ или $i_2(t)$), $U_{\text{вых}}(t)=U_{1(2)}(t)$ ($U_1(t)$ или $U_2(t)$), а также $L(t)=L_{1(2)}(t)$ ($L_1(t)$ или $L_2(t)$)[1]. Токи в ветвях $i_L(t)=i_{L1(2)}(t)$, $i_C(t)=i_{C1(2)}(t)$, омическое сопротивление первичных обмоток СТ$_1$ и СТ$_2$ – $r=r_{1(2)}$, суммарная емкость первичных обмоток СТ и ЛС - $C_\Sigma= C_{\Sigma1(2)}$, суммарное сопротивление ключа в замкнутом (или разомкнутом) состоянии и внутреннего сопротивления источника E – $r_\Sigma=r_{\Sigma1(2)}$, сопротивления рассеяния энергии $R_{\text{р}}=R_{\text{р}1(2)}$ и в цепях обратной связи ПТН – $R=R_{1(2)}$.

Система дифференциальных уравнений, описывающая поведение эквивалентной схемы (рисунок 1, *а*) при замкнутом состоянии ключей (накопление энергии во входной части ИЦ) имеет вид:

$$(1)\quad \begin{cases} E = i_{вх} \cdot r_\Sigma - U_C; \quad i_L + i_C = i_{вх}; \quad U_{вых} = i_{вх} \cdot R; \\ i_L \cdot r_L + w^2 \cdot \left(L \cdot \dfrac{di_L}{dt} + i_L \cdot \dfrac{dL}{dt} \right) = U_C. \end{cases}$$

Поскольку сопротивление $R_{\text{р}}$ почти на три порядка больше r_Σ (в замкнутом состоянии ключа), то влияние сопротивления $R_{\text{р}}$ в системе уравнений (1) не учитывается.

Напротив, сопротивление $R_{\text{р}}$ учитывается, когда ключ разомкнут и его сопротивление соизмеримо с сопротивлением изоляции. Тогда $r_\Sigma >> R_{\text{р}}$, и влиянием r_Σ по сравнению с влиянием $R_{\text{р}}$ можно пренебречь (величина $R_{\text{р}}$ подбирается так, чтобы рассеяние энергии происходило в критическом режиме). При этом систему уравнений можно записать в виде[2]:

[1] Постоянное во времени значение индуктивности, равное $L_{\text{уст}}$ (при выполнении датчиком компенсационной функции) рассматривается в модели как частный случай $L(t)$.

[2] В процессе рассеяния энергии индуктивности датчиков, выполняющих рабочие функции, считаются постоянными и равными $w^2 \cdot L_{\text{ЧЭ}}$, где $L_{\text{ЧЭ}}$ фиксируется в момент окончания импульса питания.

$$(2)\quad \begin{cases} U_C = i_{вх} \cdot R_p; \quad i_L + i_C = i_{вх}; \quad U_{вых} = i_{вх} \cdot R; \\ i_L \cdot r_L + w^2 \cdot L \dfrac{di_L}{dt} = U_C. \end{cases}$$

В заключение необходимо отметить, что рассмотренная эквивалентная схема (рисунок 1, *а*) и соответствующие системы уравнений (1) и (2) могут быть использованы при моделировании поведения входной части существующей ИЦ, но только на его первом этапе. На втором этапе используется эквивалентная схема с дополнительной катушкой индуктивности $L_д$ (рисунок 1, *б*), а ее поведение описывают приведенные ниже системы уравнений:

$$(3)\quad \begin{cases} E = i_{вх} \cdot r_\Sigma - U_C; \quad i_L + i_C = i_{вх}; \quad U_{вых} = i_{вх} \cdot R; \\ i_L \cdot r_L + w^2 \cdot \left(\left(L_Д + L \right) \cdot \dfrac{di_L}{dt} + i_L \cdot \dfrac{dL}{dt} \right) = U_C. \end{cases}$$

$$(4)\quad \begin{cases} U_C = i_{вх} \cdot R_p; \quad i_L + i_C = i_{вх}; \quad U_{вых} = i_{вх} \cdot R; \\ i_L \cdot r_L + w^2 \cdot \left(\left(L_Д + L \right) \cdot \dfrac{di_L}{dt} \right) = U_C. \end{cases}$$

Причем системы дифференциальных уравнений (3) и (4) отражают процессы накопления и рассеяния энергии соответственно, а приведенные на схеме (рисунок 1) параметры расшифровываются следующим образом: $i_{вх}(t)=i_2(t)$, $U_{вых}(t)=U_2(t)$, а также $i_L(t)=i_{L2}(t)$, $i_C(t)=i_{C2}(t)$, $r=r_2$, $C_\Sigma=C_{\Sigma 2}$, $r_\Sigma=r_{\Sigma 2}$, $R_р=R_{р2}$ и $R=R_2$.

Если полученное разностное напряжение на выходах ПТН умножить на коэффициент масштабирования (усиления) МУс (предположив идеальность его динамических характеристик[3]), то можно получить выходное напряжение МУс или напряжение на входе АЦП.

И, наконец, по известным данным о номинальном входном напряжении и разрядности АЦП, т.е. о его коэффициенте передачи или чувствительности, вычисляется цифровой код C на выходе АЦП в обеих разновидностях ИЦ.

Таким образом, несмотря на указанные различия в эквивалентных схемах (рисунок 1) и в системах дифференциальных уравнений (выражения (1)-(4)), можно утверждать, что для исследования процессов в обеих разновидностях ИЦ [1, 3, 5] разработана практически универсальная модель, которая по исходным данным об эквивалентных индуктивностях ЧЭ ($L_1(t)$ и $L_2(t)$) для заданных радиальных и осевых смещений позволяет определить токи и напряжения как функции времени в любой точке схемы, а также выходные цифровые коды.

Кроме того, модель может быть использована для расчета статических характеристик – семейства функций преобразования в виде зависимостей цифровых кодов от радиальных и осевых смещений торцов лопаток в турбине.

Заключение

Разработана универсальная модель, которая обеспечивает исследование как новой, так и существующей разновидностей ИЦ с приближённым дифференцированием. В отличие от известных моделей аналогичного назначения в разработанной модели ЧЭ, выполняющие рабочие функции в составе РК ОВТД, представлены переменными во времени эквивалентными индуктивностями, которые, в свою очередь, определяются в результате моделирования электромагнитного взаимодействия ЧЭ и лопатки сложной формы с учётом вихревых токов в её торцевой части. С помощью разработанной модели в ходе вычислительных экспериментов могут быть получены изменения токов и напряжений во времени в любой точке ИЦ, а также

[3] По данным исследований, проведенных в работе [2, 14], его влияние на передачу сигнала не выявлено.

семейства функции преобразования ИЦ в виде зависимости цифровых кодов от радиальных и осевых смещений торцов лопаток.

Список литературы

[1] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов О.П., Скобелев О.П. Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихретоковых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление, 2013. -№10. -С.38-46.

[2] Беленький Л.Б. Скобелев О.П. Измерительная цепь с одновитковыми вихретоковыми датчиками и приближенным дифференцированием // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIV Междунар. конф.- Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2012, с.602-606.

[3] Беленький Л.Б., Логвинов А.В., Скобелев О.П. Преобразователь индуктивностей одновитковых вихретоковых датчиков в цифровой код // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV Междунар. конф. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. –С.642-645.

[4] Методы и средства уменьшения влияния мешающих факторов при получении многомерной информации о радиальных зазорах в информационно-управляющих комплексах энергосиловых лопаточных установок: отчет о НИР (заключительный) / ИПУСС РАН; рук. Секисов Ю.Н. –Самара, 2012. -169 с. -№ гос. рег 01201053025.

[5] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов О.П., Скобелев О.П. Улучшение симметрии дифференциальной измерительной цепи с приближённым дифференцированием для преобразования индуктивностей одновитковых вихретоковых датчиков // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XVI Междунар. конф. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2014. (настоящий сборник).

[6] Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика с торцом лопатки сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV Междунар. конф. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. –С.627-635.

[7] Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Результаты моделирования электромагнитного взаимодействия чувствительных элементов одновитковых вихретоковых датчиков в составе кластера с торцом лопатки сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV Междунар. конф. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. –С.636-641.

[8] Беленький Л.Б. Влияние переменной во времени индуктивности одновиткового вихретокового датчика на результат преобразования измерительной цепи // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды IX Междунар. конф. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2007. –С.248-251.

[9] Беленький Л.Б. Влияние изменений во времени индуктивности вихревого датчика на выходной сигнал измерительной цепи // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XI Междунар. конф. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2007. –С.338-342.

[10] Боровик С.Ю. Кластерные методы и системы измерения деформаций статора и координат смещения торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях: Дис. докт. техн. наук: 05.11.16. -Самара, 2011. –306 с.

[11] PRODUCT SELECTION TABLES - режим доступа http://www.analog.com/en/analog-to-digital-converters/ad-converters/products/index.html

[12] Хритин А.А. Система измерения радиальных зазоров в турбомашинах: Дисс. канд. техн. наук: 05.11.16. -Самара, 1993. –180 с.

[13] Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / под ред. Секисова Ю.Н., Скобелева О.П. -Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2001. -188 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ С ОДНОВИТКОВЫМИ ВИХРЕТОКОВЫМИ ДАТЧИКАМИ И ПРИБЛИЖЁННЫМ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕМ

С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
borovik@iccs.ru
тел: +7 (846) 333-26-77, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *модель измерительной цепи, результаты моделирования, токи и напряжения, функции преобразования*

Abstract

An application results of the universal model for simulation of a measuring circuit with approximate differentiation is considered. The model is intended for examination of time-varying currents and voltages in different points of new and existent measuring circuits. It can be used also for obtaining of transformation functions sets as dependences of numeric code from radial and axial displacements of tips of turbine blades with complex shape.

Введение

В работе [1] приведено описание модели электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента (ЧЭ) одновиткового вихретокового датчика (ОВТД) с торцами лопаток сложной формы, применяемых в современных и перспективных турбинах энергосиловых установок. Результаты моделирования в виде переменной во времени эквивалентной индуктивности ЧЭ, а также семейства функций преобразования (ФП), представляющих собой зависимости информативных значений индуктивностей ЧЭ от смещений лопаток в радиальном и осевом направлениях, нашли отражение в работе [2]. При этом семейства ФП были получены в соответствии с методом измерения радиальных и осевых смещений [3], предусматривающим применение распределённого кластера (РК) из двух ОВТД с заданной топологией размещения ЧЭ относительно лопатки и фиксацией минимальных значений индуктивностей ЧЭ[1].

Вместе с тем, для реализации метода (согласно [3]) оба датчика, образующие РК, должны включаться в дифференциальную измерительную цепь (ИЦ) с АЦП на выходе. На сегодняшний день известны две разновидности ИЦ – описания первой, существующей «в металле», приведено в работах [3, 4], вторая, вновь разработанная, предложена в работе [5], причём обе разновидности можно классифицировать как ИЦ с приближённым дифференцированием, которые построены на основе метода первой производной [6].

На исследование существующей и новой разновидностей ИЦ ориентирована универсальная модель ИЦ [7], исходными данными для которой являются результаты моделирования электромагнитного взаимодействия ЧЭ и лопатки (в виде переменной во времени эквивалентной индуктивности ЧЭ) [2].

Однако информация о вычислительных экспериментах, связанная с применением универсальной модели ИЦ и доступная для заинтересованных читателей, отсутствует.

[1] Если РК ОВТД сдвинут в сторону хвостовой части лопаток, а ЧЭ развёрнуты под углом 30÷60 градусов относительно направления вращения лопаточного колеса, то прохождение лопаткой ЧЭ сопровождается уменьшением с последующим переходом индуктивностей ЧЭ через минимальные значения и дальнейшим их увеличением.

Настоящая статья призвана восполнить существующий пробел – в ней рассматриваются результаты исследований токов и напряжений, изменяющихся во времени, в различных точках обеих разновидностей ИЦ, а также семейства ФП ИЦ в виде зависимостей цифровых кодов от радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы, применяемых в турбинах.

Результаты исследований изменений токов и напряжений во времени в различных точках измерительной цепи

Как отмечалось во Введении, для исследований обеих разновидностей ИЦ можно использовать универсальную модель ИЦ, но для получения исходных данных необходимо применение модели электромагнитного взаимодействия ЧЭ с торцевой частью лопатки. Иначе говоря, в вычислительных экспериментах одновременно должны быть задействованы две модели с соответствующими группами исходных данных, необходимых для моделирования.

Подробные сведения об исходных данных первой группы, в том числе о положении и ориентации координатных осей систем отсчёта, топологий размещения ЧЭ ОВТД в составе РК, о геометрических и электрофизических параметрах лопатки, о геометрических и электрических параметрах контура ЧЭ, можно найти в работах [1, 2].

Вторая группа исходных данных содержит необходимую информацию о структуре обеих разновидностей ИЦ, которые включают преобразователи «ток-напряжение» (ПТН), масштабирующий усилитель (МУс) и АЦП [3, 5], а также об эквивалентных схемах, которые, в свою очередь, включают данные об индуктивности первичных обмоток согласующих трансформаторов (СТ) датчиков, о ёмкости линий связи (ЛС) и собственных ёмкостях СТ, сопротивлениях ключевых элементов и источника питания, о его напряжении и других параметрах [7]. Числовые значения параметров эквивалентных схем ИЦ составляют: напряжение источника питания входной части ИЦ E=1,25 В, напряжение питания ПТН и МУс – ±5 В, омическое сопротивление первичных обмоток СТ – r=0,9 Ом, суммарное сопротивление ключа в замкнутом состоянии и внутреннего сопротивления источника E – r_{Σ}=0,5 Ом, сопротивления для рассеяния энергии $R_{\text{р}}$=250 Ом и в цепях обратной связи ПТН R=100 Ом, суммарная емкость первичных обмоток СТ и ЛС - C_{Σ}=20 пФ.

Кроме того, предполагается, что в существующей разновидности ИЦ используется дополнительная катушка с индуктивностью L_{∂}=0,2 мкГн. Предполагается также, что в новой разновидности ИЦ используется восемнадцатиразрядный АЦП с дифференциальными входами и диапазоном изменений в пределах ±1 В (один разряд определяет полярность входного напряжения). В существующей разновидности используется десятиразрядный АЦП с однополярным входным напряжением, изменяющимся в диапазоне от 0 до +1 В[2]. Поскольку МУс осуществляет не только адаптацию номинального входного напряжения АЦП к разностному напряжению на выходах ПТН, но и усиление, то сопротивления на входах МУс составляют 68 и 680 Ом, соответственно.

Далее приводятся результаты исследований изменений во времени токов во входной части обеих разновидностей ИЦ ($i_1(t)$ и $i_2(t)$), напряжений на выходах ПТН ($U_1(t)$ и $U_2(t)$) в ответ на прямоугольный импульс питания с амплитудой E и длительностью Δt=0,2·10^{-6} с, а также разностного напряжения с выходов ПТН ($\Delta U(t)$). Исследования проводятся как на этапе накопления, так и рассеяния энергии. При этом предполагается, что лопатки в зонах чувствительности обоих ЧЭ отсутствуют, а индуктивности ЧЭ (и первичных обмоток СТ) не изменяются во времени и равны установившемуся значению [1, 2][3].

[2] Элементная база существующей разновидности ИЦ выбиралась в условиях жестких финансовых ограничений (ПТН и МУс выполнены на операционных усилителях (ОУ) типа AD8056, а в качестве АЦП используется микросхема AD9200).

[3] Разумеется, вихревые токи, появляющиеся в самом ЧЭ или в тоководах ОВТД, объемном витке СТ при импульсном питании, по аналогии с вихревыми токами в лопатке могут быть причиной изменений эквивалентной индуктивности

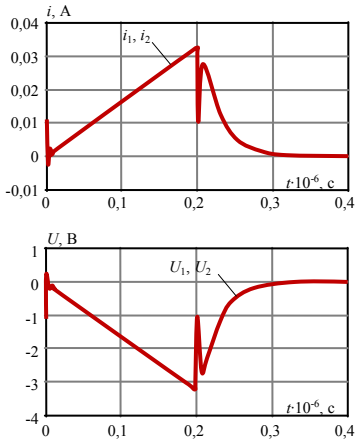


Рисунок 1 – Изменения токов и напряжений во входной части новой разновидности ИЦ

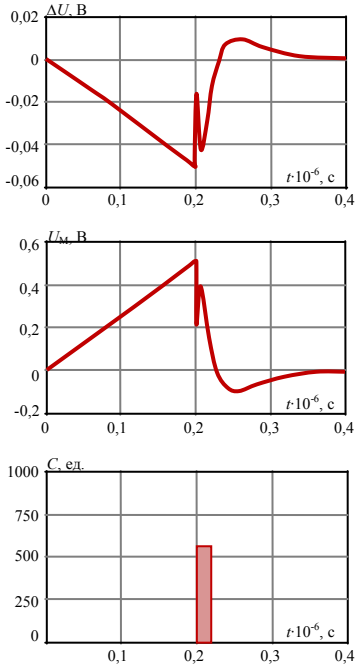


Рисунок 2 – Разностное напряжение с выходов ПТН, напряжение на выходе МУс и цифровой код АЦП (существующая разновидность ИЦ)

На рисунках 1, 2 представлены результаты моделирования новой и существующей разновидностей ИЦ. Поскольку в любой момент времени в пределах интервала $0{,}2\cdot10^{-6}$ с индуктивности ЧЭ равны, то в новой разновидности ИЦ токи $i_1(t)$ и $i_2(t)$, как и напряжения $U_1(t)$ и $U_2(t)$, также равны, а разностное напряжение $\Delta U(t)$ в тех же пределах интервала времени и цифровые коды после его окончания имеют нулевое значение [5, 7].

Однако в существующей разновидности ИЦ, несмотря на равенство индуктивностей ЧЭ, за счет дополнительной катушки с индуктивностью нарушается равенство указанных токов и напряжений и, как следствие, появляется разностное напряжение $\Delta U(t)$ и напряжение на выходе МУс ($U_М$), а также цифровой код C (рисунок 2). Напряжение $U_М$ достигает половины от номинального входного напряжения АЦП, т.е. 0,5 В, а соответствующий код составляет 512 ед.

На этапе накопления энергии (в течение $0{,}2\cdot10^{-6}$ с) исследуемые токи и напряжения имеют практически линейный характер, длительность рассеяния энергии по токам и напряжениям (включая разностное напряжение) до уровня одного процента в обоих разновидностях ИЦ не превышает $0{,}37\cdot10^{-6}$ с.

Во всех последующих вычислительных экспериментах исследуется поведение обеих разновидностей ИЦ при наличии лопатки в зоне чувствительности ЧЭ датчиков.

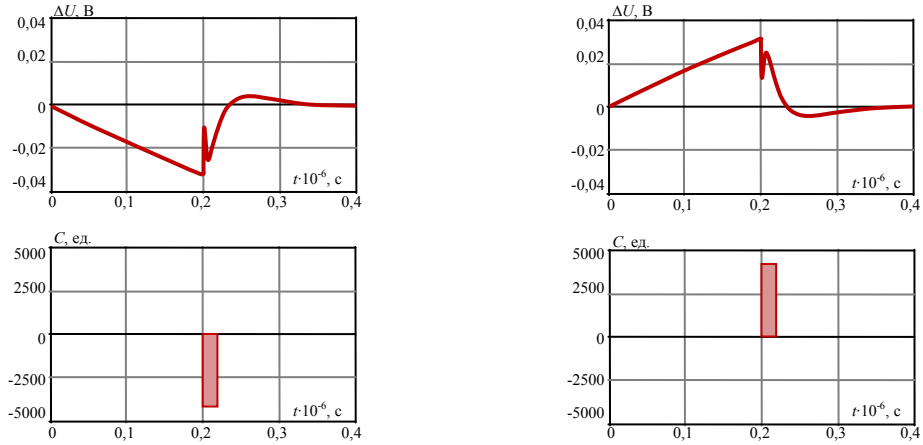
В исходных данных к модели ИЦ используется переменная во времени эквивалентная индуктивность ЧЭ, выполняющего рабочие функции и постоянная во времени индуктивность компенсационного ЧЭ, которая, как и в серии предыдущих экспериментов, определяется установившимся значением переменной во времени индуктивности рабочего ЧЭ [1, 2].

Предполагается также, что в обеих разновидностях ИЦ координаты смещений торца лопатки неизменны – x=-1 мм, y=0,5 мм[4]. Остальные параметры эквивалентной схемы аналогичны тем, что приведены выше.

ЧЭ во времени. Если эквивалентные индуктивности как функции времени известны, то они могут быть исходными данными в универсальной модели ИЦ [7].

[4] В системе отсчёта *OXYZ* координатная ось *X* направлена вдоль оси статора и лопаточного колеса (ЛК), ось *Y* в радиальном, а ось *Z* – в направлении вращения ЛК. Поэтому координаты *x* и *y* характеризуют смещения торца лопатки в осевом и радиальном направлениях (подробнее о положении системы отсчёта, размещении ЧЭ РК ОВТД и лопатки см. в работе [2]).

На рисунке 3, *а* представлены разностное напряжение ($\Delta U(t)$) в новой разновидности ИЦ в момент времени, когда лопатка находится в зоне чувствительности $ЧЭ_1$, выполняющего рабочие функции ($ЧЭ_2$ – компенсационные), и цифровой код C, соответствующий моменту окончания импульса питания. При смене функций ЧЭ изменяется полярность разностного напряжения и соответствующего цифрового кода C (рисунок 3, *б*), причем характер изменений напряжений соответствует тем, что приведены на временных диаграммах в работе [5].



а) *б*)

Рисунок 3 – Разностное напряжение $\Delta U(t)$ и соответствующий цифровой код (C) в новой разновидности ИЦ, когда рабочие функции выполняет $ЧЭ_1$ (*а*) и $ЧЭ_2$ (*б*)

На рисунке 4 представлены результаты аналогичных вычислительных экспериментов на модели существующей разновидности ИЦ. При этом в интервале времени $0{,}2 \cdot 10^{-6}$ с $\Delta U(t)$ и $U_M(t)$ не изменяют полярность (благодаря дополнительной катушке индуктивности), а недостаточную разрядность АЦП частично компенсирует МУс. Однако изменения кода при тех же значениях x,y-координат в новой разновидности ИЦ в несколько раз превышают изменения кода в существующей разновидности.

В заключение раздела рассматриваются результаты исследований влияния длины ЛС. Следует отметить, что в исходных данных влияние ЛС учитывается её емкостью, которая суммируется с собственной емкостью СТ ОВТД (C_Σ). При этом величина ёмкости ЛС составляла 10 пФ, что соответствует ее длине порядка 10 см. Вместе с тем условия размещения преобразователя, включающего рассматриваемые разновидности ИЦ, могут вызывать необходимость в существенном увеличении длины ЛС, например, до 50 см.

На рисунке 5 приведены результаты вычислительных экспериментов на моделях новой (*1*) и существующей (*2*) разновидностей ИЦ (рабочие и компенсационные функции выполняют $ЧЭ_1$ и $ЧЭ_2$ соответственно). Из графиков $\Delta U(t)$ видно, что амплитуда и длительность колебательного процесса в существующей разновидности ИЦ превышают те же параметры в новой разновидности (в 1,5 раза). Это связано с бóльшей несимметрией существующей разновидности ИЦ из-за дополнительной катушки индуктивности во входной части ИЦ.

Результаты исследований семейств функций преобразования измерительных цепей

Искомые семейства ФП – это зависимости цифровых кодов от координат смещений торцов лопаток ($\mathbf{C}_1(x, y)$ и $\mathbf{C}_2(x, y)$). Расчет ФП осуществляется с помощью универсальной модели ИЦ [7], причём исходными данными в таких расчетах являются переменные во времени экви-

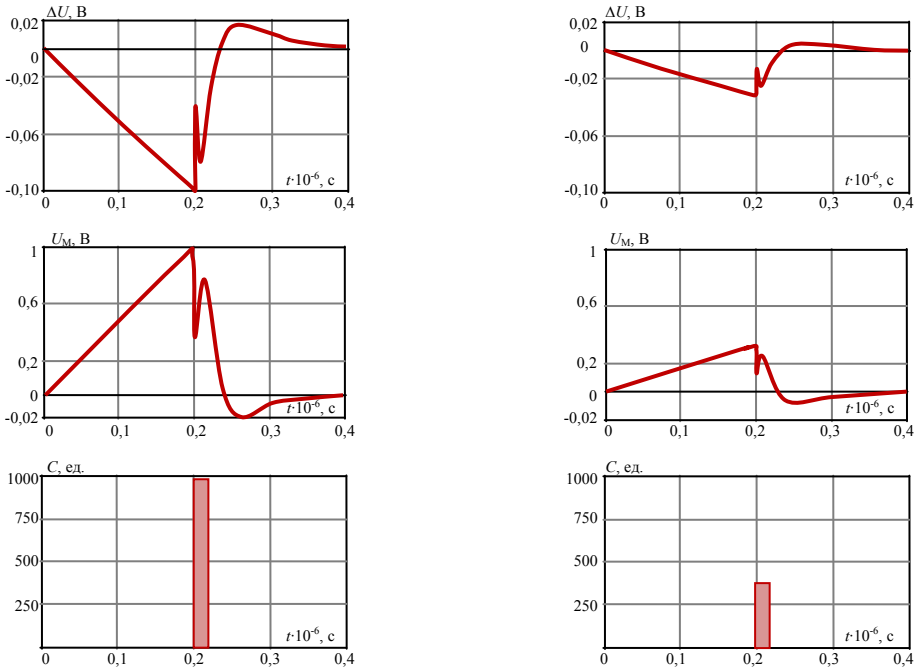


Рисунок 4 – Разностное напряжение $\Delta U(t)$, напряжение $U_М(t)$ (на выходе МУс) и соответствующий цифровой код (C) в существующей разновидности ИЦ, когда рабочие функции выполняет $ЧЭ_1$ (*а*) и $ЧЭ_2$ (*б*)

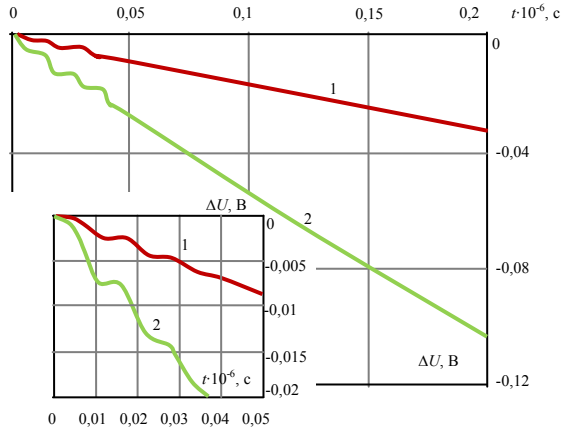
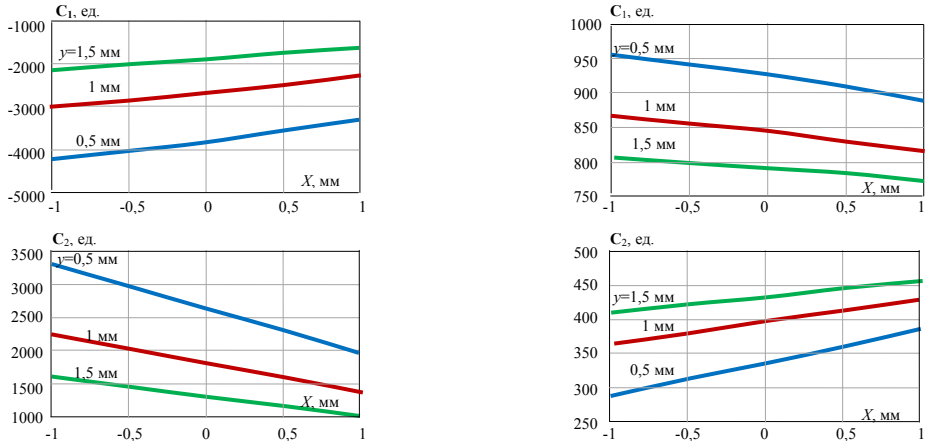


Рисунок 5 – Влияние ЛС на выходное напряжение в новой (1) и существующей (2) разновидностях ИЦ

валентные индуктивности, полученные на модели электромагнитного взаимодействия ЧЭ и лопатки [1]. Вместе с тем, исходные данные отражают результаты первичного преобразования которое, в свою очередь, характеризует семейство ФП в виде зависимостей информативных значений индуктивностей $ЧЭ_1$ и $ЧЭ_2$, фиксируемых в момент окончания импульса питания ИЦ, от координат смещений – $L_1(x, y)$ и $L_2(x, y)$ [5].

Технология получения ФП ($L_1(x, y)$ и $L_2(x, y)$) во всех подробностях рассматривается в работе [2] (там же приведены и результаты вычислительных экспериментов). Фактически та же технология использовалась в исследованиях, проводимых в предыдущем разделе, когда для точки с заданными x,y-координатами определялись переменные во времени эквивалентные индуктивности ЧЭ (модель [1]), а затем и соответствующие цифровые коды (модель ИЦ [7]). Многократное повторение этой процедуры для различных парных комбинаций значений координат x и y (в диапазонах их изменений) позволяет сформировать массивы цифровых кодов и семейства ФП для обеих разновидностей ИЦ (эти семейства и представлены на рисунке 6 в виде зависимостей $\mathbf{C}_1(x)$ и $\mathbf{C}_2(x)$ при y=*const*). Как и ожидалось, в обеих разновидностях ИЦ сохраняется монотонность зависимостей кодов от координат смещений, но в новой разновидности (*а*), в отличие от существующей (*б*), коды разнополярны, а на характер тех же зависимостей в существующей разновидности ИЦ влияет инвертирование разностного напряжения с выходов ПТН (ΔU) в МУс ($U_М$).



а) *б*)

Рисунок 6 – Семейства ФП в новой (*а*) и существующей (*б*) разновидностях ИЦ

Заключение

С помощью универсальной модели ИЦ проведены вычислительные эксперименты, в которых исследовались изменения токов и напряжений во времени в различных точках обеих разновидностей ИЦ, а также цифровые коды при отсутствии и наличии лопатки в зонах чувствительности датчиков. Показано также, что интенсивность колебательных процессов в разностном напряжении на выходах ПТН возрастает с увеличением длины ЛС, причем в наибольшей степени в существующей разновидности ИЦ за счет несимметрии в ее входной части, вносимой дополнительной катушкой индуктивности. Кроме того, с помощью той же модели ИЦ (при исходных данных в виде результатов моделирования электромагнитного взаимодействия ЧЭ и лопатки при заданных координатах смещений торца лопатки) получены семейства ФП в виде зависимостей цифровых кодов от координат для новой и существующей разновидностей ИЦ.

Список литературы

[1] Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика с торцом лопатки сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV Междунар. конф. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. –С.627-635.

[2] Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Результаты моделирования электромагнитного взаимодействия чувствительных элементов одновитковых вихретоковых датчиков в составе кластера с торцом лопатки сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV Междунар. конф. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. –С.636-641.

[3] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов О.П., Скобелев О.П. Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихретоковых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление, 2013. -№10. -С.38-46.

[4] Беленький Л.Б., Логвинов А.В., Скобелев О.П. Преобразователь индуктивностей одновитковых вихретоковых датчиков в цифровой код // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV Междунар. конф. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. –С.642-645.

[5] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов О.П., Скобелев О.П. Улучшение симметрии дифференциальной измерительной цепи с приближённым дифференцированием для преобразования индуктивностей одновитковых вихретоковых датчиков // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XVI Междунар. конф. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2014. (настоящий сборник).

[6] Беленький Л.Б. Скобелев О.П. Измерительная цепь с одновитковыми вихретоковыми датчиками и приближенным дифференцированием // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIV Междунар. конф.- Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2012, с.602-606.

[7] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов О.П., Скобелев О.П. Модель измерительной цепи с переменными во времени эквивалентными индуктивностями одновитковых вихретоковых датчиков // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XVI Междунар. конф. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2014. (настоящий сборник).

АСПЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ РЕГИСТРАЦИИ ПОТОКОВ ДАННЫХ ПРИ ИСПЫТАНИИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

В.В. Гучук

Институт проблем управления РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65, Россия
polma@bk.ru
тел: +7 (495) 334-89-51, факс: +7 (495) 334-93-40

Ключевые слова: *программно-аппаратные средства, диагностика, аварийная ситуация, поток регистрируемой информации, стенд для испытания, план испытания*

Abstract
The main questions of development of interaction of hardware-software means of registration of data flows are described at test of difficult objects, including for ensuring expeditious diagnostics and forecasting of working processes for the purpose of prevention of development of emergencies.

Введение

В работе описаны основные аспекты разработки взаимосвязи программно-аппаратных средств для обеспечения регистрации данных при испытании сложных объектов, в том числе для диагностики и прогнозирования рабочих процессов с целью предотвращения развития аварийных ситуаций. Взаимодействие программно-аппаратных средств систем испытания разрабатывалось на основе анализа архитектуры и технических средств перспективных измерительно-вычислительных комплексов (ИВК) с использованием стандартов GPIB, VXI, PXI, PXI-express, LXI, а также стандарта IEEE 1588 для синхронизации по времени сетевых измерительных устройств и систем хранения данных [1, 2, 3]. Был проведен анализ стандартов в заданной предметной области, осуществлена разработка вариантов построения ИВК и системы хранения данных с анализом структуры потоков данных. Была выбрана концепция построения системы хранения данных, информационно-измерительной системы (ИИС) для регистрации разнородных потоков информации с привязкой данных к единой шкале времени с целью обеспечения технологии и методов получения прогнозных оценок состояния сложных научно-технических объектов.

1 Организация взаимодействия программно-аппаратных средств

Общее представление об информационном взаимодействии дает рис. 1.

На рисунке: СУпрРег – Система управления регистрацией, ИИС - Информационно-измерительная система, АРМы - Автоматизированные рабочие места, БСВП – Блок сопряжения с внешними пользователями, БД – База данных, ОБД – Оперативная база данных, СиДиПро – Система диагностики и прогнозирования, БВВ – Блок высокопроизводительных вычислений, САЗ – Система аварийной защиты, ЛокСДАЗ – Локальные системы диагностики и аварийной защиты, СУпрТО – Система управления технологическим оборудованием, СУпрС – остальные подсистемы управления работой стенда,

Двусторонние потоки (двойная линия) – подготовка к регистрации (несколько различных шин условно сведены в одну), Односторонние потоки (одинарная линия) проведение регистрации. Примечание “СЕВ” (Система единого времени) указывает на то, что данный субблок встроен в эту систему.

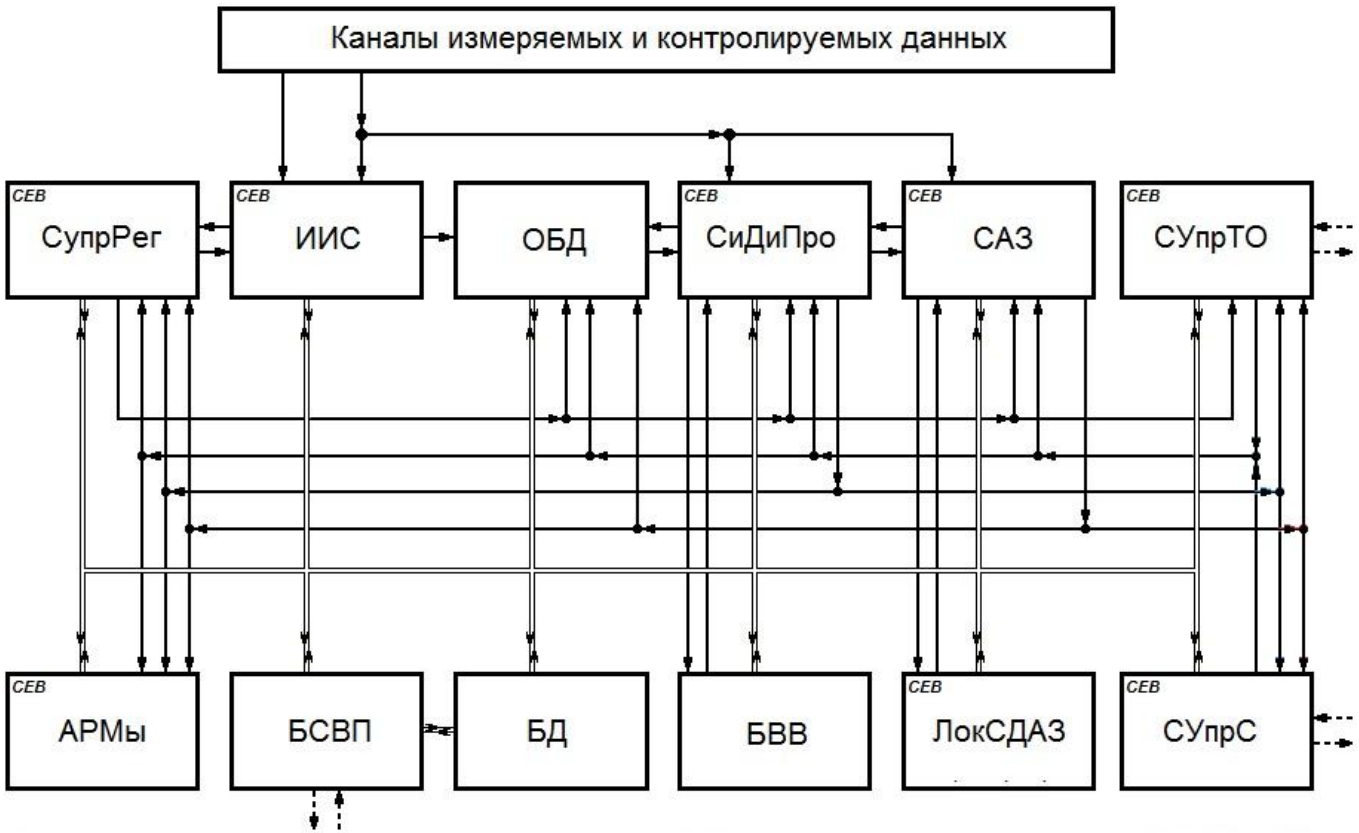


Рисунок 1 – Упрощенная структура основных потоков данных и служебной информации

Представленная структурная схема является отправной точкой для построения системы регистрации. Состав и сама структура могут существенно корректироваться по многим причинам. Прежде всего, это касается учета базовых требований к системе регистрации. Среди прочего – это количество регистрируемых параметров, их номенклатура и разнородность по датчиковой аппаратуре и ее обвязке, частоты опроса и пиковые нагрузки на приемную аппаратуру, а также степень изученности испытуемых изделий, характерные времена для возможности вывода из предаварийной ситуации, управляемость изделий в нештатных ситуациях и т.д.. Сюда же можно отнести топологию всего испытательного стенда – на каком удалении от испытуемого изделия будет находиться управляющий комплекс, как протокольно и по каким каналам связи будут взаимодействовать подсистемы стенда, как будет осуществляться дублирование этих подсистем и т.д.

Следующий блок вопросов касается выбора аппаратуры для реализации предложенной структуры. Если не касаться финансовой стороны вопроса, то, например, с учетом высочайших требований к быстродействию, информационно-измерительную систему (ИИС на рис. 1) можно строить на основе модулей компании National Instruments. Подробные описания и все необходимые характеристики приведены на сайте компании (http://russia.ni.com/). Выбор осуществлялся на основе собственного опыта и анализа текущей ситуации в мире информационно-измерительной аппаратуры [4. 5].

Структурная организация ИИС должна обеспечивать решение основной задачи – сохранение без потерь информационных потоков измеренных данных медленноменяющихся параметров (ММП), статико-динамических параметров (СДП) и быстроменяющихся параметров (БМП). Все данные должны быть однозначно интерпретируемыми и доступными для ситуационного постанализа. Как вариант, несколько потоков можно объединять в один обобщенный поток, поступающий в приемный сервер. Важнейшей задачей, при этом, является формирование подпотока данных, поступающих на СиДиПро (рис. 1) для оперативной диагностики с целью предотвращения негативного развития возникающих нештатных ситуаций.

Выбор аппаратуры и СУБД для системы хранения данных (БД на рис. 1) также не очень велик. Во всяком случае, эта система может быть построена либо на базе реляционной СУБД MS SQL, либо на СУБД компании ORACLE. По ряду субъективных соображений был выбран второй вариант [6]. БД занимает особое место в структуре программно-аппаратных средств. В таких системах хранилища могут быть консолидированы в рамках специализированных сетей хранения данных – Storage Area Network (SAN), что позволяет организовать кластерные отказоустойчивые конфигурации для серверов виртуализации, критически важных (business critical) баз данных, файловых хранилищ и многих других служб, используя при этом максимально возможные скорости передачи данных.

Интерфейсные возможности системы в целом и ее подсистем во многом определяются типом используемых файловых систем [6]. Пример файловой системы - система ZFS корпорации Sun Microsystems для ОС Solaris, которая поддерживает большие объёмы данных, объединяет концепции файловой системы и менеджера логических дисков (томов) и физических носителей, инновационную структуру данных на дисках, легковесные файловые системы (*lightweight filesystems*), а также простое управление томами хранения данных. Основное преимущество ZFS — полный контроль над физическими и логическими носителями. Зная, как именно расположены данные на дисках, ZFS способна обеспечить высокую скорость доступа к ним, контроль их целостности, а также минимизацию фрагментации данных. Это позволяет динамически выделять или освобождать дисковое пространство на одном или более носителях для логической файловой системы.

Свои специфические требования к аппаратуре есть и у системы диагностики и прогнозирования (СиДиПро на рис. 1). В работе [7] предложены достаточно универсальные решения целого ряда вопросов по организации этой системы. Внутренние аспекты – необходимо обеспечить быстродействие для реализации иногда достаточно неоперативных но эффективных

алгоритмов диагностики [8], необходимо обеспечить параллельную опеку сразу нескольких подсистем испытуемого изделия, и, соответственно, целого ряда процессов, происходящих в них, и при этом нужно успевать получать большой поток данных от испытуемого изделия. Понятно также, что нужен соответствующий объем оперативной памяти, а также желательно установить память SSD Внешние аспекты – необходимо иметь согласованный с остальной аппаратурой порт приема и передачи данных, нужен взаимоприемлемый протокол передачи данных, нужна корректная общая временная стратегия обмена данными.

Базовым вопросом при организации взаимодействия программно-аппаратных средств является реализуемость работы в реальном времени. Ясно, что программные средства должны быть достаточно мощными и гибкими и использовать современные алгоритмические концепции, что необходимо известными методами заставить ОС работать хотя бы в режиме мягкого реального времени, а также, что не должно быть задержек из-за неспешной работы драйверов, каналов связи, всех задействованных модулей и т.д.

При организации взаимодействия программно-аппаратных средств достаточно деликатным может оказаться организация передачи данных от модулей типа модуля ввода-вывода, работающих на большой внутренней частоте, и собирающих данные в собственный буфер FiFo, в недостаточно быстрые каналы обмена данными. Конечно, приемы построения систем с таким сочетанием известны [9, 10], однако при использовании нового оборудования имеется своя специфика. Здесь также необходимо разбираться с работой драйверов к таким модулям. Сложность вопросов, связанных с использованием драйверов, определяется тем, что зачастую разработчики аппаратуры комплектуют свою продукцию сырыми драйверами, которые ими же доводятся до кондиции в течение достаточно длительного времени. В нашем случае еще одной особенностью является использование модифицированной ОС, драйвера к которой существенно отличаются от стандартных

К этому следует добавить необходимость организации подчеркнуто корректной работы системы прерывания]. Сложность заключается в использовании модификации ОС (в первую очередь модификации подвергается работа ОС с системой прерывания), в том, что испытательный стенд представляет из себя распределенную систему с синхронным и асинхронным взаимодействием подсистем, каждая из которых имеет свою систему прерывания. Также надо отметить, что при организации службы прерывания для системы диагностики и прогнозирования целесообразно использовать усовершенствованный механизм упреждающего изменения уровня приоритета прерывания [11, 12], позволяющего избавиться от ряда недостатков известных систем, в частности, от существенного увеличения времени на переключение приоритетов, связного с реконфигурацией системы.

Что касается службы единого времени (СЕВ на рис. 1), то для ее организации в современной аппаратуре многое уже предусмотрено. Необходимо лишь корректно использовать предлагаемые решения.

В комплексе мер по предотвращению возникновения нештатных и аварийных ситуаций, при создании высоконадежных интерактивных систем мониторинга и управления сложными научно-техническими изделиями, особое место занимает организации полноценного участия человека-оператора в процессе интеллектуального прогнозирования неблагополучного развития управленческой ситуации (АРМы на рис. 1). Это особенно актуально в силу малой изученности новых изделий. В системе регистрации на человека-оператора возлагается целый комплекс задач интеллектуального уровня – необходимо изучить характер и особенности проявленных процессов, обнаружить взаимосвязь различных групп параметров, оценить устойчивость и управляемость системы в целом, исследовать влияние значения отдельных параметров или их сочетания на скатывание системы к нештатным режимам и т.д. Необходима такая визуализация, которая даст максимально возможное представление о состоянии управляемой системы, и в то же время позволит человеку-оператору адекватно воспринимать представленную информацию и принимать осознанные и эффективные действия в режиме реального вре-

мени. В [13, 14, 15] рассматриваются конкретные пути решения этой задачи, анализируются особенности организации интерактивного режима, предлагается визуальная поддержка логического анализа ситуаций.

Для успешной работы системы регистрации важное значение имеет подготовительная фаза. Необходимо сформировать план испытаний, разработать алгоритмы выхода из нештатных ситуаций для конкретного изделия, провести стартовую настройку и тестовый опрос всех подсистем испытательного стенда. В этом ключе в системе предусмотрена организация взаимодействия при подготовке к регистрации (двойные линии на рис. 1).

Заключение

В работе затронуто несколько определяющих аспектов организации информационного взаимодействия программно-аппаратных средств при разработке систем испытания сложных научно-технических объектов. Основную коррекцию изложенной концепции вносит ее реализация на практике, что связано с возможным отсутствием необходимых аппаратных средств или их дороговизной, использованием других, уже применявшихся у разработчиков аппаратных средств, а также мировоззрением и привязанностью самих разработчиков.

Список литературы

[1] Нестеров В.С., Гучук В.В., Рябых В.Ю. Технологические аспекты организации процесса многоканальной регистрации разночастотного потока данных. // Труды международной научно-практической конференции “Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях”, М.- ИПУ РАН, 2011 г., С. 629 – 637.

[2] Карепанов А. Новая многофункциональная система сбора данных Chroma 51101 // Современная электроника, 2012 г., №8, С. 36-41.

[3] Гучук В.В., Нестеров В.С., Рябых В.Ю. Организация управления разночастотными потоками регистрируемой информации стенда для испытания ЖРД МТ. // Материалы четвертой международной конференции “Управление развитием крупномасштабных систем”, М.- ИПУ РАН, 2010 г. Стр. 333 – 335.

[4] Гучук В.В., Нестеров В.С., Рябых В.Ю. Разработка структурной схемы программного контроля и интерактивного управления стенда для испытания ЖРД МТ. // Третья международная конференция “Управление развитием крупномасштабных систем”, М.- ИПУ РАН, 2009 г. Стр. 321 – 322.

[5] Сахабетдинов И.У., Иванов А.И., Лазутина Н.А. Принципы построения имитационно-моделирующих комплексов для испытаний сложных технических объектов / Труды конференции УКИ’12. М.: ИПУ РАН, 2012. С. 33-40.

[6] Антонов А.В., Мрыкин В.О. Система обработки измерительной информации при испытаниях ПЛ / Материалы конференции “ Управление движением морских судов и специальных аппаратов”. М.: ИПУ РАН, 2008. С. 26-31.

[7] Гребенюк Е.А. Методы анализа нестационарных временных рядов с неявными изменениями свойств (обзор) / Автоматика и телемеханика. 2005. № 12. С. 3-30.

[8] Промыслов В.Г. Моделирование вычислительных систем с переменным потоком данных // Проблемы управления. 2012. №1 . С. 62-70.

[9] Меньшиков В.А., Рудаков В.Б., Сычев В.Н. Контроль качества космических аппаратов при отработке и производстве. М.: Машиностроение/ Машиностроение-Полет, 2009, 400 с.

[10] Соколов В.В., Стецюра Г.Г. Организация оптической связи узлов рефлективной памяти // Датчики и системы. 2013. №8 (171). С. 32-38.

[11] Кузина Ю.К., Гучук В.В. Технология упреждающей критериальной адаптации в мониторинге и управлении сложными научно-техническими объектами / Материалы 7-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2013, Москва). М.: ИПУ РАН, 2013. Т.2. С. 420-423.

[12] Денисов К.П., Рябых В.Ю. Патент РФ №2195013 от 10.02.2002г. МКИ G 06 F 9/46. «Способ многоуровневой обработки запросов прерывания и многоуровневая система для его осуществления».

[13] Гучук В.В. Интерфейсное обустройство программного обеспечения регистрации разнородных потоков данных. // Труды конференции “Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения” (УКИ-2012). М.- ИПУ РАН, 2012 г., стр. 752 - 763.
[14] Гучук В.В., Нестеров В.С. Технология визуализации параметров в автоматизированных системах контроля и диагностики. // Труды международной научно-практической конференции “Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях”, М.- ИПУ РАН, 2011 г., стр. 277 - 283.
[15] Гучук В.В. Контекстное представление динамических параметров при управлении сложными научно-техническими объектами / Труды 6-й Международной конференции "Управление развитием крупномасштабных систем" (MLSD'2012, Москва). М.: ИПУ РАН, 2012. Т. 2. С. 244-249.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАЗДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ

В.А. Засов

Самарский государственный университет путей сообщений
443066, Самара, 1-ый Безымянный пер., 18, Россия
vzasov@mail.ru
тел: +7 (846) 255-68-93

Ключевые слова: *разделение сигналов, модели сигналов, статистические методы, вариации параметров, устойчивость, сингулярные интервалы.*

Abstract

The paper deals with the algorithm of stability control of the statistical methods separation of signals. Stability analysis is performed by calculating the singular intervals of the mixing matrix for the absolute, relative, critical and stochastic variations of matrix parameters. The authors consider singular intervals as parameter intervals ranging from the source condition to the singular condition of the mixing matrix. Computer modeling proved the algorithm is valid under uncertainty of parameters perturbation of signals and channels.

Введение

Разделение сигналов (источников сигналов) – это решение задачи выделения отдельных сигналов из аддитивной смеси нескольких сигналов, поступающих в точки измерения от различных источников сигналов, недоступных для непосредственных измерений. Решение этой задачи необходимо во многих приложениях, например, мониторинге и диагностике технических объектов, медицинской диагностике и др. Задача разделения сигналов относится к классу обратных задач, из чего следуют возможные некорректность и неустойчивость решения, поэтому актуальными являются исследования в области анализа и контроля устойчивости решения этой задачи в условиях неполной информации о параметрах объектов.

Алгоритмы статистического разделения сигналов (их еще называют слепыми, blind) базируются на знании характеристик сигналов источников, частотные же характеристики каналов считаются неизвестными, но должны удовлетворять ряду требований, например, отличаться друг от друга, не иметь общих нулей и др.[1].

Существующие методы статистического разделения основываются на одном из (или комбинации нескольких) следующих свойств источников сигналов: независимость сигналов (статистическая независимость, некоррелированность источников сигналов и шума), знание законов распределения сигналов (нормальное, равномерное и др.), а также такие свойства как нестационарность (изменение статистических характеристик во времени) и т.д.

По сравнению с детерминированными методами [2] статистические обладают преимуществом, т.к. не требуют знания динамических характеристик каналов. С другой стороны, платой за расширение функциональных возможностей статистических методов является сильная зависимость погрешности и устойчивости разделения от соответствия реальных свойств сигналов априори предполагаемым свойствам, а также от выполнения ограничений на характеристики каналов. Это усложняет применение статистических методов.

Важно, что в отличие от детерминированных методов, в статистических методах на устойчивость влияют не только свойства каналов, но и свойства сигналов.

Также известно [2], что в статистических методах разделение сигналов производится с точностью до масштабного множителя и перестановки, т.е. решение задачи статистического разделения сигналов имеет вид:

$\hat{s} = \mathbf{Wx} = \mathbf{PAH}^{-1}x$,

где $\mathbf{P}$ – матрица перестановки [2], $\mathbf{A}$ – диагональная масштабирующая матрица, диагональными элементами которой являются масштабные множители.

Разделение сигналов с точностью до масштабного множителя означает, что амплитуды разделенных сигналов $\hat{\mathbf{s}}$ могут быть произвольными и не соответствовать их вкладам в аддитивные смеси $\mathbf{x}$ (в наблюдаемые сигналы), кроме того фазы сигналов источников $\mathbf{s}$ и разделенных сигналов $\hat{\mathbf{s}}$ могут отличаться, например, сигналы источников и разделенных сигналов могут быть в противофазе. Другими словами, в разделенных сигналах $\hat{\mathbf{s}}$ достоверна только их форма, а амплитудные и фазовые параметры произвольны.

Разделение с точностью до перестановки означает, что в процессе разделения позиция разделенных сигналов на выходах разделяющей матрицы $\mathbf{W}$ может меняться: сигнал от первого источника s_1 может быть на первом выходе $\hat{s}_1$, далее – на втором выходе $\hat{s}_2$, а сигнал второго источника s_2 может перейти на первый выход $\hat{s}_1$ и т.д.

Поэтому моделирование влияния на устойчивость решения отклонений вышеперечисленных свойств сигналов источников от априори предполагаемых, так и отклонений требований к характеристикам каналов, являются актуальными задачами, которые необходимо решить перед конкретными практическими применениями методов статистического разделения сигналов.

Целью работы является разработка алгоритма и компьютерной программы, позволяющих осуществлять анализ и контроль устойчивости решения задачи статистического разделения сигналов.

Алгоритм анализа устойчивости статистических методов разделения сигналов

Для анализа устойчивости статистического разделения сигналов при вариациях параметров каналов смешивающей матрицы $\mathbf{H}$ предлагается использовать метод [2,3], основанный на вычислении сингулярных интервалов. Под сингулярными интервалами понимается матрица $\Delta\tilde{\mathbf{H}}$ интервалов параметров от исходного $\mathbf{H}$ до вырожденного (сингулярного) состояния $\tilde{\mathbf{H}}$ смешивающей матрицы $\mathbf{H}$.

Предлагаемый алгоритм контроля устойчивости статистического разделения при вариации параметров каналов состоит из следующих шагов и приведен в таблице.

Таблица - Алгоритм контроля устойчивости статистического разделения сигналов

№ шага	Действие	Комментарий
1	$W = \mathbf{PAH}^{-1}$	Вычисляется разделяющая матрица на основе статистического алгоритма
2	$W = (PA)^{-1} W$	Учитываются эффекты перестановки и масштабирования
3	$H = W^{-1}$	Вычисляется смешивающая матрица
4	Вычисление сингулярных интервалов $\Delta\tilde{\mathbf{H}}$	Вычисление для выбранного вида вариации параметров (абсолютные, относительные, критические, стохастические и др.)
5	Проверка $\lvert\Delta H_{max}\rvert \le \lvert\eta \cdot \Delta\tilde{H}\rvert$	Производится контроль устойчивости

На первом шаге с помощью выбранного метода слепого разделения сигналов решается задача разделения сигналов и соответственно определяется разделяющая матрица $\mathbf{W} = \mathbf{PAH}^{-1}$.

На втором шаге используется разработанный вспомогательный алгоритм, устраняющий влияние изменения масштабирования $\mathbf{A}$ и перестановок $\mathbf{P}$, т.е. определяется скорректированная разделяющая матрица $\breve{\mathbf{W}}$, в которой влияние матриц $\mathbf{P}$ и $\mathbf{A}$ устранено.

На третьем шаге на основе разделяющей матрицы вычисляется смешивающая матрица $\breve{\mathbf{H}}$.

На четвертом шаге вычисляются сингулярные интервалы $\Delta\tilde{\mathbf{H}}$ для выбранных видов вариации параметров [3]: абсолютных, относительных, критических, стохастических.

На пятом шаге осуществляется контроль устойчивости путем сравнения вычисленных сингулярных интервалов $\Delta\tilde{\mathbf{H}}$ с пороговыми значениями $\Delta\tilde{\mathbf{H}}_{\max}$ на основе предложенного в [2,3] критерия.

Для решения проблем с масштабированием и перестановкой предлагается использовать дополнительную априорную информацию о сигналах и каналах.

Так, для модели с частотно-независимыми каналами проблему масштабирования, связанную со скачком фазы разделенного сигнала относительно сигнала источника, можно решить, используя априорную информацию о смешивающей матрице $\mathbf{H}$: элементы матрицы неотрицательны (нет скачков фазы). Тогда вычисленную в процессе статистического разделения матрицу $\mathbf{W}$ нужно модифицировать следующим образом: $\breve{\mathbf{W}} = \left|\mathbf{W}^{-1}\right|^{-1} = \left|\mathbf{H}\right|^{-1}$.

Для матрицы $\mathbf{H}$, где все элементы неотрицательны, очевидно $\left|\mathbf{H}\right|^{-1} = \mathbf{H}^{-1}$. Для разделяющей матрицы $\mathbf{W}$, для которой одно или несколько решений имеют сдвиг по фазе на π можно записать $\mathbf{W} = \left(\mathbf{H}\cdot\tilde{\mathbf{E}}\right)^{-1}$, где $\tilde{\mathbf{E}}$ - диагональная единичная матрица, диагональные элементы которой указывающие на элементы разделяющей матрицы $\mathbf{W}$, ответственные за сдвиг фазы на π, равны (-1). Для компенсации влияния сдвига по фазе, матрица $\mathbf{W}$ должна быть преобразована к матрице $\breve{\mathbf{W}}$ следующим образом

$$\left|\mathbf{W}^{-1}\right|^{-1} = \left|\mathbf{H}\cdot\tilde{\mathbf{E}}\right|^{-1} = \left(\left|\mathbf{H}\right|\cdot\left|\tilde{\mathbf{E}}\right|\right)^{-1} = \mathbf{H}^{-1}.$$

Проблему масштабирования (определение реальных амплитуд разделенных сигналов) можно решить на основе априорной информации об энергии сигналов источников. В этом случае масштабный коэффициент a_m для s_m сигнала можно определить на основе следующего выражения

$$a_m = \frac{\hat{s}_m}{\left\|\hat{s}_m\right\|^2}\cdot\left\|s_m\right\|^2.$$

Проблема перестановки может быть решена, например, на основе априорной информации о позициях разделенных сигналов на выходах разделяющей матрицы $\mathbf{W}$. Тогда контролируя нормы разности между матрицами на текущем $\mathbf{H}_k$ и предыдущем $\mathbf{H}_{k-1}$ шагах возможно определять матрицы перестановки $\mathbf{P}$ и масштабирования $\mathbf{A}$.

Работоспособность предложенного алгоритма контроля устойчивости подтверждается методом компьютерного моделирования для задачи разделения двух источников сигналов на примере широко распространенного алгоритма Independent Component Analysis (ICA) [4].

Алгоритм ICA основан на центральной предельной теореме, из которой следует, что сумма независимых произвольных переменных обычно имеет распределение, которое ближе к гауссовскому, чем любая из исходных входных переменных. Таким образом, естественной

мерой статистической независимости является негауссовость, поэтому для разделения смеси сигналов необходимо максимизировать негауссовость источников.

На первом этапе моделирования будем считать, что свойства сигналов удовлетворяют априорным ограничениям для алгоритма ICA [3], обеспечивающим устойчивое решение задачи. Тем самым исключим фактор влияния на устойчивость разделения свойств сигналов.

Рассмотрим модели образования сигналов, задаваемые смешивающими матрицами $\mathbf{H}_1$ и $\mathbf{H}_2$ разной степени обусловленности: $cond(\mathbf{H}_1) \approx 18.6$ и $cond(\mathbf{H}_2) \approx 1105{,}5$, M=N=2, погрешность измерения элементов матриц определяются 9 двоичными разрядами:

$$\mathbf{H}_1 = \begin{pmatrix} 0.99 & 0.53 \\ 0.65 & 0.45 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}_2 = \begin{pmatrix} 0.95 & 0.50 \\ 0.63 & 0.33 \end{pmatrix}.$$

Шаг 1. Определим разделяющие матрицы $\breve{\mathbf{W}}_1$ и $\breve{\mathbf{W}}_2$ с помощью рассмотренного выше алгоритма ICA с использованием вспомогательного алгоритма, устраняющего влияние перестановок и масштабирования. Получим:

$$\breve{\mathbf{W}}_1 \approx \begin{pmatrix} 4.55 & -5.39 \\ -6.50 & 9.88 \end{pmatrix}, \quad \breve{\mathbf{W}}_2 \approx \begin{pmatrix} -161.18 & 244.56 \\ 324.38 & -489.08 \end{pmatrix}.$$

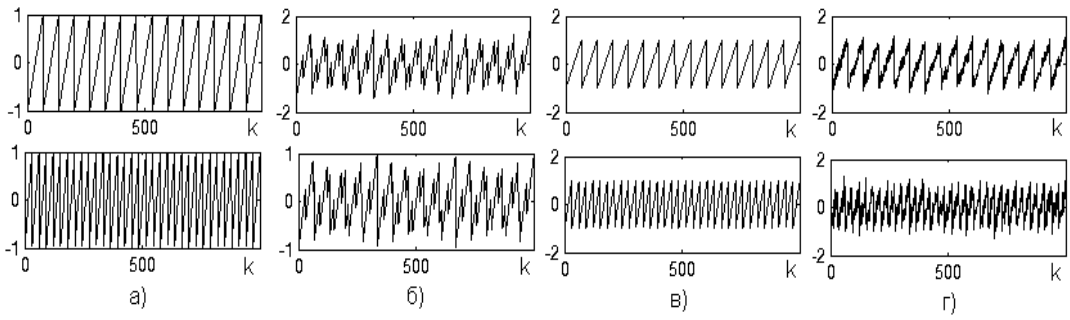
Шаг 2. Вычислим смешивающие матрицы $\breve{\mathbf{H}}_1$ и $\breve{\mathbf{H}}_2$.

Шаг 3. Определим матрицы $\Delta\tilde{\mathbf{H}}_1$ и $\Delta\tilde{\mathbf{H}}_2$ сингулярных интервалов параметров для критического вида вариации параметров [2,3]. Найденные матрицы сингулярных интервалов параметров следующие:

$$\Delta\tilde{\mathbf{H}}_1 \approx \begin{pmatrix} -2.42 & 3.44 \\ 2.85 & -5.23 \end{pmatrix} \cdot 10^{-2}, \quad \Delta\tilde{\mathbf{H}}_2 \approx \begin{pmatrix} 0.4 & -0.7 \\ -0.6 & 1.1 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3}.$$

Видно, что для плохо обусловленной матрицы $\mathbf{H}_2$ сингулярные интервалы $\Delta\tilde{\mathbf{H}}_2$ на порядок меньше, что подтверждает правильность работы предложенного алгоритма.

Шаг 4. Исходя из разрядности АЦП r=9, выберем $\Delta\tilde{\mathbf{H}}_{\max} = 2 \cdot 10^{-3}$ и проведем контроль устойчивости решения с использованием критерия [2]. В соответствии с этим критерием решение для смешивающей матрицы $\mathbf{H}_2$ неустойчиво, что также видно из рисунка 1-г, показывающим неправильное разделение сигналов. Погрешности устойчивого разделения (рисунок 1-в для хорошо обусловленной матрицы $\mathbf{H}_1$) равны 0.023% для первого сигнала, 0.029% для второго сигнала, а погрешности неустойчивого разделения (для плохо обусловленной матрицы $\mathbf{H}_2$) равны 5.86% для первого сигнала, 21.27% для второго сигнала.



б) образованные смеси, в) устойчивое и г) неустойчивое разделение алгоритмом ICA

Рисунок 1 - Тестовые пилообразные сигналы: а) 15Гц и 35 Гц

На втором этапе моделирования исследуется предложенный алгоритм для анализа устойчивости статистического разделения сигналов, когда свойства сигналов не удовлетворяют априорным ограничениям, обеспечивающим устойчивое решение. При этом будем считать, что свойства каналов, удовлетворяют априорным ограничениям, обеспечивающим устойчивое решение задачи.

Используем для моделирования хорошо обусловленную смешивающую матрицу $\mathbf{H}_1$ из предыдущего примера. При этом для моделирования влияния отклонений параметров сигналов от априорных предположений исследуем зависимость погрешности разделения сигналов от коэффициента корреляции сигналов источников. В примере неустойчивое разделение будем моделировать выбором пилообразных источников сигналов с близкими частотами 15 Гц и 15.01 Гц.

Шаг 1. Определим разделяющую матрицу $\mathbf{W}_3$ с помощью рассмотренного выше метода ICA.

Шаг 2. Вычислим смешивающую матрицу $\breve{\mathbf{H}}_3$.

Шаг 3. Определим матрицу $\Delta\tilde{\mathbf{H}}_3$ сингулярных интервалов параметров для критического вида вариации параметров:

$$\Delta\tilde{\mathbf{H}}_3 \approx \begin{pmatrix} -0.2 & -3.5 \\ 0.2 & 4.8 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3}.$$

Для хорошо обусловленной смешивающей матрицы $\mathbf{H}_1$ полученные сингулярные интервалы $\Delta\tilde{\mathbf{H}}_3$ очень малы. Это противоречие объясняется тем, что неустойчивость решения задачи разделения (плохая обусловленность матрицы $\mathbf{W}_3$) обусловлена несоответствием свойств источников сигналов априорным ограничениям, обеспечивающим устойчивое решение задачи (сильной коррелированностью источников).

Шаг 4. Для заданного $\Delta\tilde{\mathbf{H}}_{\max} = 2 \cdot 10^{-3}$ проведем контроль устойчивости. В соответствии с критерием матрица $\breve{\mathbf{W}}_3$ указывает на неустойчивость решения, что также видно из рисунка 2-в, из которого видно сигналы разделяются неправильно, что подтверждает работоспособность алгоритма контроля устойчивости для случая несоответствия параметров источников априорным требованиям.

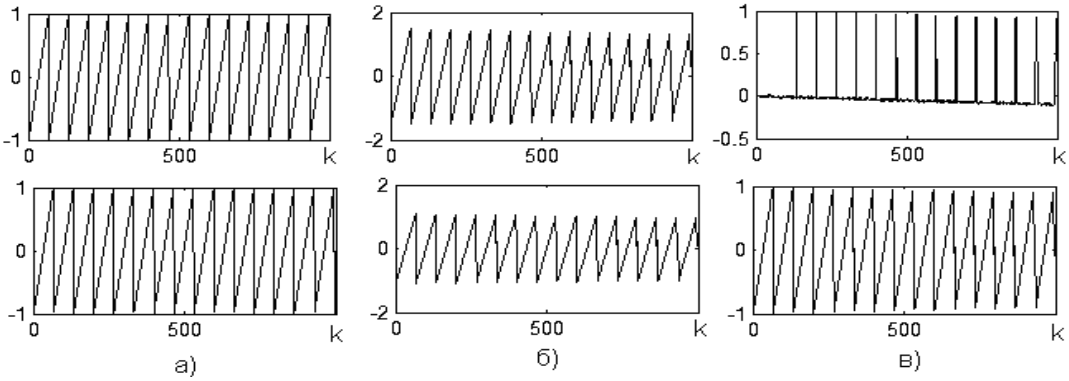


Рисунок 2 -Тестовые пилообразные сигналы: а) 15Гц и 15.01 Гц,б) образованные смеси, в) неустойчивое разделение

Погрешности неустойчивого разделения равны 99% для первого сигнала, 0.9% для второго сигнала, т.е. результаты разделения сигналов практически не приемлемы.

На рисунке 3 приведены другие результаты компьютерного моделирования статистического разделения сигналов, показывающие влияние на устойчивость разделения свойств источников сигналов.

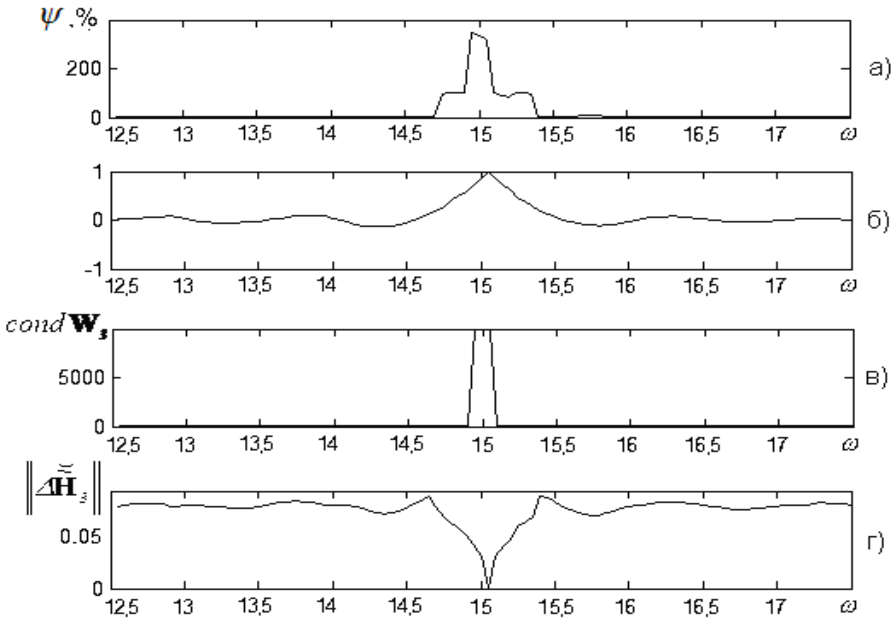


Рисунок 3 – Графики зависимости от частоты сигнала источника S_2: а) суммарной погрешности разделения сигналов, б) коэффициента корреляции источников, в) числа обусловленности $cond\mathbf{W}_3$, г) нормы матрицы сингулярных интервалов $\left\|\Delta\tilde{\mathbf{H}}_3\right\|$

Моделирование производилось на тестовых задачах с известными источниками сигналов и параметрами смешивающей матрицы $\mathbf{H}(\omega)$.

Погрешность ψ разделения сигналов определяется как приведенная к мощности сигнала источника величина мощности сигнала ошибки разделения $\sum_{k=0}^{K-1}\left(s(k)-s_\alpha(k)\right)^2$:

$$\psi = \frac{\sum_{k=0}^{K-1}\left(s(k)-s_\alpha(k)\right)^2}{\sum_{k=0}^{K-1}s^2(k)}\cdot 100\%$$

где $s(k)$, $s_\alpha(k)$ – точное и вычисленное значения сигналов соответственно.

Для модели с хорошо обусловленной смешивающей матрицей $\mathbf{H}_1$ ($cond(\mathbf{H}_1)\approx 18.6$) из рассмотренного примера производилось изменение частоты одного из сигналов источников от 12.5Гц до 17.5Гц с шагом 0.05Гц при постоянной частоте второго источника 15Гц.

На рисунке 3 показаны в зависимости от частоты: суммарная погрешность разделения сигналов (рисунок 3-а), коэффициент корреляции источников (рисунок 3-б), число обуслов-

ленности разделяющей матрицы $\mathbf{W}_3$ (рисунок 3-в), норма вычисленной матрицы сингулярных интервалов $\left\|\Delta\tilde{\tilde{\mathbf{H}}}_3\right\|$ (рисунок 3-г).

При коэффициенте корреляции больше 0.3 (существенная коррелированность сигналов источников) наблюдаются резкие возрастание числа обусловленности (более 10000) и уменьшение нормы вычисленной матрицы сингулярных интервалов $\left\|\Delta\tilde{\tilde{\mathbf{H}}}_3\right\|$. Это соответствует значительному росту погрешности разделения (более 30%) из-за неустойчивого разделения сигналов.

Алгоритм анализа устойчивости также обобщается на случай, когда на устойчивость разделения влияют одновременно как характеристики каналов, так и характеристики сигналов.

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

По сравнению с детерминированными методами, методы статистические (слепые) обладают преимуществом, т.к. не требуют знания характеристик каналов. С другой стороны, погрешность и устойчивость разделения статистических методов сильно зависят от соответствия реальных свойств сигналов априори предполагаемым свойствам, а также от выполнения ограничений на характеристики каналов.

Предложен алгоритм анализа и контроля устойчивости статистических методов разделения сигналов, разработанный на основе вычисленных сингулярных интервалов параметров модели, который отличается от алгоритмов контроля для детерминированного разделения тем, что учитывает эффекты перестановки и масштабирования, возникающие в статистических алгоритмах разделения сигналов.

Проведено исследование разработанного алгоритма для определения влияния свойств каналов модели образования сигналов на погрешность и устойчивость разделения сигналов, которое показало достоверность разработанного алгоритма контроля устойчивости.

На основе разработанных алгоритма и программы исследована зависимость погрешности и устойчивости разделения сигналов источников от отклонений свойств сигналов от априори предполагаемых.

Разработанные алгоритм и программа применяются для обработки сигналов автоматической локомотивной сигнализации с целью анализа сигналов и помех в задачах мониторинга системы управления интервальным движением поездов.

Список литературы

[1] A. Cichocki, C. Amari. Adaptive blind signal and image processing: Learning algorithms and applications. - Wiley, 2002.- 555p.

[2] Засов В.А. Алгоритмы и вычислительные устройства разделения и восстановления сигналов в многомерных динамических системах: монография. – Самара: СамГУПС, 2012. – 233 с.; ил.

[3] Засов В.А., Ромкин М.В. Анализ устойчивости решения разделения сигналов в условиях априорной неопределенности возмущений //Тр. XV международн. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». – Самара, СНЦ РАН, 2013. – С.682-688.

[4] Independent component analysis / Aapo Hyvarinen, Juha Karhunen, Erkki Oja. — John Wiley & Sons, Inc. – 2001. – 481 p.

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПЕРАТИВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, В.В. Муратова

ФГБОУ ВПО "Самарский государственный технический университет"
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
vs_mel@mail.ru
тел: +7 (846) 337-05-45

Ключевые слова: *параметры сигналов, гармоническая модель, дополнительные сигналы, мгновенные значения, ортогональные составляющие, фазосдвигающий блок*

Abstract

New classification of methods of definition of parameters is offered based on the formation of additional signals and use of instant values of the basic and additional harmonious signals, which allows to synthesize new methods and means of measurement.

Введение

Во многих процессах, связанных с контролем параметров и испытанием сложных технических объектов, эффективность принятия решения по ожидаемым результатам выхода параметров на заданный режим или за пределы установленного допуска может быть существенно выше, если сокращается интервал времени, необходимый для анализа и идентификации наблюдаемого процесса или воздействующего фактора [1].

Существуют задачи измерения, контроля и испытаний, в которых вид процесса строго обусловлен физическими законами исследуемых явлений, а погрешности измерений пренебрежимо малы. Примером могут служить периодические процессы. На основе измерения их параметров осуществляется контроль разного рода электрических и электронных генераторов, оценивается качество электрической энергии, проводятся испытания колебательных механических систем. Такие сигналы нашли широкое применение в радиотехнике и технике связи.

Многие сигналы в цепях технических объектов являются периодическими, модели которых близки к гармоническим. Для определения параметров таких сигналов можно воспользоваться гармонической моделью, оценив погрешность, обусловленную несоответствием модели виду реального сигнала. В настоящее время широкое распространение получили методы измерения параметров гармонических сигналов (ПГС) по отдельным мгновенным значениям, не связанным с периодом входного сигнала и обеспечивающие определение искомых параметров за время, меньшее периода [2].

Дальнейшее сокращение времени измерения обеспечивают методы, основанные на формировании дополнительных сигналов, сдвинутых по фазе относительно входных, и определении основных ПГС: среднеквадратических значений напряжения и тока, активной и реактивной мощности по мгновенным значениям основного и дополнительных сигналов. Однако вопросы, связанные с системным подходом к синтезу и анализу таких методов не решены.

В статье рассматривается классификация и основы синтеза методов оперативного измерения ПГС на основе формирования дополнительных сигналов.

1 Классификация методов измерения ПГС на основе формирования дополнительных сигналов

Предлагается классификация методов измерения ПГС, в которой в качестве классификационных признаков используются: вид дополнительных сигналов (формирование ортогональных составляющих сигналов или сигналов, сдвинутых относительно входных на произвольный угол); количество формируемых дополнительных сигналов (один, два и более); связь с характерными точками сигналов (переходы через ноль) и их количество; применение образцовых интервалов времени (рисунок 1).

Рисунок 1 – Классификация методов

Исключая противоположные операции (формирование одного или двух дополнительных сигналов; связь или отсутствие связи с характерными точками сигналов; использование или не использование образцовых интервалов времени), можно условно выделить шесть групп, характеризующие принципы синтеза методов.

Первую группу составляют методы, основанные на формировании одного дополнительного сигнала, не использующие характерные точки сигналов.

Для этой группы можно синтезировать следующие методы.

При использовании ортогональных составляющих сигналов: *I-AC-E*; *I-AC-G* (формирование только дополнительного напряжения); *I-BC-E*; *I-BC-G* (формирование только дополнительного тока); *I-AC-BC-E*; *I-AC-BC-G* (формирование дополнительного сигнала как напряжения, так и тока).

При использовании дополнительных сигналов, сдвинутых на произвольный угол: *II-AC-E*; *II-AC-G* (формирование только дополнительного напряжения); *II-BC-E*; *II-BC-G* (формирование только дополнительного тока); *II-AC-BC-E*; *II-AC-BC-G* (формирование дополнительного сигнала как напряжения, так и тока).

Ко второй группе отнесены методы, основанные на формировании одного дополнительного сигнала, связанные с характерными точками одного из сигналов.

Для этой группы можно синтезировать следующие методы.

При использовании ортогональных составляющих сигналов: *I-AC-EH*; *I-AC-GH* (формирование только дополнительного напряжения); *I-BC-EH*; *I-BC-GH* (формирование только дополнительного тока); *I-AC-BC-EH*; *I-AC-BC-GH* (формирование дополнительного сигнала как напряжения, так и тока).

При использовании дополнительных сигналов, сдвинутых на произвольный угол: *II-AC-EH*; *II-AC-GH* (формирование только дополнительного напряжения); *II-BC-EH*; *II-BC-GH* (формирование только дополнительного тока); *II-AC-BC-EH*; *II-AC-BC-GH* (формирование дополнительного сигнала как напряжения, так и тока).

Третью группу составляют методы, основанные на формировании одного дополнительного сигнала, связанные с характерными точками двух и более сигналов.

Для этой группы можно синтезировать следующие методы.

При использовании ортогональных составляющих сигналов: *I-AC-EJ*; *I-AC-GJ* (формирование только дополнительного напряжения); *I-BC-EJ*; *I-BC-GJ* (формирование только дополнительного тока); *I-AC-BC-EJ*; *I-AC-BC-GJ* (формирование дополнительного сигнала как напряжения, так и тока).

При использовании дополнительных сигналов, сдвинутых на произвольный угол: *II-AC-EJ*; *II-AC-GJ* (формирование только дополнительного напряжения); *II-BC-EJ*; *II-BC-GJ* (формирование только дополнительного тока); *II-AC-BC-EJ*; *II-AC-BC-GJ* (формирование дополнительного сигнала как напряжения, так и тока).

К четвертой группе отнесены методы, основанные на формировании двух дополнительных сигналов напряжения, либо тока, либо как напряжения, так и тока, не использующие характерные точки сигналов.

С учетом того, что формирование двух дополнительных ортогональных составляющих одного сигнала не возможно, то для этой группы могут быть синтезированы только методы, использующие дополнительные сигналы, сдвинутые на отличный от 90° угол: *II-AD-E*; *II-AD-G* (формирование двух дополнительных сигналов напряжения); *II-BD-E*; *II-BD-G* (формирование двух дополнительных сигналов тока); *II-AD-BC-E*; *II-AD-BC-G* (формирование двух дополнительных сигналов напряжения и одного дополнительного сигнала тока); *II-AC-BD-E*; *II-AC-BD-G* (формирование одного дополнительного напряжения и двух дополнительных сигналов тока); *II-AD-BD-E*; *II-AD-BD-G* (формирование по два дополнительных напряжения и тока).

Пятую группу составляют методы, основанные на формировании двух дополнительных сигналов напряжения, либо тока, либо как напряжения, так и тока, связанные с характерными точками одного из сигналов.

Поскольку здесь также не могут быть использованы ортогональные составляющие сигналов, то возможно синтезировать следующие методы: *II-AD-EH*; *II-AD-GH* (формирование двух дополнительных сигналов напряжения); *II-BD-EH*; *II-BD-GH* (формирование двух дополнительных сигналов тока); *II-AD-BC-EH*; *II-AD-BC-GH* (формирование двух дополнительных сигналов напряжения и одного дополнительного сигнала тока); *II-AC-BD-EH*; *II-AC-BD-GH* (формирование одного дополнительного напряжения и двух дополнительных сигналов тока); *II-AD-BD-EH*; *II-AD-BD-GH* (формирование по два дополнительных напряжения и тока).

К шестой группе относятся методы, основанные на формировании двух дополнительных сигналов напряжения, либо тока, либо как напряжения, так и тока, связанные с характерными точками двух и более сигналов.

Если не использовать ортогональные составляющие сигналов, то для этой группы могут быть синтезированы следующие методы: *II-AD-EJ*; *II-AD-GJ* (формирование двух дополнительных сигналов напряжения); *II-BD-EJ*; *II-BD-GJ* (формирование двух дополнительных сигналов тока); *II-AD-BC-EJ*; *II-AD-BC-GJ* (формирование двух дополнительных сигналов напряжения и одного дополнительного сигнала тока); *II-AC-BD-EJ*; *II-AC-BD-GJ* (формирование одного дополнительного напряжения и двух дополнительных сигналов тока); *II-AD-BD-EJ*; *II-AD-BD-GJ* (формирование по два дополнительных напряжения и тока).

Таким образом, если не вводить структурную избыточность, то представленная классификация позволяет в общем случае синтезировать 66 методов.

2 Методы измерения ПГС на основе формирования дополнительных сигналов

В качестве примера методов, основанных на формировании по одному дополнительному сигналу напряжения и тока, рассмотрим метод *II-AC-EH*, представляющий вторую группу.

В отличие от подобных методов при его реализации возможен сдвиг дополнительных сигналов в каналах напряжения и тока на разные углы.

Метод заключается в том, что в момент перехода входного сигнала напряжения через ноль одновременно измеряют первое мгновенное значение дополнительного напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол $\Delta\alpha_1$, и первые мгновенные значения входного сигнала тока и, сдвинутого относительно него по фазе на угол $\Delta\alpha_2$, дополнительного сигнала тока; через произвольный (в общем случае) интервал времени Δt одновременно измеряют вторые мгновенные значения входного и дополнительного сигналов напряжения и второе мгновенное значение дополнительного тока. ПГС определяют по измеренным мгновенным значениям сигналов [3].

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рисунке 2.

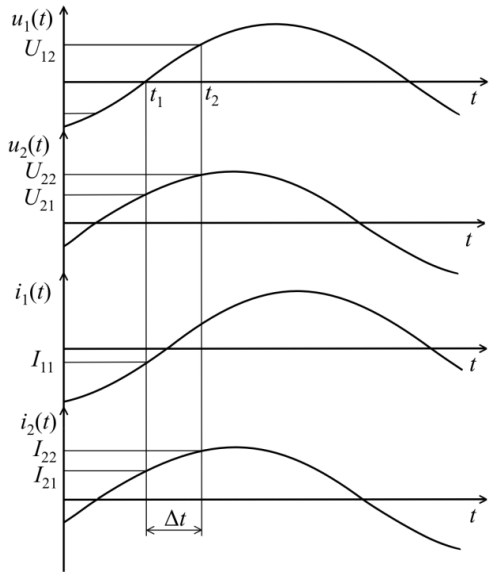


Рисунок 2 - Временные диаграммы, поясняющие метод *II-AC-EH*

Если сигналы напряжения и тока являются гармоническими, то входные и дополнительные напряжения и токи имеют вид:

$u_1(t) = U_m \sin\omega t$; $i_1(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$; $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha_1)$; $i_2(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi + \Delta\alpha_2)$,

где U_m, I_m - амплитудные значения сигналов напряжения и тока; ω - угловая частота входного сигнала; φ - угол сдвига фаз между входными сигналами напряжения и тока.

В момент времени t_1 перехода входного сигнала напряжения через ноль, мгновенные значения дополнительного напряжения, входного и дополнительного сигналов тока соответственно равны: $U_{21} = U_m \sin\Delta\alpha_1$; $I_{11} = I_m \sin\varphi$; $I_{21} = I_m \sin(\varphi + \Delta\alpha_2)$.

Через интервал времени Δt в момент времени t_2 мгновенные значения входного и дополнительного сигналов напряжения и второе мгновенное значение тока примут вид:

$U_{12} = U_m \sin\omega\Delta t$; $U_{22} = U_m \sin(\Delta\alpha_1 + \omega\Delta t)$; $I_{22} = I_m \sin(\varphi + \omega\Delta t + \Delta\alpha_2)$.

Используя мгновенные значения сигналов, можно получить выражения для определения основных ПГС:

- среднеквадратические значения напряжения и тока:

$$U_{CK3} = \frac{\left|U_{12}U_{22}U_{21}\right|}{\sqrt{2\left[4U_{22}^2U_{21}^2 - \left(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2\right)^2\right]}};$$

$$I_{CK3} = \sqrt{\frac{1}{2}\left\{I_{21}^2 + \frac{\left[2I_{22}U_{22}U_{21} - I_{21}\left(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2\right)\right]^2}{4U_{22}^2U_{21}^2 - \left(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2\right)^2}\right\}};$$

- активная и реактивная мощности:

$$P = \frac{\left|U_{12}U_{22}U_{21}\right|}{4U_{22}^2U_{21}^2 - \left(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2\right)^2}\left\{\left(I_{21}^2 - I_{11}^2\right)\left[4U_{22}^2U_{21}^2 - \left(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2\right)^2\right] + \right.$$

$$\left. + \left[2I_{22}U_{22}U_{21} - I_{21}\left(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2\right)\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}};$$

$$Q = \frac{I_{11}\left|U_{12}U_{22}U_{21}\right|}{2\sqrt{\left[4U_{22}^2U_{21}^2 - \left(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2\right)^2\right]}}.$$

В качестве примера методов, основанных на формировании двух дополнительных сигналов, рассмотрим метод *II-AD-GJ*, представляющий шестую группу. Метод заключается в том, что формируют первый и второй дополнительные сигналы напряжения, сдвинутые относительно входного по фазе на углы $\Delta\alpha$ и $2\Delta\alpha$ соответственно. В момент перехода второго дополнительного сигнала напряжения через ноль измеряют первые мгновенные значения входного напряжения и тока. В момент перехода первого дополнительного сигнала напряжения через ноль измеряют вторые мгновенные значения входного напряжения и тока. ПГС определяют по измеренным мгновенным значениям сигналов входного напряжения и тока [4].

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рисунке 3.

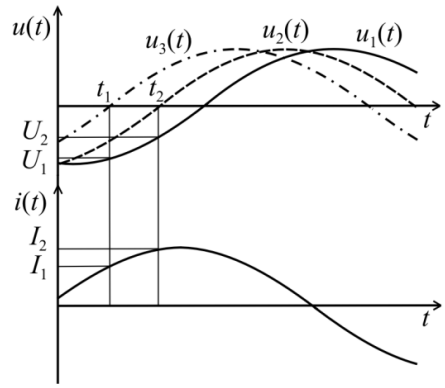


Рисунок 3 - Временные диаграммы, поясняющие метод *II-AD-GJ*

Для входных гармонических сигналов напряжения $u_1(t) = U_m \sin\omega t$ и тока $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ дополнительные сигналы напряжения имеют вид: $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha)$, $u_3(t) = U_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha)$.

В момент времени t_1, когда второй дополнительный сигнал напряжения переходит через ноль из отрицательной полуволны в положительную, мгновенные значения входного напряжения и тока равны: $U_1 = U_m \sin(-2\Delta\alpha)$ и $I_1 = I_m \sin(\varphi - 2\Delta\alpha)$.

В момент времени t_2, когда первый дополнительный сигнал напряжения переходит через ноль из отрицательной полуволны в положительную, мгновенные значения входного напряжения и тока принимают следующий вид: $U_2 = U_m \sin(-\Delta\alpha)$ и $I_2 = I_m \sin(\varphi - \Delta\alpha)$.

В этом случае выражения для определения основных ПГС будут равны:

- среднеквадратические значения напряжения и тока

$$U_{СКЗ} = \frac{\sqrt{2}U_2^2}{\sqrt{4U_2^2 - U_1^2}};\ I_{СКЗ} = \sqrt{\frac{1}{2}\left[I_2^2 + \frac{(2I_1U_2 - I_2U_1)^2}{4U_2^2 - U_1^2}\right]};$$

- активная и реактивная мощности

$$P = \frac{U_2\left[(I_2U_1 - I_1U_2)U_1 - 2U_2^2I_2\right]}{4U_2^2 - U_1^2};\ Q = \frac{(I_2U_1 - I_1U_2)U_2}{\sqrt{4U_2^2 - U_1^2}}.$$

Заключение

Предложенная классификация методов измерения параметров гармонических сигналов на основе формирования дополнительных сигналов позволяет синтезировать новые методы и средства определения ПГС.

Основным недостатком методов и средств измерения, в которых используются ортогональные составляющие сигналов, является частотная погрешность фазосдвигающих блоков (ФСБ), используемых для формирования дополнительных сигналов. Это приводит к тому, что при изменении частоты входного сигнала угол сдвига может отличаться от 90°. Использование дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных на произвольный угол, исключает данный вид погрешности.

Реализации большинства методов измерения ПГС на основе формирования дополнительных сигналов присуща погрешность по модулю ФСБ, в результате которой амплитудные значения входного и дополнительного сигналов отличаются друг от друга.

Однако разработанный авторами метод *II-AD-GJ* устраняет данный вид погрешности, поскольку при его реализации не используются мгновенные значения дополнительных сигналов.

Список литературы

[1] Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Рудаков Д.В. Синтез аппроксмационных методов и систем оперативного анализа периодических сигналов на основе сравнения мгновенных значений, распределенных в пространтве // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV междунар. конф. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2013. – С. 670-675.

[2] Мелентьев В.С., Батищев В.И. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 240 с.

[3] Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Анализ погрешности метода измерения интегральных характеристик, обусловленной отклонением формы сигнала от гармонической модели // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физико-математические науки. - 2013. - № 2 (31). - С. 80-84.

[4] Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Метод измерения параметров гармонических сигналов на основе использования характерных точек дополнительных сигналов напряжения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. - №4(6). – С. 16-22.

МЕТОД СГЛАЖИВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА В ПЬЕЗОГИРОСКОПЕ

Ю.О. Растегаев

Институт проблем точной механики и управления РАН
410028, г.Саратов, ул.Рабочая, 24, Россия
iptmuran@san.ru
тел. (845-2)22-23-76, (845-2)22-23-75, тел./факс (845-2)22-23-40

Ключевые слова: *пъезогироскоп, метод тепловых балансов, метод шунтов*

Abstract
The article describes the method of reducing temperature gradient inside the pezogiroskop. It discusses the design features which are necessary for implementation of described method. The assessment of efficiency is made.

Введение

Изменение температуры оказывает значительное влияние на функционирование микромеханического пьезогироскопа [1]. При возникновении большого градиента температур внутри корпуса прибора могут изменяться как физические свойства материалов, так и линейные размеры самих деталей [2], что оказывает сильное влияние на точность выходного сигнала, методы его обработки и корректировки. Ранее были установлены значительные перепады температур в теле пъезогироскопа при перемещении прибора в среду с температурой значительно отличающейся от первоначальной. Для смягчения данных негативных эффектов было предложено использовать метод шунтов для более равномерного распределения тепла в теле прибора.

1 Математическая модель

Моделировалась следующая конфигурация прибора [3-4] и внешние условия. Прибор состоит из металлического корпуса, присоединенной массы *M*, двух пьезопластинок $П_1$ и $П_2$, элемента, моделирующего внутренний источник тепла H и системы медных шунтов N (Рисунок 1). Весь корпус тепло-изолирован, кроме небольшого участка *F* на одной из стенок, через который происходит теплообмен с окружающей средой. Внешние условия моделируют перемещение прибора из среды с температурой 0°C в среду с температурой +60°C.

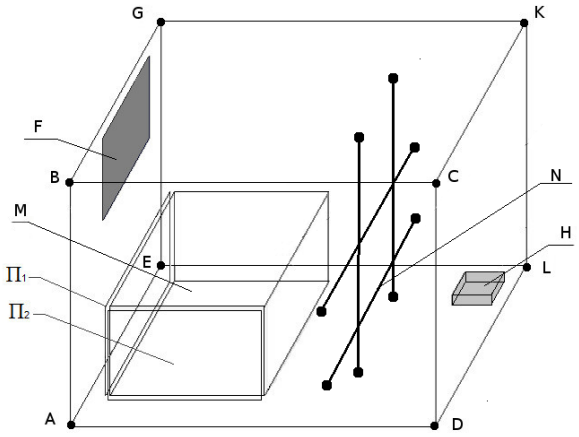


Рисунок 1 - Схема пъезогироскопа

Каждый элемент конструкции (ЭК) разбивался на элементы разбиения (ЭР). Индексы *L,R, BK, F, Top, B* обозначают относительное положение соседних элементов разбиения по отношению к рассматриваемому: *L(Left)*-элемент слева от текущего, *R(Right)* – справа, *BK(BacK)* – сзади, *F(Front)*- спереди, *Top* – сверху от текущего, *B(Bottom)* – снизу от текущего.

Расчет трехмерного нестационарного температурного поля прибора производился по методу теплового баланса [5], по явной разностной схеме и использовалось следующее соотношение:

$$T^{i+1} = T^i + Дt\frac{2}{cC_yV_0h}(\frac{S_0}{h}K(K_L\frac{T_L^i - T^i}{K+K_L} + K_R\frac{T_R^i - T^i}{K+K_R} + K_{BK}\frac{T_{BK}^i - T^i}{K+K_{BK}} +$$

$$K_F\frac{T_F^i - T^i}{K+K_F} + K_{Top}\frac{T_{Top}^i - T^i}{K+K_{Top}} + K_B\frac{T_B^i - T^i}{K+K_B}) + B_0)$$

Здесь $T^i = T(t_i)$, Δt – шаг счета по времени. K – теплопроводность соответствующего элемента, ρ - плотность, V_0 – объем ЭР, S_0- площадь ЭР, h - толщина ЭР, C_v – теплоемкость текущего ЭР, T - температура, B_0 - мощность внутреннего источника тепла. Исследования проводились с помощью разработанного для этой цели программного комплекса *PiezoGiroskope Temprature Field Calculater 1.1*.

2 Результаты расчетов

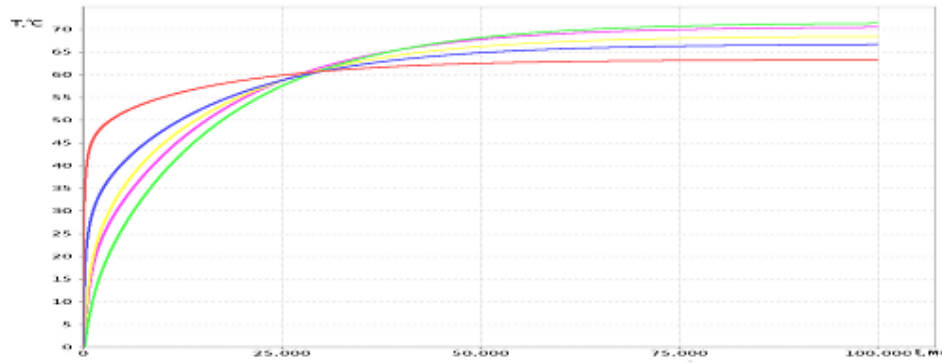


Рисунок 2 - График выхода на стационарный режим стенки ABGE корпуса

Ниже представлены графики, показывающие установление стационарного температурного поля пьезогироскопа с учетом использования системы теплопроводящих шунтов. Показаны графики выхода на стационарный режим во всех частях прибора.

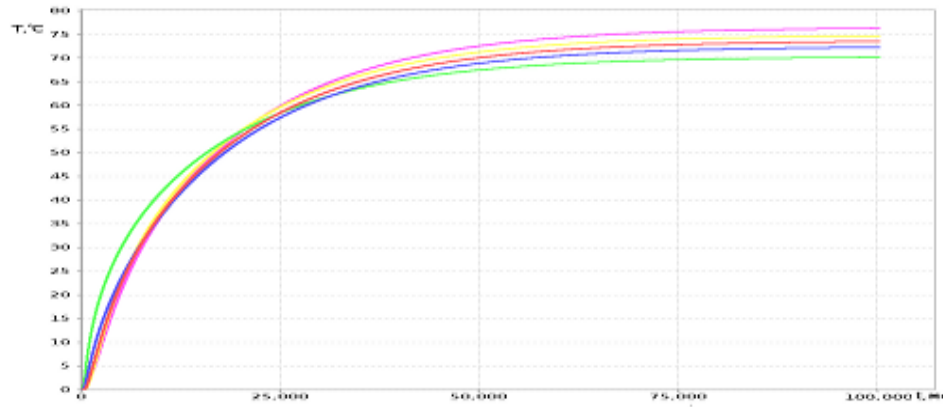


Рисунок 3 - График выхода на стационарный режим стенки ABCD корпуса

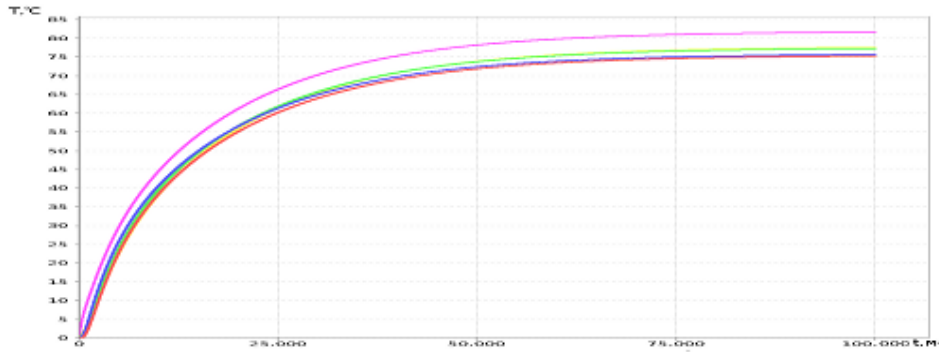


Рисунок 4 - График выхода на стационарный режим стенки DCKL корпуса

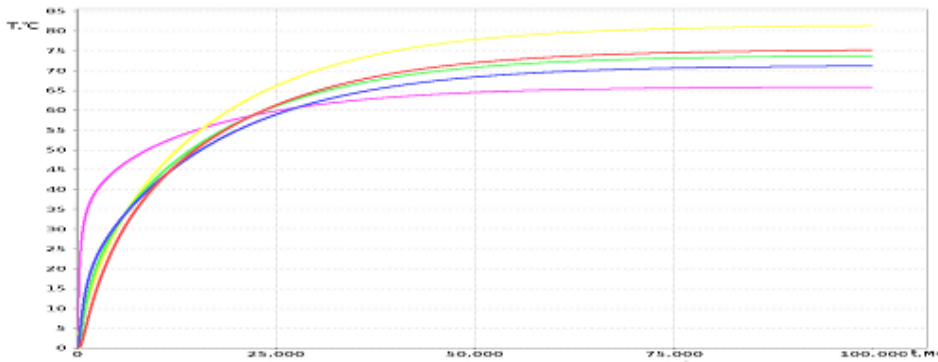


Рисунок 5 - График выхода на стационарный режим стенки LKGE корпуса

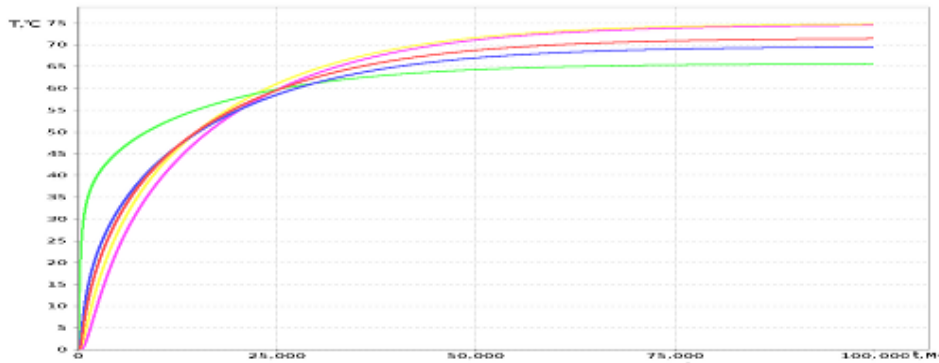


Рисунок 6 - График выхода на стационарный режим крышки BCKG корпуса

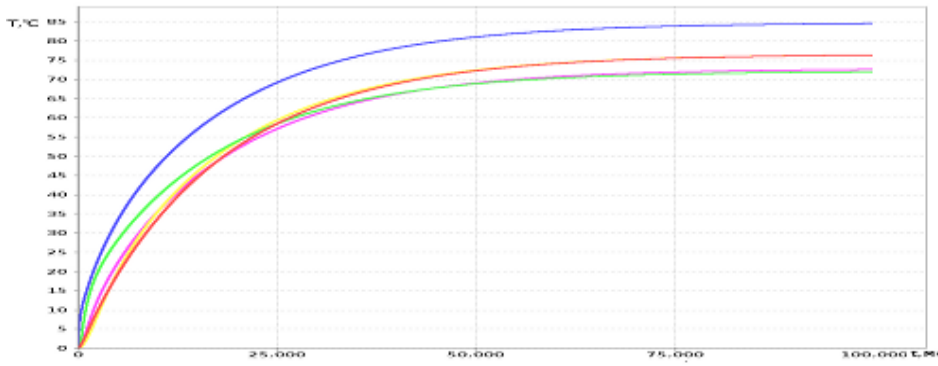


Рисунок 7 - График выхода на стационарный режим дна ADLE корпуса

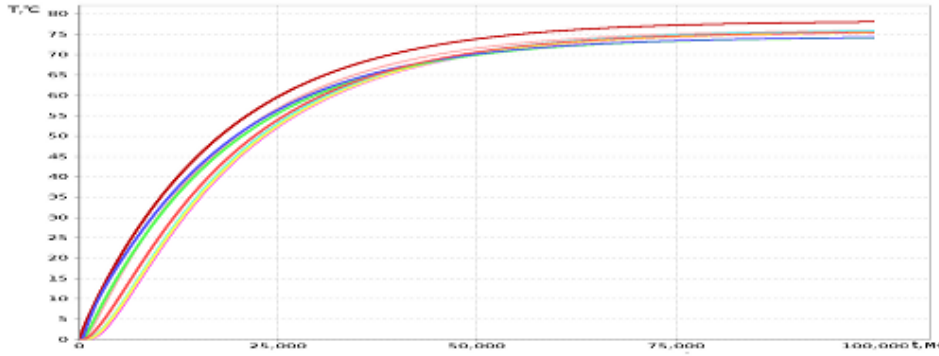


Рисунок 8 - График выхода на стационарный режим присоединенной массы

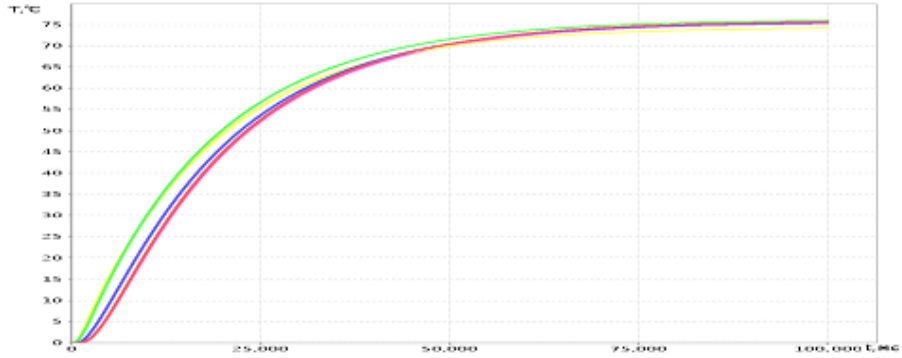


Рисунок 9 - График выхода на стационарный режим первой пьезопластины

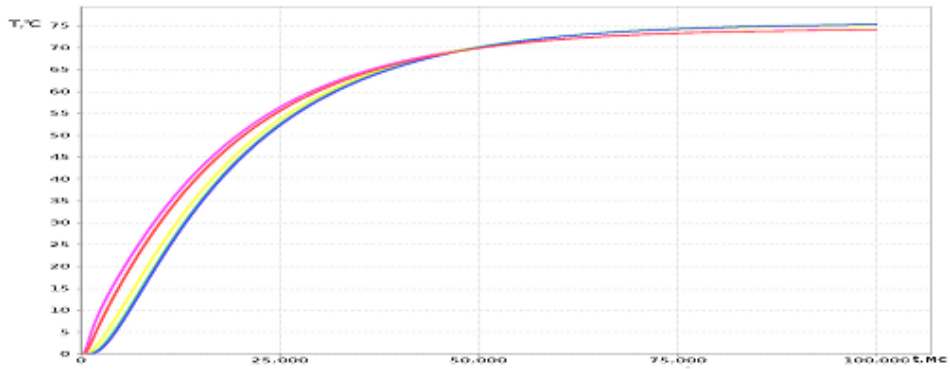


Рисунок 10 - График выхода на стационарный режим второй пьезопластины

3 Анализ приведенных результатов

Данное исследование преследовало своей целью изучение влияния использования метода теплопроводящих шунтов в пъезогироскопе и установление снижения негативных эффектов, порождаемых резким перепадом температуры внешней среды.

Установка в корпусе пъезогироскопа медных шунтов, с высокой теплопроводностью позволило снизить максимальную температуру элементов корпуса на 6-10^{o}C. Шунты N (Рисунок 1) располагаются в правой части корпуса прибора между присоединенной массой и внутренним источником тепла и соединяют противоположенные стенки корпуса пъезогироскопа. Снижение температуры пьезопластин достигло 5^{o}C, что является существенным значением для микромеханических пьзогироскопов. Температура присоединенной массы уменьшилась на 6-7 ^{o}C.

Далее приведены результаты сравнения роста температур в следующих парах элементов конструкции: стенки корпуса *ABGE* и *DCKL*, стенки корпуса *ABCD* и *LKGE*, верх и дно прибора и две пъезопластины. На каждом элементе конструкции брались 4 точки на краях элемента и одна точка в центре и строились графики модуля разницы температур в аналогичных точках сравниваемых элементов.

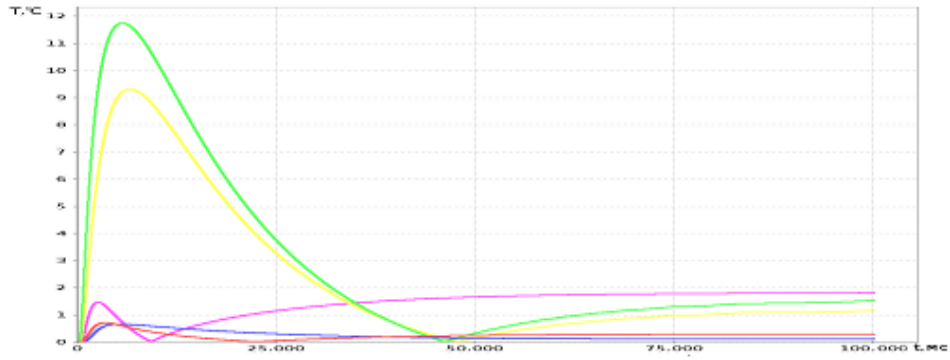


Рисунок 11 - Сравнительный график верха и дна корпуса пьезогироскопа

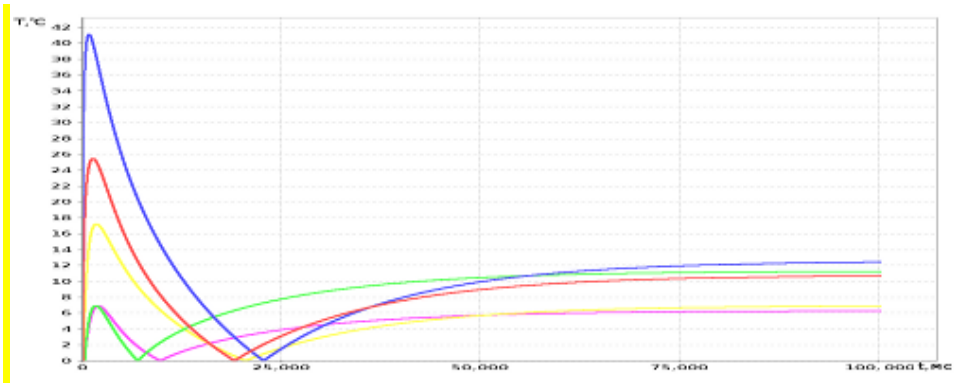


Рисунок 12 - Сравнительный график стенок ABGE и DCKL корпуса

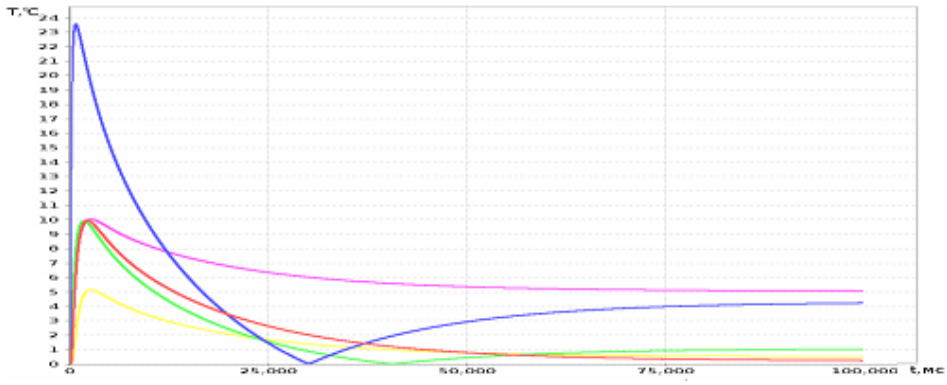


Рисунок 13 - Сравнительный график стенок ABCD и LKGE корпуса

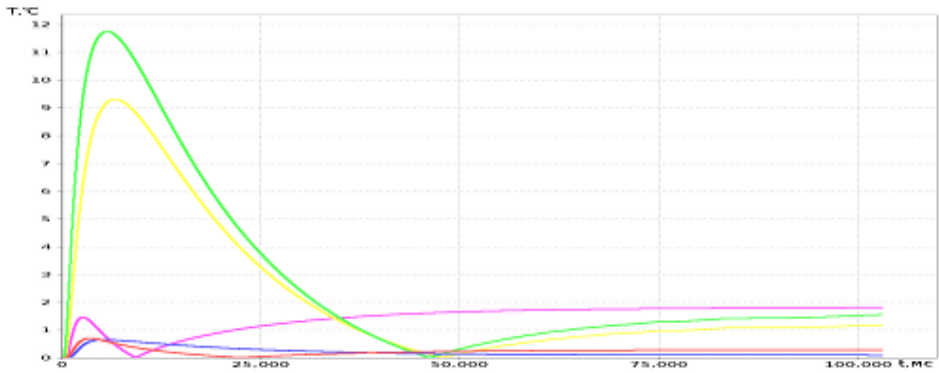


Рисунок 14 - Сравнительный график пьезопластин

Заключение

Как видно из Рис.11, Рис.12 Рис.13 разница температур противоположных стенок корпуса пьезогироскопа заметно снизилась. Особенно существенное снижение произошло для крышки и дна прибора и стенок ABGE и DCKL: для первой пары сравниваемых элементов конструкции разница температур снизилась в 6 раз, для второй почти в 2 раза. Для пьезопластин разницы температур уменьшилась в 1.5 раза, что является ключевым фактором для нормального функционирования прибора, повышения его отказоустойчивости и увеличения величины выходного сигнала.

Список литературы

[1] Распопов В. Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. // М.: Машиностроение, 2007. - 400с., ил.

[2] Растегаев Ю.О. Влияние геометрических параметров на величину выходного сигнала пьезогироскопа // Сборник научных трудов «Математика. Механика» Изд. СГУ 2011г. С.173-175

[3] В.Ю.Ольшанский, И.Ф.Абитова, Ю.Н.Нагар, А.В.Серебряков Об одной модели датчика инерциальной информации // Вестник Нижегородского университета. - 2011, №4 часть 2. -С. 260-261.

[4] В.М.Панкратов, В.Ю.Ольшанский, Ю.Н.Нагар, А.В.Серебряков Влияние диссипации на характеристики измерителя угловой скорости на основе взаимного пьезоэффекта // Авиакосмическое приборостроение. - 2010, №8. - С. 3-8.

[5] В.Э.Джашитов, В.М.Панкратов Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий // СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2005.- 404 с.

О ДИАГНОСТИКЕ ДИОДНЫХ МАТРИЦ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В.И. Орлов[1], В.В. Федосов[1], Е.А. Чжан[2]

[1]ОАО «Испытательный технический центра – НПО ПМ»
662970, Красноярский край, ЗАТО Железногорск, Железногорск, ул. Молодежная, 20, Россия

[2]Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнёва
660014, Красноярск, проспект им. газеты Красноярский Рабочий, 31, Россия
ekach@list.ru

Ключевые слова: *электрорадиоизделие, диагностика, группировка, задача распознавания, диодная матрица, космический аппарат*

Abstract
The results of electronic component diagnostic task based on nondestructive testing are considered. Some results of processing test results of the diode arrangements are given.

Введение

Современные космические аппараты состоят из 100 – 200 тыс. изделий электронной компонентной базы – это различные транзисторы, диоды, диодные матрицы и др. При поломке одного из них выходит из строя весь космический аппарат. При диагностике электрорадиоизделий (ЭРИ) необходимо учитывать область их применения: космическое или наземное. При использовании ЭРИ в астродатчиках и гироскопах, бортовых компьютерах и т. д. особо важно дать точную оценку их надежности, т. к. нет возможности осуществить замену или ремонт во время эксплуатации, поэтому задача определения качества, соответственно и срока службы изделия, важна и актуальна на сегодняшний день [1].

В большинстве случаев отказ ЭРИ происходит под воздействием напряжения при максимально возможной температуре, поэтому тестировать изделия необходимо в схожих условиях. Испытания электротермотренировки (ЭТТ)[1] являются эффективным средством выявления дефектов ЭРИ.

1 Диодные матрицы

В качестве примера диагностики ЭРИ рассмотрим результаты дополнительных отбраковочных испытаний (ЭТТ) диодных матриц 2ДС627А.

Диодные матрицы 2ДС627А состоят из восьми кремниевых, эпитаксиально-планарных диодов, с раздельными выводами. Матрицы предназначены для использования в коммутаторах тока и других импульсных схемах, аппаратуре специального назначения.

В ходе испытаний ЭТТ измерялись такие показатели, как постоянное прямое напряжение в одном режиме (* в табл. 1) и прямая вольтамперная характеристика в 8 разных режимах (табл. 1) пояснение в тексте режимов. С учетом того, что каждая матрица состоит из 8 диодов, то измерение каждой характеристики осуществлялось 8 раз, т.е. для каждого диода, соответственно имеется 72 измерения для двух характеристик.

[1] ЭТТ – испытание воздействием температуры в сочетании с электрической нагрузкой, проводимое с целью выявить изделия со скрытыми дефектами [2].

Таблица 1 – Режимы измерения характеристик

Контролируемые параметры	№ режима	Режимы измерения	Нормы контролируемых параметров		Обозначение переменных
			не менее	не более	
Постоянное прямое напряжение	*	200 мА	0.85 В	1.15 В	$x_1, x_2, ..., x_8$
Прямая вольтамперная характеристика	1	100 нА	100 мВ	250 мВ	$x_9, x_{10}, ..., x_{16}$
	2	1 мкА	200 мВ	350 мВ	$x_{17}, x_{18}, ..., x_{24}$
	3	10 мкА	300 мВ	450 мВ	$x_{25}, x_{26}, ..., x_{32}$
	4	100 мкА	400 мВ	550 мВ	$x_{33}, x_{34}, ..., x_{40}$
	5	1 мА	500 мВ	650 мВ	$x_{41}, x_{42}, ..., x_{48}$
	6	10 мА	650 мВ	750 мВ	$x_{49}, x_{50}, ..., x_{56}$
	7	100 мА	800 мВ	1.00 В	$x_{57}, x_{58}, ..., x_{64}$
	8	200 мА	850 мВ	1.15 В	$x_{65}, x_{66}, ..., x_{72}$

Стоит задача разделения множества диодных матриц на группы по результатам измерения характеристик «до ЭТТ» и «после ЭТТ». Каждая переменная – это результаты измерения определенного параметра в заданном режиме. Необходимо отметить тот факт, что согласно техническим условиям дР3.454.000 ТУ все матрицы являются годными.

2 Непараметрические оценки функции регрессии и плотности распределения вероятности

Пусть $\left\{u_i, x_i, i = \overline{1,s}\right\}$ – выборка из s статистически независимых наблюдений многомерной случайной величины $\left(U^j, X\right), j = \overline{1,m}$. На первом этапе для восстановления $x(u) \forall u \in \Omega(u)$, где $\Omega(u)$ – область определения случайной величины U, примем статистику:

$$(1) \quad x_s(u) = \sum_{i=1}^{s} x_i \prod_{j=1}^{m} \Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right) \Big/ \prod_{j=1}^{m} \Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right),$$

где s – объем выборки, c_s – параметр размытости ядра, $\Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right)$ – колоколообразная функция.

Параметры размытости ядра и колоколообразная функция удовлетворяют следующим условиям сходимости [3]:

$$(2)\quad \begin{array}{ll} c_s > 0; & \lim\limits_{s\to\infty} c_s = 0; \\ \Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right) \geq 0; & c_s^{-1}\int\limits_{\Omega(u)} \Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right) du^j = 1; \\ \lim\limits_{s\to\infty} s c_s^m = \infty; & \lim\limits_{s\to\infty} c_s^{-1}\Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right) = \delta\left(u^j - u_i^j\right). \end{array} .$$

$U = u^j, j = \overline{1,m}$ – векторная случайная величина, поэтому для каждой компоненты вектора U необходимо найти свое значение параметра c_s. Если привести все значения u^j к одному интервалу с помощью операций центрирования и нормирования, то вместо вектора c_s можно использовать скаляр.

В качестве колоколообразной функции $\Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right)$ может быть использовано параболическое ядро:

$$(1)\quad \Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right) = \begin{cases} 0.75\left(1 - \left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right)^2\right), \text{если } \left|c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right| \leq 1, \\ 0, \text{если } \left|c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right| > 1. \end{cases}$$

О качестве полученной модели (1) будем судить по ошибке аппроксимации:

$$(2)\quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{s}\left(x_s^i - x^i\right)^2}{\sum\limits_{i=1}^{s}\left(x^i - \hat{m}_x\right)^2}},$$

где $\hat{m}_x$ – оценка математического ожидания.

В данном случае, как и в большинстве практических задач, нет априорной информации о наличии зависимостей между характеристиками, ее структуре. Использование непараметрических оценок позволяет избежать этапа выбора параметрической структуры зависимостей, что на предварительном этапе значительно сократит время вычислений [4].

В большинстве практических задач плотность распределения случайной величины неизвестна, поэтому будем ее оценивать с помощью средств непараметрической статистики:

$$(3)\quad p(x) = \frac{1}{s c_s^m}\sum_{i=1}^{s}\Phi\left(\frac{x - x_i}{c_s}\right)\prod_{j=1}^{m}\Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right),$$

где параметр размытости ядра c_s и колоколообразные функции $\Phi\left(c_s^{-1}\left(x - x_i\right)\right)$, $\Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right)$ удовлетворяют условиям сходимости (2).

3 Предобработка результатов испытаний ЭТТ для диодных матриц 2ДС627А

Проводилось исследование результатов измерения характеристик до и после испытаний ЭТТ партии диодных матриц 2ДС627А объемом s = 150. Матрица состоит из 8 диодов, для каждого диода измеряются следующие переменные: постоянное прямое напряжение в одном режиме и прямая вольтамперная характеристика в 8 режимах (табл. 1). Таким образом, диодная матрица характеризуется 72 переменными.

На предварительном этапе оценивалось наличие линейных зависимостей между переменными с помощью подсчета коэффициента корреляции. Рассмотрим результаты, полученные для характеристик, измеренных до ЭТТ. Между некоторыми переменными была обнаружена тесная линейная зависимость, так, например, коэффициент корреляции, посчитанный попарно

для переменных $x_1, x_2, ..., x_8$ (постоянное прямое напряжение, измеренное для каждого диода матрицы) практически равны единицы. Характеристики $x_1, x_2, ..., x_8$ – это измерения, производимые согласно требованиям ГОСТ, нормы контролируемых параметров в этом случае имеют большой интервал (0,3 В). При таких широких границах интервала значения допустимых параметров можно выявить только бракованные изделия, для выявления потенциально ненадежных изделий вводят ужесточенные режимы, границы интервала нормы сужены и оставляют 150 мВ. Ужесточенный контроль – это оставшиеся 8 режимов. Если рассматривать результаты измерения прямой вольтамперной характеристики (режим №1), то здесь наблюдается тенденция, характерная для всех остальных режимов. Коэффициенты корреляции между измерениями для первых 5 диодов (переменные $x_9, x_{10}, ..., x_{13}$) лежат в диапазоне [0,9;0,98], т.е. данные переменные линейно зависимы, между переменными x_{14}, x_{15}, x_{16} (измерения для следующих 3 диодов) также обнаружена линейная зависимость. Однако переменные $x_9, x_{10}, ..., x_{13}$ и x_{14}, x_{15}, x_{16} между собой линейно независимы, значения коэффициента корреляции не превосходят 0,3.

Коэффициенты корреляции также были посчитаны между значениями одной переменной, полученными до и после ЭТТ. В данном случае, они были близки к единице для значений прямой вольтамперной характеристики (переменные $x_{14} - x_{16}$, $x_{22} - x_{24}$, $x_{30} - x_{32}$, $x_{38} - x_{40}$, $x_{46} - x_{48}$, $x_{54} - x_{56}$, $x_{62} - x_{64}$, $x_{70} - x_{72}$) диодов №6 – 8, это говорит о том, что данные диоды устойчивы к испытаниям ЭТТ. Однако для переменных $x_9 - x_{13}$, $x_{17} - x_{21}$, $x_{25} - x_{29}$, $x_{33} - x_{37}$ $x_{41} - x_{45}$, $x_{49} - x_{53}$, $x_{57} - x_{61}$, $x_{65} - x_{69}$ (диоды №1 – 5) коэффициенты корреляции не превышают значения 0,25. Это может говорить об их низком качестве. Диоды матрицы имеют разные характеристики, это может быть вызвано различной топологией. Так диоды №1-5 каждой матрицы можно отнести к одной группе, а диоды №6-8 – к другой.

Коэффициент корреляции показывает наличие только линейных зависимостей. В целях выявления нелинейных зависимостей между переменными восстанавливалась непараметрическая оценка регрессии (2). О качестве восстановления будем судить по относительной ошибке аппроксимации (2). Чем сильнее выражена зависимость, тем меньше будет относительная ошибка аппроксимации (2). Очевидно, если коэффициент корреляции близок к 1, то ошибка будет близка к 0. Так, например, коэффициент корреляции между переменными 72 и 8 (прямая вольтамперная характеристика, режим 8 и постоянное прямое напряжение для диода №8) равен 0,991, ошибка $\sigma = 0{,}073$. При этом наличие нелинейных зависимостей обнаружено не было. Возможно, что зависимости имеют более сложный вид, где функция зависит уже не от одной переменной, а от нескольких.

Как уже говорилось выше, диодная матрица состоит из 8 диодов – неисправность одного из них приводит к выведению из строя всего ЭРИ. Если разность результатов тестов до и после ЭТТ (дрейф) для диода имеет небольшое значение, коэффициент корреляции для таких тестов близко к единице, то можно сказать, что диод устойчив. В рассматриваемом случае 5 из 8 диодов одной матрицы не были устойчивы к испытаниям ЭТТ в отличие от оставшихся 3 диодов этой же матрицы. Возникает задача кластеризации диодов, в этом случае объем выборки увеличивается в 8 раз, а размерность показателей уменьшается в 8 раз. Задачи с постановкой такого рода могут представлять интерес для производителей диодов с целью повышения их качества. Однако стоит задача группировки диодных матриц, которые характеризуются 72 показателями, а не отдельных диодов [5].

4 Результаты решения задачи распознавания образов при диагностике диодных матриц

Итак, необходимо выделить классы среди диодных матриц по результатам измерения 72 переменных, объем выборки s = 150. Первый рассматриваемый метод кластеризации – иерархический. Данный метод работает неадекватно в условиях большой размерности показателей. Следующий реализованный метод – k-средних. В этом случае необходимо задать число классов. Однако нет такой априорной информации. На предварительном этапе обработки результатов измерений были построены гистограммы значений переменных (рис. 1). На рис. 1 по оси абсцисс отложены значения переменной №45 до ЭТТ, ординат – частота попадания точек в подынтервал, число подынтервалов 10. Гистограмма показана синими столбиками, красным цветом – плотность распределения, полученная с помощью оценки (5).

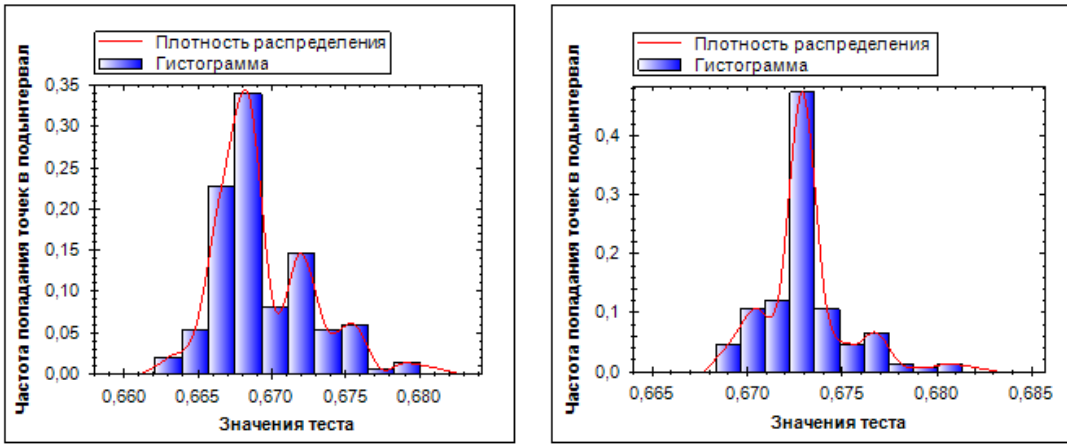
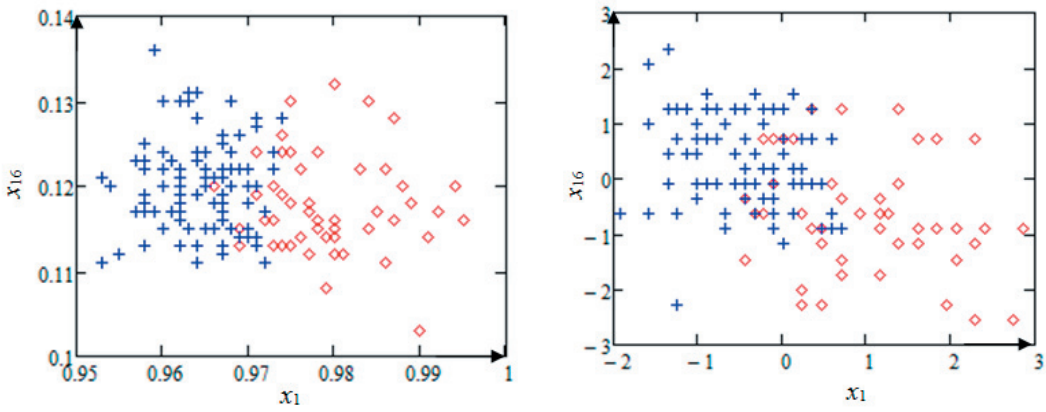


Рисунок 1 – Гистограмма значений теста №45 до и после ЭТТ

Большинство гистограмм двумодальны, сделаем предположение, что существует 2 класса. Результаты кластеризации методом k-средних данных, полученных до ЭТТ: к первому кластеру было отнесено 53 изделия, ко второму – 97.

Особенность алгоритма кластеризации k-средних состоит в том, что каждый элемент выборки будет отнесен к какому-либо кластеру. При этом максимальная разность между центрами кластеров составляет 0,015 (по переменной x_{16} – прямая вольтамперная характеристика, режим №1, диод №8), однако рассматривая срез по переменным x_{16} и x_1 (рис. 2а), можно заметить, что кластеры выражены нечетко и пересекаются. На рис. 3а и 3б по оси x отложены значения переменной x_1 (постоянное прямое напряжение для диода №1), по оси y – переменной x_{16} (прямая вольтамперная характеристика, режим №1, диод №1).

Такие срезы не дают объективной картины о наличии или отсутствии групп, т.к. размерность пространства высока и нет возможности отобразить все срезы.



а) б)

Рисунок 2 – Срез по переменным x_{16} и x_1: а) до ЭТТ, б) после ЭТТ

В результате кластеризации наблюдений, полученных после испытаний ЭТТ, получилось, что наблюдения были разделены на следующие группы: 50 в одной группе и 100 в другой. Данные до и после ЭТТ имеют небольшое различие, срезы выглядят аналогичным образом (рис. 2б).

Заключение

Проведенные исследования показали, что диоды матрицы имеют различные характеристики, причем некоторые характеристики изменились после проведения ЭТТ. В каждой матрице можно выделить две группы диодов: в первую группу входят диоды №1 – 5, во вторую – диоды №6 – 8. Показатели диодов в каждой группе коррелированны между собой. Диоды второй группы устойчивы к ЭТТ в отличие от диодов первой группы. Наличие же нелинейных зависимостей обнаружено не было: переменные связаны или линейно (коэффициент корреляции близок к 1, график по этим переменным можно аппроксимировать прямой) или связаны вообще (коэффициент корреляции мал при большом значении ошибки аппроксимации, график по таким переменным представляет собой некоторое «облако»).

Благодарности

Выражаем признательность научным руководителям д.т.н. Медведеву А.В. и к.т.н. Сергеевой Н.А. за профессиональную помощь, оказанную при проведении данного исследования.

Список литературы

[1] Данилин Н.С., Нуров Ю.Л. Диагностика и контроль качества изделий цифровой микроэлектроники. М.: изд-во стандартов, 1990. 176с.
[2] ГОСТ Р 53711- 2009. Изделия электронной техники. Правила приемки / Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. – Москва: Стандартинформ, 2010.
[3] Медведев А.В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск: Наука, 1983. 174 с.
[4] Цыпкин Я.З. Основы теории обучающихся систем. М: Наука, 1970. 252 с.
[5] Орлов В.И., Сергеева Н.А. О непараметрической диагностике и управлении процессом изготовления электрорадиоизделий // Вестник Сибирского Государственного Аэрокосмического Университета Им. Академика М.Ф. Решетнева. 2013. № 2 (48). С. 70-75.

Author index

Индекс авторов

А

Анцыферов С.С., 668

Б

Балабаев С.Л., 674

Банникова А.В., 522, 529

Баранович А.Е., 143

Батищев В.И., 154, 679

Бежаева О.Я., 196

Белоконь С.А., 536

Белопухов В.Н., 683

Белоусов А.А., 160

Боргест Н.М., 167

Боровик С.Ю., 683, 688, 693, 698

Боровский А.С., 175

В

Вакурина Т.Г., 435

Ванин А.В., 52

Василенко А.А., 464

Васильева П.Н., 444

Виноградов И.Д., 182

Виттих В.А. , 13, 305, 308

Волков И.И., 679

Волынская А.В., 541

Воронов Е.М., 52

Воротницкий С.С., 550

Вохминцев А.В., 190

Вылегжанин А.С., 245

Г

Гвоздев В.Е., 196, 204

Герасимов Б.Н., 316

Герасимова И.Б., 330

Глущенко А.И., 68

Губанов Н.Г., 154

Гусев В.Б., 323

Гучук В.В., 705

Д

Давыдов А.Н., 408

Дегтярева И.В., 337

Дилигенская А.Н., 61

Донсков А.В., 453

Дьяконов А.И. 95

Е

Еременко Ю.И., 68

Ефтонова Т.А., 337

Ж

Жиляев А.А., 506, 513

Жмудь В.А., 558

З

Заворин А.Н., 558

Закиева Е.Ш., 352

Засов В.А., 711
Золин А.Г., 679
Золотухин Ю.Н., 536
И
Иванов А.Б., 506, 513
Иванов Д.Я., 569
Иванов Ю.М., 718
Ильясов Б.Г., 330, 337, 352, 575
К
Казанская Д.Н., 245, 262
Карпунин А.А., 52
Кацурин А.А., 581
Келдибаев Б.К., 167
Колоденкова А.Е., 587
Коплярова Н.В., 75, 213
Корнеева А.А., 522, 529
Корнет М. Е., 522, 529
Корнилова Т.А., 674
Коршиков Д.Н., 435, 480
Котов А.Г., 444
Котов К.Ю., 536, 593
Кошелева М.С., 654
Кравцов С.В., 622
Крыжановский Г.А., 358
Кузнецов Н.А., 160
Купин В.В., 358
Куприн А.Г., 358, 598
Кутейникова М.М., 688, 693, 698
Л
Лазарев Ю.Н., 605
Лада А.Н., 253
Лапицкая М.Х., 81
Лахин О.И., 435, 480
Левин И.С., 86
Лейтао П., 262
Лившиц М.Ю., 408
Лозовская Е.Г., 674
Любимов В.В., 464
М
Майоров И.В., 129, 270
Макарова Е.А., 337, 352
Малахова А.И., 204, 220
Мальцев А.С., 536, 593
Матюхин В.Г., 160
Матюшин М.М., 470, 480
Медведев А.В., 75, 598, 611
Мелентьев В.С., 718
Мельник Э.В., 569
Мельников А.В., 190
Меньшиков В.Ф., 20
Михов Е.Д., 611
Мишурова Н.В., 488
Моисеева Т.В., 308
Муратова В.В., 718
Мухамедрахимова Л.Н., 330

Н

Нестеров А.А., 536, 593

Нестеров А.Ю., 365

Никишов В.Ю., 500

Носкова А.И., 435, 480

О

Огурцов С.С., 480

Опейко О.Ф., 618

Орлов В.И., 213, 731

Офицеров В.П., 228

Очков Д.С., 129

П

Павлов Д.В., 495

Павлова Д.В., 245

Павлов О.В.,369

Пейсахович Д.Г., 253

Петров Д.С., 495

Плешивцева Ю.Э., 95

Подлипнов П.Е., 683

Полещенко Д.А., 68

Полукаров Д.Ю., 282

Попов А.В., 95

Пустовой И.А., 253

Р

Рапопорт Э.Я., 105

Растегаев Ю.О., 724

Ровнейко Н.И., 204

Рожкова И.А., 500

Румянцев К.Е., 622, 674

Русанов К.Е., 668

Рыбак Д.С., 253

С

Сабилов А.Р., 376

Сабитов И.И., 575

Саитова Г.А., 575

Сапожников И.В. 541

Секисов Ю.Н., 688, 693, 698

Сергеев С.Ф., 386

Сергеева Н.А., 213

Сетин С.П., 120

Симонова Е.В., 270, 435, 506, 513

Скобелев О.П., 688, 693, 698

Скобелев П.О., 160, 245, 253, 262, 270, 506, 513

Смирнов В.С., 228

Смирнов С.В., 167, 228

Соболев М.А., 536, 593

Степановская И.А., 394

Стуликова К.А., 282

Т

Тарчинская Е.Н., 376

Тимофеев А.И., 402

Травин В.С., 506, 513

Тумуров Э.Г., 628

Тюмиков Д.К., 635

Ф

Федосов В.В., 213, 731

Филимонов А.Б., 641

Филимонов В.А., 286

Филимонов Н.Б., 641

Филимонюк Л.Ю., 648

Филиппов М.Н., 536, 593

Х

Ханковский Д.Б., 143

Храмова О.И., 245

Ц

Цапенко М.В., 408

Царев А.В., 129, 270

Ч

Чекалов Л.Л., 416

Ченцов А.Г., 654

Черняховская Л.Р., 204

Чжан Е.А., 731

Чуваков А.В., 154

Ш

Шелехов В.И., 628

Шепилов Я.Ю., 245, 262

Шпаков В.М., 290

Ю

Юрыгина Ю.С., 435, 480

Я

Ян А.П., 536, 593

B

Baake E., 37

Bijl A.C., 29

K

Konstantinov M., 299

M

Madsen B., 129

N

Nacke B., 45

Niemann B., 45

Nikanorov A., 37

P

Pelova G., 299

R

Rzevski G., 3

S

Schlesselmann D., 45

Y

Yanev K., 299

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Научное издание

Труды XVI Международной конференции

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

30 июня - 03 июля 2014, Самара, Россия

Редакторы:

академик Е.А. Федосов

академик Н.А. Кузнецов

профессор В.А. Виттих

Proceedings of the XVI International Conference

COMPLEX SYSTEMS: CONTROL AND MODELING PROBLEMS

June 30 – July 03, 2014, Samara, Russia

Editors:

academician E.A. Fedosov

academician N.A. Kuznetsov

professor V.A. Vittikh

Подписано в печать 02.06.2014.
Формат 70x100/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Объем 61,42 усл. печ. л. Тираж 500 экз. Заказ № 781.

Отпечатано в типографии ООО «Офорт».
443080, г. Самара, ул. Революционная, 70, литера П.
Тел.: 372-00-56, 372-00-57, 931-98-59.
E-mail: ofort-samara@mail.ru.