*Памяти Евгения Дмитриевича Теряева посвящается*
*Dedicated to the memory of Evgeniy Dmitrievich Teryaev*

Российская академия наук
Самарский научный центр
Институт проблем управления сложными системами

**Труды XIV Международной конференции**

**Proceedings of the XIV International Conference**

# ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

# COMPLEX SYSTEMS: CONTROL AND MODELING PROBLEMS

19-22 июня 2012, Самара, Россия

June 19-22, 2012, 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 XIV Международной конференции* (19-22 июня 2012 г. Самара, Россия) / Под ред.: акад. ***Е.А. Федосова***, акад. ***Н.А. Кузнецова***, проф. ***В.А. Виттиха***. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. – 820 с. ISBN 978-5-93424-584-0

В предлагаемом сборнике содержатся труды XIV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», распределенные по следующим направлениям: оптимальное управление системами с распределёнными параметрами, ситуационное управление и системы поддержки коммуникативных действий, стратегическое управление в энергетике, модернизация управления региональным здравоохранением, информационно-измерительные и управляющие системы, мультиагентные системы и технологии.

ISBN 978-5-93424-584-0

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук, составление, оформление, 2012
© Все права принадлежат авторам публикуемых работ, 2012

10 февраля 2012 года на 78 году ушёл из жизни Евгений Дмитриевич Теряев, член–корреспондент Российской академии наук, видный ученый и крупный организатор науки в области автоматического и автоматизированного управления техническими и организационными системами, мехатроники и авионики.

Евгений Дмитриевич родился 14 декабря 1934 г. в восточном Узбекистане в г. Фергане. Закончив школу в 1952 г., он поступил в Московский авиационный институт (МАИ) им. С. Орджоникидзе (ныне национальный исследовательский университет) на факультет приборостроения и автоматики (ныне факультет систем управления, информатики и электроэнергетики) на знаменитую Щипановскую кафедру по системам автоматического управления летательными аппаратами (ныне кафедра систем автоматического и интеллектуального управления). В то время заведующим кафедрой был крупный ученый и выдающийся организатор отечественной науки профессор Б.Н. Петров.

Свою научную деятельность Евгений Дмитриевич начал еще в процессе обучения в МАИ под руководством ведущего профессора кафедры Федора Андреевича Михайлова - известного ученого, одного из создателей научных основ теории нестационарных детерминированных и стохастических автоматических систем.

В 1957 г. после успешного окончания вуза Е.Д. Теряев получает специальность инженера-электрика по авиаприборостроению и направляется на работу в ведущий в системе Министерства авиационной промышленности СССР институт по авиационному вооружению НИИ-2 (ныне ГосНИИАС - Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем). В эти годы под руководством д.т.н. В.А. Джапаридзе институт становится обладателем мощного парка ЭВМ, благодаря чему в институте, наряду с теоретическими исследованиями, закладываются основы полунатурного моделирования процессов функционирования авиационных систем вооружений (систем пушечного и бомбардировочного вооружения боевых самолетов). Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР институт становится ведущей организацией по научно-исследовательским работам в области создания управляемых

ракет. Именно эта проблематика становится центральной в научно-исследовательской деятельности Евгения Дмитриевича. Ему пришлось погрузиться в разработку систем управления ракетным вооружением (класса «воздух-воздух» и «воздух-поверхность») на основе достижений современной автоматики, методов математического и полунатурного моделирования.

В ГосНИИАСе Е.Д. Теряев прошел путь от техника до начальника отдела. При этом он постоянно поддерживал тесную связь с родной кафедрой в МАИ. В октябре 1966 г. он успешно защитил кандидатскую диссертацию на спецтему, связанную анализом и синтезом процессов самонаведения высокоманевренных беспилотных летательных аппаратов. Теоретическая часть диссертационной работы посвящена применению к данным процессам асимптотического метода исследования линейных нестационарных динамических систем, основанного на понятии обобщенного характеристического уравнения, введенного Ф.А. Михайловым.

С апреля 1968 г. Евгений Дмитриевич переходит работать в Академию наук (АН) СССР секретарем самого крупного по научному потенциалу Отделения Академии - Отделения механики и процессов управления. Руководителем данного Отделения (академиком-секретарем) был академик АН СССР Б.Н. Петров, председатель Совета «Интеркосмос», который в 1979 г. избран вице-президентом Академии наук. Именно Борис Николаевич Петров стал до последних дней своей жизни вторым научным руководителем Евгения Дмитриевича.

В 1970-е годы Б.Н. Петров организовал и возглавил Научный Совет АН СССР по проблемам управления движением и навигации, секретарем которого назначил Е.Д. Теряева. В эти годы Евгений Дмитриевич начал работать под руководством и при участии Бориса Николаевича над одной из центральных проблем современной теории и практики автоматического управления – проблемой построения адаптивных систем, позволяющих осуществлять эффективное управление сложными техническими объектами в условиях малой априорной информации о характеристиках управляемого объекта и внешней среды. Результатом многолетних исследований данной проблемы явилась успешная защита в январе 1981 г. докторской диссертации. В основу диссертационного исследования был положен новый принцип построения адаптивных цифровых систем управления, выдвинутый совместно с коллегами по МАИ Ю.А. Николаевым и Б.М. Шамриковым и названный принципом поэтапного адаптивного управления. В основу данного принципа положены следующие три признака построения адаптивных систем: разделение во времени этапов идентификации объекта и перестройки структуры и/или параметров цифрового регулятора; двухуровневая перестройка характеристик последнего по замкнутой и разомкнутой схемам адаптации; эпизодическая перестройка его характеристик.

В 1971 г. Е.Д. Теряеву присвоено ученое звание старшего научного сотрудника.

Евгений Дмитриевич придавал большое значение подготовке инженерных и научных кадров. Им подготовлено два доктора и пять кандидатов наук. Он внес немалый вклад в научную и преподавательскую деятельность в высшей школе. С 1981 г. он работал профессором на кафедре «Техническая кибернетика» (ныне кафедра проблем управления, руководимая академиком И.М. Макаровым), а с 1988 г. стал заведующим выпускающей кафедры «Автоматические системы» (бывшая кафедра системотехники, руководимая профессором О.А. Горяиновым) в МИРЭА (ныне МГТУ МИРЭА). В 1982 г. ему присвоено звание профессора.

В декабре 1987 г. Евгений Дмитриевич избирается членом-корреспондентом РАН по специальности «Процессы управления». С 1988 по 1991 гг. он становится заместителем по научно-организационным вопросам академика-секретаря Отделения проблем машиностроения, механики и процессов управления АН СССР, а в марте 1991 г. - заместителем Главного ученого секретаря Российской академии наук (РАН), академика РАН И.М. Макарова. В этой должности он проработал до 2002 г.

Без малого 45 лет жизни и научного творчества Евгения Дмитриевича прошли в Академии наук. Он внес огромный вклад в решение многочисленных организационных, научных и

технических проблем, связанных с преобразованием в 1990-е годы Академии наук СССР в Российскую академию наук и сохранением ее научного потенциала.

С 2002 г. до последних дней Е.Д. Теряев, будучи советником РАН, руководил лабораторией проблем управления сложными динамическими системами в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Основными направлениями исследований лаборатории были процессы управления в мехатронных и эргатических системах и их интеллектуализация.

В научной деятельности Е.Д. Теряева органично сочетались широта научных интересов и глубина проникновения в изучаемые проблемы, приверженность классическим традициям в науке и активная поддержка современных тенденций ее развития. Многочисленные труды Евгения Дмитриевича охватывают различные направления фундаментальных исследований, где им получены оригинальные и основополагающие результаты. В области теории нестационарных систем им были разработаны методы анализа и синтеза систем с переменными параметрами, а также методы исследования их устойчивости и точности. Им был проведен большой цикл исследований цифровых систем управления, в котором разработаны методы анализа и синтеза цифровых нестационарных систем управления, анализа процессов в адаптивных системах управления летательными аппаратами с бортовыми вычислительными машинами, развиты методы идентификации процессов в реальном масштабе времени и методология автоматизации проектирования таких систем. Весьма существенным является вклад Евгения Дмитриевича в теорию и практику проектирования систем управления летательными аппаратами, в становление и развитие отечественной мехатроники, исследования перспектив применения современных компьютерных технологий в задачах цифровой обработки информации. В последние годы под руководством Е.Д. Теряева активно проводились фундаментальные исследования в области интеллектуализации сложных технических систем. Результаты проведенных работ нашли отражение в ряде монографий и статей.

Е.Д. Теряев проводил большую работу по развитию и координации исследований в организациях РАН, являясь членом редколлегий ряда академических журналов и научных советов (журналы «Известия РАН. Теория и системы управления» и «Автоматизация и приборостроение»; Научные советы РАН по комплексной проблеме «Процессы управления и автоматизации», по транспорту, по мехатронике и робототехнике).

В 2002 г., Евгений Дмитриевич возглавил теоретический и прикладной научно-технический журнал «Мехатроника, автоматизация, управление». Во многом благодаря ему журнал получил признание в научных и педагогических кругах и стал всероссийской трибуной для освещения и пропаганды научных достижений в области мехатроники. Под его научным руководством были успешно проведены ряд научно-технических конференций по профилю журнала (семь конференций «Мехатроника, автоматизация, управление» и одна конференция «Мехатронные и эргатические системы»).

В жизни Евгений Дмитриевич был человеком скромным, исключительно доброжелательным и пользовался большим уважением сотрудников и коллег.

Вся многогранная деятельность Е.Д. Теряева является ярким примером служения Родине, отечественной науке и высшей школе, образцом высокого долга ученого и гражданина.

Светлая память о Евгении Дмитриевиче навсегда сохранится в наших сердцах.

Н.Б. Филимонов,
Главный редактор журнала
«Мехатроника, автоматизация, управление»,
д.т.н., профессор

The XIV International Conference “Complex Systems: Control and Modeling Problems” (CSCMP’2012), was held on June 19–22, 2011 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 the 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 № 12-08-06043 of Russian Foundation for Basic Research.

The conference reports were presented on the following sections:

- Optimal Control of Systems with the Distributed Parameters;
- Situational Management and Systems for Communicative Actions Support;
- Strategic Management in Energetics;
- Modernization of Regional Public Health Management;
- Information-Measuring and Control Systems;
- Multiagent Systems and Technologies.

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

XIV Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (ПУМСС-2012) проводилась в г. Самаре (Россия) 19-22 июня 2012 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 № 12-08-06043).

На Конференции были представлены доклады по следующим секциям:

- оптимальное управление системами с распределёнными параметрами;
- ситуационное управление и системы поддержки коммуникативных действий;
- стратегическое управление в энергетике;
- модернизация управления региональным здравоохранением;
- информационно-измерительные и управляющие системы;
- мультиагентные системы и технологии.

В Конференции приняли участие ученые из университетов и научных учреждений Великобритании, Германии, США, Нидерландов, Чехии. Отечественные ученые представляли Российскую академию наук, 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.* - к.т.н., ученый секретарь, ИПУСС РАН, г. Самара
4. *Аншаков Г.П.* - член-корреспондент РАН
5. *Васильев С.Н.* - академик РАН
6. *Вишневецкий Р.* - президент IMACS, профессор Университета Радгерса, г. Нью-Йорк, США
7. *Гридасов Г.Н.* - к.м.н., заместитель председателя Правительства Самарской области – министр здравоохранения и социального развития
8. *Инден У.* - профессор Кёльнского университета, г. Кёльн, Германия
9. *Казарин С.В.* - заместитель председателя Правительства Самарской области – руководитель департамента информационных технологий и связи
10. *Клименко А.В.* - к.э.н., проректор Национального исследовательского университета Высшая школа экономики, г. Москва
11. *Козлов М.А.* - заместитель руководителя аппарата Правительства Самарской области – руководитель департамента государственного управления
12. *Кузнецов Н.А.* - академик РАН
13. *Новиков Д.А.* - член-корреспондент РАН
14. *Рапопорт Э.Я.* - д.т.н., ИПУСС РАН, г. Самара
15. *Ржевский Г.А.* - профессор Открытого университета, г. Лондон, Великобритания
16. *Себряков Г.Г.* - член-корреспондент РАН
17. *Смирнов С.В.* - д.т.н., ИПУСС РАН, г. Самара
18. *Теряев Е.Д.* - член-корреспондент РАН
19. *Хасаев Г.Р.* - д.э.н., ректор Самарского государственного экономического университета
20. *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, ИПУСС РАН, г. Самара
3. *Боровик С.Ю.* - к.т.н., ученый секретарь, ИПУСС РАН, г. Самара
4. *Андреев В.А.* - д.т.н., Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара
5. *Гриценко Е.А.* - заместитель министра здравоохранения и социального развития Самарской области, руководитель департамента развития информационных технологий и организации социальных выплат
6. *Гронская Н.Э.* - д.полит.н., Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики – Нижний Новгород
7. *Дилигенский Н.В.* - д.т.н., ИПУСС РАН, г. Самара
8. *Загорулько Ю.А.* - к.т.н., Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН, г. Новосибирск
9. *Золотухин Ю.Н.* - д.т.н, Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
10. *Ильясов Б.Г.* - д.т.н., Уфимский государственный авиационный технический университет
11. *Клещев А.С.* - д.ф.-м.н., Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток
12. *Кузнецов С.В.* - зам. директора ИПУСС РАН, г. Самара
13. *Кузнецов С.И.* - к.м.н., заместитель министра здравоохранения и социального развития Самарской области - руководитель департамента организации медицинской помощи населению
14. *Курошин В.Е.* - заместитель руководителя департамента информационных технологий и связи Самарской области – руководитель управления региональной информатизации
15. *Лазарев Ю.Н.* - д.т.н., Самарский научный центр РАН
16. *Скобелев П.О.* - д.т.н., НПК «Разумные решения», г. Самара
17. *Тяпухина Т.В.* - директор Самарского областного медицинского информационно-аналитического центра
18. *Филимонов Н.Б.* - д.т.н., МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

**CONTENTS**
**СОДЕРЖАНИЕ**


**Plenary Papers**
**Пленарные доклады**

1. *G. Rzevski* 3
Managing Complex Socio-Technological Systems

2. *В.Е. Котов* 4
Расширяющаяся Вселенная Информатики

3. *В.А. Соловьев* 18
Современное состояние и перспективы развития процессов управления пилотируемыми космическими полётами

4. *U. Inden* 23
Effectiveness and Efficiency of Autopoietic Systems Improving Organisational Adaptiveness by Enriching and Augmenting Autopoietic Cycles

5. *В.А. Виттих* 46
Конвергенция наук об искусственном и гуманитарных наук

6. *S. Kretov* 52
Complex System Analysis of the Russian Innovation Mechanism

7. *В.Ф. Меньшиков* 60
Обеспечение экологической устойчивости для развития России

**Optimal Control of Systems with the Distributed Parametres**
**Оптимальное управление системами с распределёнными параметрами**

1. *Э.Я. Рапопорт* 75
Оптимальное управление динамическими системами с распределенными параметрами в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта

2. *Ю.Э. Плешивцева, М.Х. Лапицкая,* 87
Синтез алгоритмов оптимального управления процессом индукционного нагрева цилиндрической заготовки при неполном измерении состояния

3. *И.В. Позняк, А.Н. Шатунов* 93
Управление режимами работы индукционной печи с холодным тиглем с использованием решения обратной задачи электромагнитного поля

4. *М.Ю. Максименко, И.В. Позняк, А.Н. Шатунов, А.Ю. Печенков, В.В. Кичигин, А.И. Максимов* 100
Управление фронтом кристаллизации расплава при зонной плавке в индукционной печи с холодным тиглем

**Situational Management and Systems for Communicative Actions Support**
**Ситуационное управление и системы поддержки коммуникативных действий**


1. *А.Ю. Нестеров* 109
Семиотика управления: проблемы прагматики в проективном семиозисе

2. *В.А. Виттих* 112
К определению понятия «ситуационное управление»

3. *Н.П. Кириллов* 116
Требования к концептуальной модели процессов ситуационного управления функциональными состояниями технических систем

4. *В.А. Виттих, М.В. Игнатьев, С.В. Смирнов* 125
Разработка систем поддержки коммуникативных действий

5. *С.Ф. Сергеев, Ю.Ю. Заплаткин, М.А. Захаревич* 131
Механизмы редукции в самоорганизующихся мирах циклических коммуникаций

6. *Б.Г. Ильясов, Е.А. Макарова, Э.Р. Габдуллина, А.Н. Павлова* 138
Кластеризация неравновесных макроэкономических ситуаций на основе самоорганизующихся карт

7. *A. Bijl* 150
Poultry Manure Utilization; a Knowledge Transfer Project in the Sverdlovsk Region of the Russian Federation

8. *А.Н. Гинзбург, М.В. Игнатьев* 159
Контроллер ресурсообеспеченности в системах поддержки коммуникативных действий

9. *З.В. Апанович* 164
Современные силовые алгоритмы для визуализации информации большого объема

10. *С.В. Смирнов, А.А. Антропов* 172
Анализ использования Java-апплетов для графического отображения web-представлений онтологических моделей

11. *С.В. Смирнов, Е.Г. Суворова* 177
Принципы реализации Обозревателя онтологических моделей

12. *Д.В Богомолов, В.П. Богомолов, А.Е. Никольский* 184
Система дистанционного экзоскелетонного управления и контроля состояния сложных систем в различных средах с использованием средств стереопространственных изображений, принципа синестезии и обучения

13. *Л.Л. Чекалов* 191
Фактор субъекта в функционировании систем

14. *Д.И. Пунда* 201
Модель «управляемой экономики», как отражение качества современной сложности

15. *Н.М. Боргест* 211
Модели согласованных решений в проектировании

16. *Г.Х. Ирзаев* 219
Модель системы управления технологичностью промышленных изделий

17. *А.А. Левков* 227
Управление структурой информации в сложных реляционных системах

18. *И.Д. Виноградов, С.В. Смирнов* 232
Информационная поддержка объединения онтологий в реляционных базах данных

19. *В.Д. Ивченко, Г.А. Филимонов* 239
Многокритериальное ранжирование на основе трафовых методов кластеризации

20. *А.М. Кистанов* 243
Управление жизненным циклом розничных банковских продуктов

21. *И.А. Минаков, С.И. Вольман, Д.А. Ёлкин* 248
Разработка методов оптимизации Интернет - рекламы на основе ключевых слов

22. *А.З. Асанов, И.Ю. Мышкина* 256
Когнитивное моделирование при оценке сотрудников предприятий

23. *Г.П. Драгунова, С.В. Смирнов* 262
Расширенная онтологическая спецификация предметной области задачи базирования детали

24. *К.А. Стуликова, Д.Ю. Полукаров* 268
Концептуальная модель представления знаний о маршрутизации в глобальных компьютерных сетях

25. *В.Ю. Волков, Луэ Ху Дык* 278
Интеллектуальная система выработки рекомендаций по снижению выбросов в атмосферу химико-технологическими предприятиями

26. *В.Ю. Волков, Самаха Башир Аббас, В.В. Батышкина* 286
Разработка автоматизированной системы научных исследований распространения выбросов в атмосферном воздухе промышленного региона

27. *Г.И. Горемыкина, М.А. Пономарёва* 291
Создание нечёткой системы управления инвестиционными проектами

28. *В.Е. Гвоздев, Н.И. Ровнейко* 299
Моделирование процессов формирования требований к программному продукту

29. *И.А. Степановская* 305
Методологический и инструментальный базис формирования региональных информационных систем для фрактально развивающихся систем административного управления

**Strategic Management in Energetics**
**Стратегическое управление в энергетике**

1. *Н.В. Дилигенский* 321
Стратегические проблемы управления энергосбережением и энергоэффективностью

2. *Н.В. Дилигенский, А.П. Ефимов* 326
Макромодель управления региональной системой производства, передачи, распределения и потребления энергии

3. *М.В. Цапенко* 335
Многокритериальная оценка региональных программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности

4. *И.В. Долотовский, Е.А. Ларин, Н.В. Долотовская, А.В. Ленькова* 343
Система управления потреблением энергоресурсов предприятий переработки углеводородного сырья

5. *Л.П. Шелудько, Л.И. Пешков* 351
Направления и перспективы развития электроэнергетики в условиях её реформирования

6. *В.Е. Гвоздев, Г.И. Таназлы, А.И. Таназлы* 356
Разработка функциональной и физической структуры систем заряда емкостных накопителей энергии

7. *А.А. Темичев, Е.И. Андреев, А.В. Кычкин* 370
Автоматический контроль надежности системы распределенного мониторинга энергопоказателей

8. *С.К. Андрюшкевич, С.П. Ковалёв, А.С. Кубышкин, А.М. Трегубов* 376
Проблемы автоматизации управления процессами розничного рынка электроэнергии

**Modernization of Regional Public Health Management**
**Модернизация управления региональным здравоохранением**

1. *В.А. Виттих, Г.Н. Гридасов, Е.А. Гриценко, С.И. Кузнецов, С.В. Кузнецов, И.М. Назаркина, Т.В. Тяпухина, Л.С. Федосеева* 389
Основные принципы модернизации системы управления здравоохранением Самарской области

2. *В.Д. Фурасов, Т.В. Тюпикова* 399
Сравнительный анализ статистики здравоохранения. Регионы России

3. *Е.А. Гриценко* 408
Современные информационные технологии в сфере здравоохранения и социальной защиты населения Самарской области

4. *Т.В. Тяпухина, Е.В. Кузьмук, Л.В. Кведер, М.С. Буклешева, А.А. Гермизина* 414
Пути модернизации здравоохранения: результаты опроса экспертов, представителей общественных организаций, населения

5. *Л.С. Федосеева, И.М. Назаркина* 426
Опыт применения принципов холонического подхода в управлении качеством оказания медицинской помощи на амбулаторном этапе

6. *А.Е. Янковская, С.В. Китлер* 433
Модернизация управления региональным здравоохранением на основе интеллектуального расширения геоинформационной системы

**Information-Measuring and Control Systems**
**Информационно-измерительные и управляющие системы**

1. *С.А. Белоконь, Ю.Н. Золотухин, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, М.Н. Филиппов* 441
Управление параметрами полёта квадрокоптера при движении по заданной траектории

2. *Ю.Н. Золотухин, А.А. Нестеров, М.Н. Филиппов* 449
Оптимизация режимов работы аккумуляторных батарей в составе интеллектуальной электроэнергетической системы

3. *Д.Н. Сузанский* 452
Применение положений теории гидродинамики в задачах управления летательными аппаратами

4. *Д.А. Миляков* 458
Последовательное комбинированное наведение на гиперзвуковые летательные аппараты

5. *И.О. Петров, А.А. Чуприков* 466
Оптимизация конструктивно-динамических параметров ЛА

6. *А.М. Касимов, Э.М. Мамедли, Л.И. Мельников* 472
Вопросы обеспечения непрерывности управления самолётами в условиях агрессивных внешних воздействий

7. *И.О. Петров, О.В. Майданович* 478
Метод оперативного расчета оптимального управления движением центра масс ЛА при синергетическом маневрировании

8. *Н.А. Сазонникова* 484
Исследование эффективности лазерных информационно-измерительных систем для оценки состояния поверхностей летательных аппаратов

9. *Н.Д. Сёмкин, В.В. Любимов, В.И. Малышев* 492
Применение оптимальных законов управления для успокоения магнитного микроспутника на экваториальной орбите

10. *Л.В. Глухова, И.А. Тимбай* 498
Исследование влияния проектно-баллистических параметров наноспутника на угловое движение при снижении с низких круговых орбит

11. *Ю.Н. Горелов, С.Б. Данилов, Л.В. Курганская, А.И. Мантуров, М.В. Морозова* 507
Синтез интегральных программ управления угловым движением космических аппаратов дистанционного зондирования

12. *В.Н. Степашкин, А.Е. Гриценко* 518
Программно–моделирующий комплекс для разработки методик испытаний и эксплуатации цифровых оптико-электронных систем воздушного мониторинга земной поверхности

13. *А.З. Асанов, Д.Х. Валеев, А.С. Савинков* 524
Интеграция и интеллектуализация бортовых систем управления большегрузными автомобилями

14. *В.И. Батищев, Н.Г. Губанов, А.В. Чуваков* 532
Формализация и обощение непроизводных структурных элементов в системе многоуровнего анализа транспортной инфраструктуры

15. *М.В. Ромкин, В.А. Засов* 538
Система автоматической идентификации типов подвижных единиц железнодорожного транспорта

16. *А.Б. Филимонов, Н.Б. Филимонов* 546
Аппроксимационная формализация обратных задач динамики в процессах управления

17. *Ю.М. Заболотнов* 550
Применение метода усреднения для построения оптимального управления колебательными системами

18. *Д.Г. Арсеньев, Н.А. Берковский* 556
Эффективный выбор плотности распределения для вычисления байесовской оценки в задаче о слежении по азимуту

19. *Н.И. Сельвесюк* 562
Аналитический синтез стабилизирующих регуляторов по выходу для линейных многосвязных систем

20. *Б.Г. Ильясов, Г.А. Саитова, И.И. Сабитов* 569
Анализ устойчивости цифровых многосвязных систем автоматического управления

21. *А.З. Асанов, В.С. Каримов* 577
Синтез адаптивной системы управления с эталонной моделью для многосвязного объекта с запаздываниями по состоянию

22. *А.З. Асанов, Д.Н. Демьянов* 583
Аналитический синтез квазиадаптивной системы управления многосвязным объектом с заданием спектра системных нулей

23. *М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов* 589
Модели электромагнитного взаимодействия чувствительных элементов одновитковых вихретоковых датчиков и лопаток. Состояние и развитие

24. *М.М. Кутейникова, Б.К. Райков, О.П. Скобелев* 595
Конструктивные разновидности высокотемпературных одновитковых вихретоковых датчиков

25. *Л.Б. Беленький, О.П. Скобелев* 602
Измерительная цепь с одновитковыми вихретоковыми датчиками и приближенным дифференцированием

26. *В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик* 607
Система измерения ускорений лопаточного колеса компрессора и турбины с использованием одновиткового вихретокового датчика и микроконтроллера

27. *В.Ю. Ольшанский, А.В. Серебряков, И.Ф. Паршина* 612
Влияние жесткости чувствительного элемента на характеристики датчика инерциальной информации

28. *М.А. Габидулин* 617
Синтез обобщенных структур бесконтактных тахометров постоянного тока на растровых синусно-косинусных преобразователях перемещений

29. *В.С. Мелентьев, А.О. Лычев, А.А. Миронов* 625
Синтез методов и систем измерения интегральных характеристик с использованием ортогональных составляющих гармонических сигналов

30. *С.В. Кравцов* 634
Выявление, оценка и компенсация рассогласований параметров цифровой системы стереозрения посредством информационного и корреляционного анализа стереопары

31. *В.Е. Кузнецов, А.В. Кузнецов, Д.М. Филатов, Ян Чжан* 641
Адаптивная система управления сервоприводом с нелинейной моделью линейного электродвигателя

32. *А.В. Саушев, В.А. Шошмин* 649
Методы параметрического управления состоянием технических систем

33. *А.В. Лопота, А.Г. Любимов* 656
Разработка имитационных моделей технических систем схемного типа

34. *В.А. Соболев, М.С. Осинцев* 663
Редуцированный фильтр Калмана-Бьюси для гибкого манипулятора

35. *М.Н. Ильина, Е.И. Кочемасова, В.Т. Лузинский* 669
Особенности цифровой фильтрации в микроэлектромеханических системах различного назначения

36. *А.В. Яновская* 676
Исследование типовых режимов работы автономных мобильных роботов с мехатронными гибридными приводами

37. *В.Н. Казанцев, А.С. Кондратьев, В.Д. Котенев, В.А. Павлов* 680
Информационная система предупредительного контроля качества производства продукции для механических цехов машиностроительных предприятий

38. *С.А. Потрясаев, Б.В. Соколов, Е.Г. Цивирко, В.А. Зеленцов* 686
Результаты решения задачи комплексного планирования операций и распределения ресурсов в корпоративной информационной системе

39. *Е.В. Горельская, А.С. Боровский* 692
Автоматизированное проектирование систем физической защиты объектов на основе потоковых диаграмм

**Multiagent Systems and Technologies**
**Мультиагентные системы и технологии**


1. *М.М. Матюшин* 699
Современные проблемы управления полётом МКС и подходы к их решению в ходе международного сотрудничества: от иерархий – к сетевым представлениям

2. *М.М. Матюшин, Н.Н. Черленяк, О.В. Волков, П.О. Скобелев, И.А. Сюсин, В.П. Карбовничий, А.В. Соллогуб, А.В. Царев, Е.В. Симонова* 710
Применение мультиагентных технологий для прогнозирования и парирования нештатных и аварийных ситуаций на МКС

3. *А.Л. Феоктистов, Е.М. Клейменова, П.О. Скобелев, И.А. Сюсин, В.А. Ларюхин, А.В. Царев, Е.В. Симонова* 718
Разработка принципов построения многоуровневой мультиагентной системы для управления проектами НИР и ОКР РКК «Энергия»

4. *А.Б. Шабунин, В.А. Чехов, П.О. Скобелев, Н.А. Кузнецов, Е.В. Симонова, И.О. Бабанин, С.С. Кожевников, М.Е. Степанов, А.В. Царев, С.В. Сазуров, Е.В. Курбатов, Д.В. Дмитриев* 724
Сетецентрический подход к созданию распределенных систем управления ресурсами ОАО «РЖД» на основе мультиагентных технологий

5. *И.Ю. Тюрин, А.С. Вылегжанин, М.В. Андреев, Э.В. Кольбова, П.О. Скобелев, Я.Ю. Шепилов* 735
Результаты внедрения и перспективы развития мультиагентной системы для оперативного управления инструментальным цехом ОАО «Ижевский мотозавод – Аксион холдинг»

6. *С.В. Блинов, В.Е. Сердюк, Г.В. Онищенко, П.О. Скобелев, В.А. Ларюхин, Д.С. Очков, А.В. Царев, В.А. Томин* 741
Мультиагентная система управления мобильными бригадами для средневолжской газовой компании

7. *Г.А. Крыжановский, В.В. Купин* 746
Теоретико-возможностная идентификация доминирующей мотивации диспетчера в целях прогноза действий по управлению воздушным движением

8. *Е.А. Сидорова* 753
Подход к анализу текста на основе лексических агентов

9. *А.Н. Сесекин, А.А. Ченцов, А.Г. Ченцов* 760
Некоторые задачи экстремальной маршрутизации с неаддитивной функцией агрегирования затрат

10. *Д.Н. Федянин* 764
О модели принятия решений в активных сетевых структурах

11. *А.И. Тимофеев* 770
О закономерностях онтологического подхода проекта «Искусственная разумная рука»

12. *В.И. Соловьев* 776
Интеллектуальные мультиагентные Коборг-системы

13. *В.В. Бреер* 780
Пороговые модели конформности и анти-конформности

14. *В.Б. Звонков* 786
Сравнительное исследование генетических алгоритмов и стайного алгоритма оптимизации

15. *Б.В. Соколов, В.А. Палицын, М.Ю. Охтилев, О.В. Майданович* 798
Анализ подходов к комплексной автоматизации мониторинга сложных организационно-технических объектов

16. *С.С. Анцыферов, К.Е. Русанов, Л.В. Маслова* 804
Оценка качества защиты информации в распределённых системах обработки

17. *В.А. Яровенко, С.А. Фоменков* 811
Особенности применения мультиагентного подхода при разработке системы обработки структурированных физических знаний

# Plenary Papers
# Пленарные доклады

# MANAGING COMPLEX SOCIO-TECHNOLOGICAL SYSTEMS

**G. Rzevski**

Professor, Complexity Science and Design Group, The Open University, UK
3 Ashbourne Close, London W5 3EF, UK
george@rzevski.net
phone: +447 525 746 106

***Key words:*** *complexity, socio-technological systems, disruptive events, extreme events, management methods*

**Абстракт**

Обсуждаются факторы сложности новой социотехнической реальности и их следствия. Предлагается новый подход к менеджменту социотехнических систем.

The Internet-driven global market, social networks (such as Facebook, YouTube, Google) and mobile devices (such as iPhones and iPads) have provided world population with ability to communicate and trade across political, economic and cultural barriers. The usage of the new information processing and communication technologies is so widespread that traditional social systems (such as nations, regions, public and private organisations) must now be considered as socio-technological.

Salient features of the new socio-technological reality are:

- Unprecedented speed of communication between individuals and communities independent of their geographical location.
- An exceedingly large number of people who can instantly get in touch with each other.
- A wide variety of opinions and worldviews that are exposed (and in a way legitimized) through interaction of large number of individuals with different perceptions of the world.

Consequent complexity of these systems result in:

- The occurrence of frequent unpredictable Disruptive Events (such as changes in demands and in previously agreed arrangements), which fosters volatility and uncertainty
- The occasional emergence of unpredictable Extreme Events (such as recent large-scale terrorist attacks on New York and London, the current global financial crisis and political upheavals named “Arab spring”), which leave deep scares in social fabric

Implications for managing complex socio-technological systems are severe. Specified goals must now be achieved under conditions of considerable uncertainty. Adaptability is the new Critical Success Factor.

New management methods include:

- Participating in communications with members of socio-technological systems with a view to understanding their concerns, views and demands.
- Negotiating with members on how to match demands to available resources.
- Acknowledging diversity of worldviews as legitimate and achieving consensus on important issues, which may be based on emotional rather than rational basis.
- Planning redundant generic resources, including skills, which may be needed to react to unpredictable Disruptive and Extreme Events.
- Deploying intelligent distributed monitoring, pattern discovery and decision support technologies that enable rapid reaction to unpredictable Disruptive and Extreme Events.

# РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ ИНФОРМАТИКИ

**В.Е. Котов**

Университет Карнеги-Меллон, Филиал в Кремниевой Долине
NASA Research Park
94035, Moffett Field, California, USA
vkotov@sv.cmu.edu

***Ключевые слова:*** *информатика, закон Мура, интернет, центры обработки данных, виртуализация, сервис-ориентированная архитектура, MapReduce, Hadoop, анализ данных, социальные сети, облачная обработка данных, встроенные системы*

**Abstract**

In the last two decades, the progress in computer and communication technology has caused an information explosion of such magnitude that it completely changed many aspects of contemporary life. The Internet, smartphones, big data, large date centers, and social networks dominate the landscape and lead us to the new Information Society. The paper reviews the main changes that have occurred in computer systems during these years as well as current trends and problems. In the choice of topics, the author was guided by (but not limited to) his own experience of participating in advanced research projects in Silicon Valley, California.

## Введение

Автор этой публикации отметил в этом году свой профессиональный юбилей: 50 лет назад он был зачислен в штат Отдела вычислительной техники Института математики Сибирского Отделения АН СССР, где свои первые программы он писал в машинных кодах популярной в то время ламповой ЭВМ М-20. После этого 29 лет работал в Академгородке (в лучшей, по его мнению, среде обитания для научных работников в СССР) и был свидетелем и непосредственным участником «классического» периода развития вычислительного дела и программирования. Работая в достаточно широком диапазоне проблем (архитектура ЭВМ, программирование, теория программирования, сети ЭВМ), а также участвуя в работе Международной Федерации по Обработке Информации (IFIP) и комиссий ГКНТ СССР по перспективным прогнозам развития вычислительной техники, получил возможность наблюдать «большую картину» эволюции информатики в то время. Интерес к отслеживанию ее прогресса сохранился и в дальнейшем.

Следующие 21 год профессиональной работы прошли в мировом эпицентре «Интернет Революции», в Кремниевой Долине в Калифорнии. Это было как будто прожить две жизни в двух разных эпохах, обе - захватывающе интересные, но очень разные, потому что в последние два десятилетия кардинально изменились все количественные и качественные аспекты информационных технологий. Если до этого число компьютеров в мире исчислялось десятками тысяч, они применялись в основном в большом бизнесе, обороне и науке, а их пользователями были профессиональные программисты, то начиная с 90-х годов продукты и услуги информатики стали повседневной необходимостью на работе, в школах и дома. Это дало повод говорить о новой технологической революции, о нарождении Информационного Общества, в котором люди и окружающие их услуги, машины и аппараты имеют мгновенный доступ к информации и способны обмениваться ей в реальном времени.

В статье дан краткий обзор тех изменений в информатике, которые произошли в последние двадцать лет, ее тенденций и проблем. В таком обзоре можно затронуть только некоторые основные моменты, более широкое и детальное рассмотрение потребовало бы монографии.

В выборе о чем рассказать автор руководствовался (но не ограничивался) собственым опытом участия в исследованиях, проводимых в Кремниевой Долине в Лабораториях Хьюлетт-Паккарда и Филиале Университета Карнеги-Меллона в Долине. Эти исследования были связаны с анализом, разработкой и оптимизацией больших и сложных вычислительных систем, предназначенных для оперативной и надежной обработки больших объемов данных.

## 1 Технологические предпосылки

Можно выделить (условно, конечно) три периода в развитии информатики:

1950е-70е годы – время становление информатики, последовательная, постепенная и относительно равномерная эволюция ЭВМ и программирования. В это время основными объектами информатики были: большие и малые ЭВМ, языки программирования и трансляторы, операционные системы, полупроводники и интегральные схемы, сети ЭВМ.

1980е годы – усложнение концепций, аппаратуры и софтвера, ускорение темпов развития, трамплин в сегодня: сверхбольшие интегральные схемы, суперЭВМ, архитектура клиент-сервер, персональные ЭВМ, графический интерфейс пользователя, электронная почта, технология программирования, искусственный интеллект.

1990 – н/вр - «Большой Взрыв» в информатике, Интернет Революция, глобальные вездесущие информационные системы, создание фундамента Информационного Общества: HTML и WWW, ноутбуки, цифровые фотоаппараты и телевидение, мобильные телефоны и смартфоны, планшеты, широкополосный интернет, беспроводная связь (Wi-Fi), центры обработки данных (data centers), облачная обработка данных (cloud computing), социальные сети, интегрированные встроенные системы.

В основе «Большого Взрыва» - непрекращающийся прогресс электроники и средств связи. Известный Закон Мура [1] абсолютно правильно предсказал, что число транзисторов, размещаемых на кристалле будет удваиваться каждые два года (а производительность – каждые 18 месяцев). Это приблизительно соответствует экспоненциальному росту, как видно на Рисунке 1 (благодаря логарифмическому масштабу по оси Y). Аналогичная картина наблюдалась и для емкости дисковой памяти (Рисунок 2). А пропускная способность сетей увеличивалась на 50% ежегодно, т.е. удваивалась каждые 21 месяц. Широкое распространение беспроводной связи в последнее десятилетие, делает сетевой доступ обиходным в любое время и почти в любом месте.

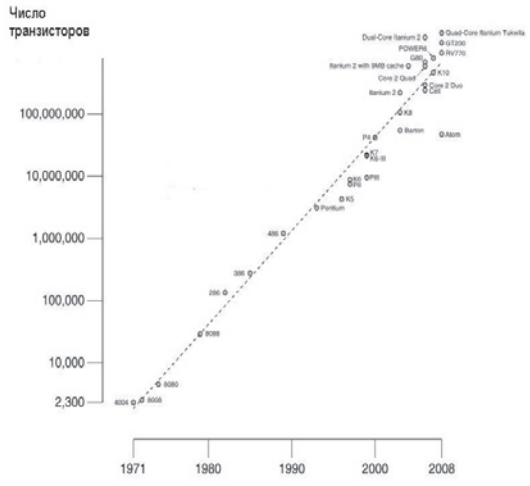



Рисунок 1 – Число транзисторов на кристалле

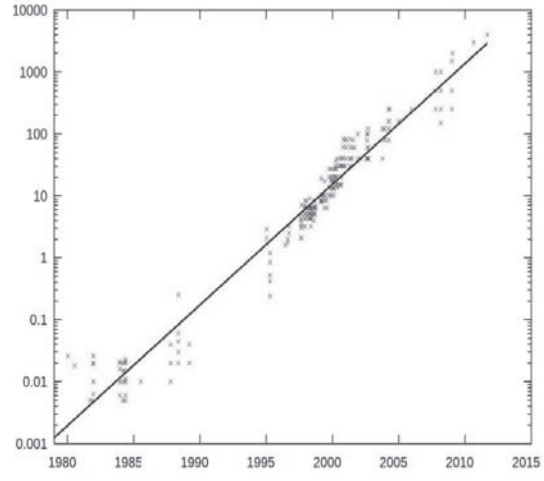



Рисунок 2 – Объем данных на диске (в гигабайтах)

В Таблице 1 показано как росли характеристики микропроцессоров каждые 10 лет, начиная с выпуска первого микропцессора Intel 4004 в 1971 году. Цифры говорят сами за себя:

Таблица 1 – Прогресс микропроцессоров

| Год | Процессор | Число траснзосторов | Разрешение | Площадь кристалла | Частота |
|---|---|---|---|---|---|
| 1971 | Intel 4004 | 2 300 | 10 µm | 12 mm | 0,2 MHz |
| 1982 | Intel 80286 | 134 000 | 1,5 µm | 49 mm | 12 MHz |
| 1989 | Intel 80486 | 1 180 000 | 1 µm | 160 mm | 200 MHz |
| 2000 | Pentium 4 | 42 000 000 | 180 nm | 122 mm | 1,5 GHz |
| 2011 | AMD Tahiti | 4 310 000 000 | 280 nm | 365 mm | 925 MHz |

Последние два десятилетия, экспоненциальный прогресс в технологии, энергия предпринимателей, мастерство миллионов инженеров и программистов плюс глобализация экономики, обеспечившая массовое производство самых разнообразных высокотехничных изделий, невиданно ускорили внедрение инноваций и обновление продуктов, уменьшили их стоимость и создали огромный рынок информационых товаров и услуг.

## 2 Большие данные

В 1990 году в мире было 2,8 миллионов пользователей интернета (0,05% населения Земли), в 2011 году – 361 миллион (32,7% всего населения). В 1990 году в мире было 12,4 миллионов владельцев мобильных телефонов, в 2010 году - 5,2 миллиарда (79% населения Земли). Результат - беспрецендентное накопление информации и огромный трафик данных:

- 87 миллиардов сообщений посылается по электронной почте каждый день в мире;
- 4,5 триллиона страниц печатается или копируется каждый год;
- 1 терабайт данных ежедневно генерирует Нью-Йоркская биржа;
- 2 петабайта хранятся в цифровой библиотеке Архив Интернета (The Internet Archive);
- 15 петабайт данных ежегодно производит Большой Адронный Коллайдер в Церне;
- 100 миллионов фотографий загружаются в Google каждую неделю;
- 10 миллиардов фотографий (1 петабайт памяти) хранится в Facebook[1].

В 2011 году «мировой запас» данных был 1,2 зетабайта (десятикратное увеличение за 5 лет). Ожидается, что к 2020 году он вырастет до 35 зетабайт.

Растет не только вал данных, но и их сложность и разнообразие: изображения, видео клипы, музыкальные композиции, финансовые документы, сигналы датчиков, электронные письма, SMS, штрих-коды сканирования, спутниковые изображения и т.д. Их размеры варьируются: DVD – 5 гигабайт, почта – несколько килобайт, сканированный штрих – 128 байт. Последние составляют менее 6% от общего вала в гигабайтах, но 99% - по числу файлов.

## 3 Большие системы

### 3.1 Центры обработки данных

Чтобы хранить и оперативно перерабатывать такой огромный объем данных нужны большие компьютерные мощности, эффективные программы и специалисты высокой квалификации. В 90-е годы высокопроизводительные серверы стали объединять в кластеры, серве-

[1] (Напоминание: терабайт - $10^{12}$, петабайт – $10^{15}$, эксабайт – $10^{18}$, зетабайт – $10^{21}$. )

ры становились все миниатюрнее (*блейд-серверы* [2]), так что достаточно большое их число (порядка 128 сейчас) можно поместить в одной стойке. Такие кластеры служат строительными блоками *центров обработки данных (data centers)* [3]. Центры концентрируют значительные вычислительные мощности, программные средства и обслуживающий персонал в одном месте и обслуживают большой контингент пользователей как одной организации, так и предоставляя услуги сторонним пользователям на коммерческой основе. Они позволяют:

- Стандартизовать оборудование, программное обеспечение и прикладные программы, снижая таким образом затраты на их поддержку.
- Виртуализовать разномастные аппаратные и программные ресурсы и тем улучшить масштабируемость и эффективность использования серверов.
- Обеспечивать сохранность и безопасность оборудования, программ и данных.
- Значительно сократить затраты на энергетику.
- Автоматизировать конфигурирование и настройку ресурсов, обеспечивать надежность обработки данных, их резервирование и копирование.

Интернет компании Google, Yahoo, Amazon и eBay были пионерами в строительстве центров данных, так как им были нужны сотни и тысячи серверов, чтобы поддерживать трафик Интернета. Google имеет сейчас по-крайней мере 10 центров данных, из них половину – вне США. Считается, что общее число серверов в этих центрах приближается к 1 миллиону.

Большие центры данных называют *мегацентрам*. Самый большой в мире (пока) мегацентр в Ньюпорте, Англия, занимает площадь около 70000 кв. метров. IBM спроектировала и помогает строить в Индии Tulip Data City, центр данных площадью 84000 кв.метров. В Далласе, США, строится «парк центров» из семи корпусов на территории площадью 70 акров.

Центр данных Facebook в Орегоне (см. Рисунок 3) потребляет 28 мегаватт, столько же, сколько весь округ (county), в котором он расположен. А строящийся Tulip Data City будет потреблять 100 мегаватт. Потребление электроэнергии – существенный момент для центров данных, ее стоимость может составлять до 10% всех затрат [4]. Поэтому центры строятся вне больших городов, желательно поблизости от источников электроэнергии. Центры имеют новейшие системы непрерывного энергоснабжения (резервные генераторы и батареи) и сложные системы охлаждения серверов. Разработка эффективных систем автоматического мониторинга и балансирования температур – одна из самых актуальных проблем.

Рисунок 3 – Центр данных Facebook в Орегоне

Другая важная проблема – коммутация серверов. Трафик, который раньше был в основном двунаправленным, становитсв всенаправленным (благодаря виртуализации, массовой параллелизации обработки и сервис-ориентированной архитектуре, см. ниже). Три типа трафиков (пользователи – программы, память – память, процессы – процессы) по разному реагируют на задержки, джиттер и потерю данных. В результате, коммутаторы, а не серверы, определяют производительность центров данных. Поэтому все больше внимание уделяется разработке новых схем коммутации, простых и легко масштабируемых. В частности, дорогие кабельные коммутаторы могут заменяться или дополняться быстрыми и более дешевыми коммутаторами, базирующимися на появляющейся 60-ти гигагерцовой беспроводной технологии [5].

Центры данных становятся «узловыми станциями» современной информационной инфраструктуры играя такую же важную роль как большие электростанции в энергосетях или нефтеперерабатвающие заводы. Но их роль может быть гораздо более критической, т.к. речь идет о информации, потеря которой может быть катастрофической. Поэтому вопросам безопасности центров данных уделяется особое внимание. Контрольный список предупредительных мер включает как зашиту от хакеров, так и средства «физической безопасности»: размещение вне зон катастроф, надежные системы идентификации сотрудников (включая биопропуска), системы опознавания с видеокамерами по всей территории (Tulip Data City будет иметь 1500 таких камер).

### 3.2 Виртуализация

*Виртуализация серверов* [2,6] в центре данных прячет от пользователей физические серверы, памяти, операционные системы и сетевые ресурсы, заменяя их соответствующими виртуальными обьектами. Ресурсы физического сервера делятся между многими виртуальными серверами, которые автономны и могут легко перемещаться между физическими серверами. В результате: загрузка физических серверов существенно увеличивается (без виртуализации серверы часто загружены не более чем 10% времени); снижаются расходы на энергетику и обслуживающий персонал; упрощается развертывание и конфигурирование новых серверов; облегчается гибкое управление ресурсами и процессами.

### 3.3 Системы систем

*Системы систем (Systems of Systems)* [7,8] – «сверхсистемы», компоненты которых - сами большие системы. К ним относятся, например, глобальные ИТ инфраструктуры больших корпораций, состоящие из многих центров данных. Системы систем требуют тщательного анализа рабочих процессов (workflow) и моделирования генерируемых ими потоков данных, чтобы избежать узких мест и нерационального использования ресурсов. Искусство моделирования столь сложных систем состоит в том, чтобы, не теряя информации, существенной для выводов, сделать модели поддающимися математическому анализу и оптимизации.

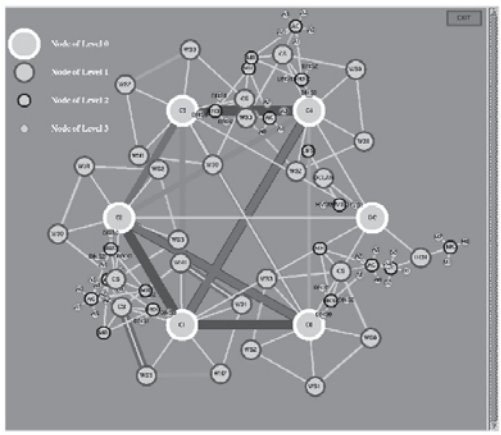


Рисунок 4 – Модель ИТ инфраструктуры Boeing

Автору довелось участвовать в разработке моделей для оптимизации архитектуры глобальных информационных систем двух корпораций: FedEx, компании логистических услуг, и Boeing, самолетостроительной компании. Обе планировали модернизировать свои ИТ инфраструктуры и результатом должны быть распределенные системы центров данных, взаимодействующие друг с дру-

гом как для совместного использования данных, программ и ресурсов, так и для решения «глобальных задач» (например, отслеживания движения посылок FedEx по всему миру). В случае FedEx, вывод был - отказаться от предлагаемой в начале трехярусной инфраструктуры в пользу «плоской» одноярусной, что значительно удешевило проект. В случае Boeing, были идентифицированы узкие места в трафике данных, вызванные существующим нерациональным распределением данных и программ между удаленными центрами данных, и даны рекомендации по их ликвидации.

## 4 Большие данные на больших системах

Большие данные не могут быть сосредоточены в одном месте большой системы, они распределены между накопителями в одном центре данных или между многими центрами. Как организовать их обработку? Традиционные файловые системы и реляционные базы данных больше не подходят для этого и начинают вытесняться *нереляционными (ключ/значение) базами данных*, которые обеспечивают большую скорость доступа, масштабируемость и гибкость. На помощь также приходит параллельное программирование в его сегодняшней инкарнации.

### 4.1 MapReduce и Hadoop

*MapReduce* и *Hadoop* [9,10] представляют собой сейчас перспективную парадигму для обработка больших распределенных данных на больших распределенных системах. Hadoop – это написанная на языке Java открытая программная система на базе MapReduce, который был разработан в Google в качестве механизма для обработки больших данных, настолько больших, что их надо было распределить на тысячи серверов , чтобы обработать в разумное время. Надо сказать, что основные идеи и конструкции MapReduce были известны давно, но сейчас они реализованы на практике. Программная модель MapReduce восходит к функциям *map* и *reduce* языка Lisp. *Map* применяет ко множеству своих аргументов заданную унарную операцию, порождая равномощное множество преобразованных значений, *Reduce* применяет ко множеству своих аргументов заданную бинарную операцию, свертывая входные аргументы в одно выходное значение.

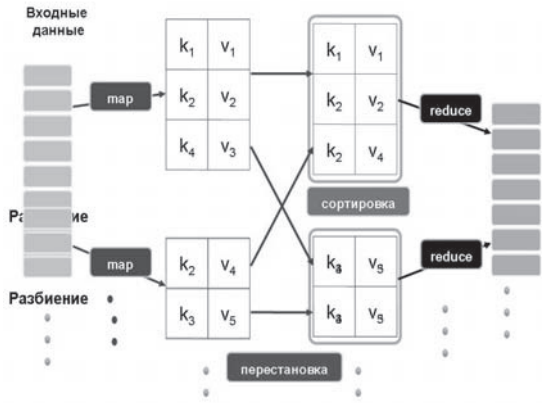



Рисунок 5 – MapReduce

*MapReduce* разбивает входные файлы пользователя на фрагменты (обычно 16-64 Мбайт). Затем он инициирует копии программы на серверах. Одна из копий, *мастер-копия*, рассылает фрагменты и *работы* (вызовы *Map* или *Reduce*) *копиям-работникам*.Те выполняют работы на свои фрагментах данных, записывают результаты на диски и сообщают мастеру, где они. Мастер контролирует взаимодействие работников и осуществляет сборку промежуточных результатов в окончательные.

### 4.2 Сервис-ориентированная архитектура

*Сервис-ориентированная архитектура* (СОА) [10,11]– это методология разработки программных систем как совокупности *программных сервисов*. Она как бы объединяет объектно-ориентированное, модульное и распределенное программирование. Программный сервис – это хорошо определенная, автономная функция, не зависящая от других сервисов и контекста.

Сервисы взаимодействуют друг с другом, обмениваясь запросами на обслуживание и его результатами. Сервисы могут быть сложно устроенными, иерахическими. Преимущества СОА:

- Простая и ясная модель взаимодействия компонентов в больших программных комплексах;
- Безопасная и легко управляемая программная среда;
- Сокращенный цикл разработки и развертывания из-за использования повторно используемых сервисов;
- Упрощение сопровождения СОА систем;
- Возможность развитие существующих программных систем за счет наращивания их механизмами СОА.

Основные проблемы СОА – трудность отладки СОА систем, недостаток подготовленных разработчиков и злоупотребление термином в рекламах систем, вовсе не являющихся СОА.

### 4.3 Облачная обработка данных

*Облачная обработка данных (cloud computing)* [13] – это аутсорсинг локальных данных и программ оконечного пользователя на удаленные серверы и работа с ними через интернет. Пользователь не ощущает этого эффекта удаленности. Единственное, что имеется на локальном компьютере – это интерфейсные программы (например, просто браузер). Облачная обработка интегрирует все то, о чем говорилось выше (центры данных, виртуализация, сервис-ориентированная архитектура, ...) и предоставляет пользователям:

- Доступ к их данным и программам из любого места в любое время;
- Возможность использовать большие ресурсы и мощные серверы, которые они не могут позволить иметь у себя дома или на работе, но могут платить за их использование;
- Возможность стандартизовать прикладные программы в рамках одной организации;
- Оперативное обновление данных, общих для пользователей одной организации или организаций-партнеров;
- Автоматическое резервирование их данных, непрерывность доступа к информации и программам в случае стихийных бедствий и других разрушительных событий;
- Экономию вычислительных ресурсов, рабочих площадей, энергетики и персонала.

Организации могут сформировать свой собственный виртуальный центр данных [14,15].

Основная проблема – возможность несанкционированного доступа к удаленным данным пользователя. На этом сейчас сосредоточено основное внимание специалистов.

### 4.4 Высокопроизводительные вычисления

Традиционные высокопроизводительные вычисления продолжают существовать и совершенствоваться, хоте их доля в общей обработке данных значительно уменьшилась. Стоящие перед человечеством особо сложные проблемы - новые совершенные материалы, прогноз изменения климата, $CO_2$ секвестрация, анализ и контроль риска, виртуальное проектирование сложных изделий, виртуальные летные испытания и т.п. - требуют все более быстродействующих ЭВМ. В настоящее время суперЭВМ достигли петафлопового ($10^{15}$) диапазона. Следующий этап - эксафлопы ($10^{18}$) на системах из миллионов чипов с тысячами ядер на кристалле. Для таких систем нужны новые, изощренные алгоритмы и вычислительные методы с эффективным распараллеливанием на разных уровнях детализации.

## 5 Осмысление информации

Поток данных, захлестывающий сегодня мир, становится все сложнее не только регулировать, обновлять, резервировать и архивировать, но и сохранять его полезным для пользователей и организаций. Чтобы обеспечить эффективное использование данных, они должы быть преобразованы в легко воспринимаемую *осмысленную информацию*. Это делается путем автоматической (или автоматизированной) интерпретации данных с помощью просева данных (da-

ta mining), распознавания образов, визуализации, машинного обучения и аналитического анализа данных. В результате сокращается число документов, просматриваемых пользователями, упрощаются сами документы, ускоряется доступ к ним.

*Просев данных (data mining)* [16] - это набор программных инструментов для распознавания корреляций, трендов, скрытых отношений и ассоциаций в данных, хранящихся в базах данных. Наработано уже много подходов к решению этой проблемы (деревья принятий решений, метод ближайших соседей, нейронные сети, кластерный анализ и другие).

*Аналитический анализ данных (data analytics)* [17] ставит задачей преобразование «сырых» данных в информацию, полезную для принятия решений в бизнесе, научных исследованиях, образовании и обороне. Это делается путем построения логических выводов о содержащейся в данных информации. В отличие от просева данных, анализ данных фокусируется на логическом выводе умозаключений, которые открывают неизвестные закономерности или подтверждают или опровергают предварительные гипотезы. *Качественная аналитика* позволяет анализировать сложные данные, такие как тексты, фотографии и видео. *Аналитика реального времени* включает динамический анализ («на лету») поступающей информации.

*Машинное обучение* [18] делает возможным компьютерам овладевать новыми знаниями самостоятельно, без того, чтобы знания напрямую программировались в них. Для этого используются индуктивное логическое программирование, байесовские сети и другие методы. Практическое применение машинного обучения растет быстро, особенно в автоматическом распознавание речи и рукописных текстов, вылавливание спама, техническом анализе поведения акций, медицинской диагностике, анализе клиентуры, обнаружении мошеничества с кредитными карточками и других областях. Что же касается обработки больших данных, то именно методы машинного обучения могут радикально повысить ее скорость и качество.

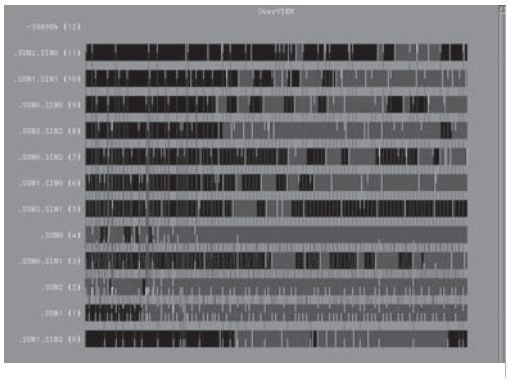


Рисунок 6 – Визуальная проверка корректности параллельных процессов

*Визуализация данных* [19] становится высокоэффективным методом улавливания и понимания скрытых отношений между данными, особенно теми, которые по своей природе не являются количественными и хорошо структурированными (тексты, изображения, аудио и видео) и которые уже составляют 70-80% всех данных и их доля будет только расти. На Рисунке 6 показана визуализация недетермини-рованных процессов в сложной параллельной системе, которую автор использовал при отладке системы. Без такой визуализации практически невозможно было отладить систему в приемли-мое время.

Интересные проблемы возникают при попытке использовать *параллельные координаты* для визуализации многомерных данных, широко используемых в медицинской диагностике, покупке-продаже акций, и других областях, где требуется принимать решения на основе анализа многих критериев [20].

Преобразование данных в полезную информацию уже сейчас активно используется в маркетинге. Газета «Нью-Йорк Таймс» в статье «Как компании узнают ваши секреты» [21] описывает практики ведущих торговых компаний использовать анализ данных о поведении покупателей для формирования и рекламирования индивудуальных «корзин заказов» для них. В центре статьи - история как торговая фирма Target по анализу покупок, в том числе продовольствия, заранее предугадывает, кто из покупательниц готовится стать матерью и высылает им соответствующие рекламные проспекты.

## 6 Новые информационные структуры

### 6.1 Социальные сети

*Социальные сети* [22] возникли на интернете как веб-сервисы, позволяющие пользователям создавать свои веб-сайты с биографическим очерком и личными данными, которые он хочет сделать доступными для ограниченного круга других пользователей (его *друзей*), а также иметь доступ к таким же данным друзей. Социальные сети появились относительно недавно, но быстро стали популярны во всем мире. Сейчас более миллиарда людей (более 80% пользователей интернета старше 15 лет) являются подписчиками социальных сетей. Распространение мобильных смартфонов быстро увеличивает число подписчиков и к 2016 году их будет дополнительно еще 1,3 миллиарда.

Социальные сети могут служить системой раннего предупреждения: быстро извещать население о возникших катастрофических ситуациях и о том, как реагировать на них. Они могут помочь обмену знаниями и опытом для коллективного решения нетривиальных проблем (коллективный разум). Трудно угадать полный набор потенциальных выгод, социальные сети сами найдут их.

Основные проблемы социальных сетей те же, что и в реальном мире – вирусы, мошенники, сплетники и хулиганы, - и их число быстро растет. Вызывает озабоченность и тот факт, что Facebook и другие провайдеры черезчур активно собирают личные и даже конфиденциальные данные о подписчиках и их поведении, чтобы продавать заинтересованным фирмам - практика на грани легально дозволенного во многих странах.

### 6.2 Интернет телевидение

Современная широкополосная связь и современные графические процессоры позволяют доставлять видео информацию через интернет почти так же, как традиционное телевидение доставляет ее через антены и кабели. *Internet Protocol Television (IPTV)* [23] - новый интернетовский стандарт, который будет использоваться телевещанием для этой цели. Прогнозируют, что через 5-10 лет наступит «смерть телевидения» (в нынешней его форме). Традиционные каналы будут заменены поисковыми телегидами, телевизионные передачи можно смотреть на любом компьютере, планшете или смартфоне. Не все согласны, что это смерть: телевидение не умрет, а эволюционирует в новое, обогащенное интернетом качество.

Как первую ступень к интернет телевидению, Sony и Google выпустили на рынок гибрид Sony Google TV, который комбинирует телевизор высокой четкости с многими из систем Google, такими как ОС Android, браузер Chrome, видео-обменник YouTube, фотоальбомы Picasa, плюс с фильмотеками типа Netflix. Он позволяет потребителям смотреть телевидение и одновременно просматривать веб-сайты, в тандеме. На подходе аналогичный гибрид от Apple.

## 7 Встроенные системы

Встроенные микропроцессоры уже стали частью повседневной жизни в:

- бытовой электронике (мобильные телефоны, цифровые фотокамеры, навигаторы, сканеры, видеоигры, ...);
- бытовой технике (микроволновые печи, стиральные и посудомоечные машины, ...);
- личном транспорте (БМВ серии 7 и Мерседес класса S имеют около 100 микропроцессоров);
- медицинском оборудовании (мониторинг, диагностическое оборудование, скопии, ...);
- военной и авиакосмической технике.

Следующий шаг – создание и широкое внедрение *интегрированных встроенных систем*, автоматизирующих почти все аспекты современной жизни. Повседневные объекты не только сами становятся «умными», но и могут общаться друг с другом без участия людей. В качестве

примеров приведем *автоматизированный дом (smart home), интеллигентные энергосети (smart grid), автономный автомобиль* и *сенсорные сети*. (О микрочипах, имплантированных в тело человека, мы только упомянем. Их применение в будущем неограниченно.)

### 7.1 Автоматизированный дом

Все, что в доме питается электричеством, может быть подключено к домашней сети автоматизации посредством проводной и/или беспроводной локальной связи и получать команды управления, посылаемые пультом дистанционного управления, компьютером, голосом или просто жестом [24]. Это, в первую очередь, осветительные и нагревательные приборы, развлекательная электроника, охрана дома. Видеокамеры и датчики движения отслеживатют наружный периметр дома и посылают информацию в компьютер, который может отличить животных от грабителей. Двери дома могут открываться после сканирования отпечатков пальцев или системой опознавания лиц, ключи не нужны. *Контекстно-ориентированные (context aware)* [25] системы опознавания могут идентифицировать жильцов дома (или сотрудников, если речь идет об офисах), отслеживать их перемещения и автоматически включать режимы устройств, настроенные на каждого из них в соответствии с индивидуальной информацией, заложенной в базе данных. Информация о состоянии дома и всей контролируемой в нем техники может быть также доступна удаленно, через интернет.

Протокол *Bluetooth* [26] становится сейчас доминирующим в организации домашней сети. Включенные в сеть приборы будут общаться друг с другом как равноправные (но, возможно, специализированные) партнеры-агенты, поэтому *мульти-агентные модели* [27] распределенного управления становятся архитектурной основой домашней сети. Агенты также могут коллективно участвовать в принятии и реализации управляющих решений. В сложных системах возможна иерахическая конфигурация агентов.

Оценивается, что в 2011 году в мире было 440 000 «умных домов» и что к 2015 году их станет 5,38 миллионов при среднегодовом темпе роста 65%.

### 7.2 Интеллигентные энергосети

Тенденции в современном снабжении электричеством можно охарактеризовать как быстро растущее потребление энергии во всем мире, разнообразие источников энергии (к гидро-, тепло- и атомным электростанциям добавляются ветряные станции и солнечные батареи) и, как следствие, транспортировка энергии на большие расстояния. Энергосети все больше напоминают транспортные сети с похожими проблемами «пробок» и аварийных ситуаций. Поэтому в энергосетях нужны похожие системы мониторинга и управления. Баланс производства и потребления, снижение пиковой нагрузки, предотвращение аварийных отключений, общее снижение энергопотребления - все это можно автоматизировать с помощью интеллигентых электросчетчиков (отслеживающих потребление энергии в реальном времени), динамических расценок, умных терморегуляторов, умных бытовых машин и приборов, систем прогнозирования потребления энергии и систем самовосстановления прерванного снабжения.

Оценивается, что рынок приборов и систем интеллигентных энергосетей составлял в мире в 2009 году 69,3 миллиарда долларов, а к 2015 году вырастет до 171,4 миллиардов. Министерство энергетика США приняло программу *Smart Grid* [28], задача которой модернизировать национальную энергосистему. В ней поток энергии от источников к потребителям дополняется встречным потоком информации от потребителей и оба потока отслеживаются и регулируются распределенной сетью автоматического контроля.

### 7.3 Автономный автомобиль

DARPA, агентство по перспективным исследовательским разработкам Министерства обороны США, провело с 2004 по 2007 год серию соревнований *автономных автомобилей*, машин без водителей, которые должны были пройти или большое расстояние в пустыне

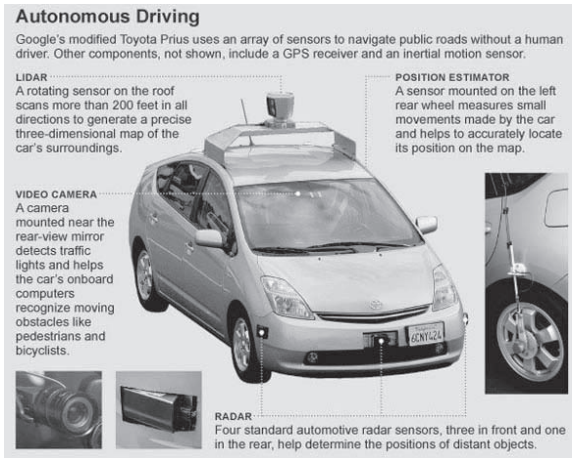



Рисунок 7 – Автономный автомобиль Google

(250 км) или меньшее (100 км) в городе за определенное время и без аварий [29]. Первый год не было ни одного победителя, а дальше всех проехал переоборудованный вездеход Humvee Университета Карнеги-Меллон - 11,78 км. В следующем году он проехал уже 212 км за 7 часов, но победила команда из Стенфордского Университета, которую сейчас компания Google пригласила продолжить разработку автономного автомобиля (Рисунок 7). Управление машиной осуществляется системой искусственного интеллекта, которая включает: информацию из просмотра улиц Google Street View, видеокамеры в машине, дальномер LIDAR на крыше и сенсоры на колесах. Google испытал уже несколько машин, успешно проехавших 1609 км без водителя и 225308 км с эпизодическим вмешательством человека. Google утверждает, что внимание их системы и ее реакция на дорожные ситуации много выше, чем у обычного водителя, и автономные машины более безопасны (и экономны), чем управляемые человеком. Система Google может быть установлена на автомобилях любой марки. И уже штат Невада принял в 2011 годы законы, определяющие требования к автономным автомобилям и районам, где они могут передвигаться.

### 7.4 Беспроводные сенсорные сети

Технология позволяет сейчас агрегировать в одном миниатюрном приборе микросенсор, микропроцессор и микрорадио. Сотни, тысячи и более таких недорогих автономных приборов могут быть размещены на большой территории и объединены с помощью Интернета в *беспроводную сенсорную сеть* [30]. Сенсорные сети дают возможность осуществлять постоянный экологический и климатический мониторинг, отслеживать движение товаров, оперативно реагировать на катастрофические ситуации, проверять соблюдение договоров и автоматизировать многие производственные процессы в сельском хозяйстве, строительстве, на транспорте и в других областях.

## 8 Доверяемость систем информатики

При той огромной роли, которую информатика стала играть во всех аспектах современной жизни, естественно возникает вопрос, насколько мы можем доверять системам информатики, особенно встроенным в критически важные объекты и процессы. Старая шутливая аксиома программирования гласит: «В каждой программе есть хотя бы одна ошибка», а по некоторым оценкам среднее число ошибок в софтверной промышленности – 20 на 1000 строчек кода. Ежегодно бизнесы теряют миллиарды долларов из-за программных ошибок, часто – тривиальных, которые можно бы было и избежать. В 2009 году в США было отозвано 19 миллионов автомобилей из-за ошибок в электронике и программах. А некоторые ошибки приводили к катастрофическим последствиям (программная ошибка в устройстве лучевой терапии убила 5 человек в 80е годы). По-видимому, наибольшее число серьезных аварий случилось у военных и в космических полетах (http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_software_bugs ). Поэтому в 2002 году космическое агентство НАСА заключило с пятью американскими университетами, во главе с Университетом Карнеги-Меллона, 20-миллионный контракт (в котором автор был техническим директором) на разработку методов радикального улучшения *доверяемости (dependability)* программного обеспечения.

Доверяемость системы – это ее способность избегать отказов, которые более серьезны и более часты, чем приемлимо [31]. Атрибуты доверяемости:

- Доступность - требуемая готовность к обслуживанию;
- Надежность - непрерывность бесперебойного обслуживания;
- Безопасность - отсутствие катастрофических последствий для пользователя;
- Целостность - отсутствие непредусмотренных изменений в системе;
- Сопровождаемость - возможность ремонтировать и модифицировать систему.

Обеспечение доверяемости – сложный процесс, включающий разнообразные методы для разных аттрибутов и на разных этапах жизненного цикла системы: проектирование, создание, отладка, сопровождение, модификации. Следует отметить, что сложность современных систем и их масштаб заставляют кардинально менять их архитектуру, делая их максимально модульными, самоуправляемыми и самоотлаживаемыми. На помощь приходят упоминаемая выше сервис-ориентированная архитектура, новое поколение языков высокого уровня, верификация, основанная на *model checking* [32]. В проекте НАСА особое мест было уделено разработке платформ, позволяющих быстро создавать *стенды доверямости (dependability testbeds)*, задача которых - моделировать и проверять технические решения, обеспечивающие доверяемость [33]. В интересах НАСА были разработаны: стенд для проверки пригодности языка Real Time Java [34] для программирования марсоходов и стенд для проверки сложных алгоритмов опознавания опасного сближения самолетов.

**Заключение**

Движущей силой будущих достижений в информатике по-прежнему будут микроэлектроника и связь, поддержанные фундаментальными исследованиями в физике и материаловедении. Развитие в этих областях продолжается прежними темпами. Новые био- и нанотехнологии начинают все более широко внедряться. Утверждается, что молекулы ДНК, интегрированные в микросхемы, позволят создавать *ДНК-компьютеры* [35], которые могут хранить в миллиарды раз больше данных, чем нынешние компьютеры, и обрабатывать их параллельно во много раз быстрее. *Квантовые вычисления* [36] отличаются от обычных тем, что квантовые биты, *кубиты*, могут быть многостабильными и поэтому *квантовые компьютеры* будут на многие порядки более быстрыми. Хотя стартап D-Wave Systems объявил о поставке первого коммерческого квантового компьютера в 2011 году, скептики не считают его настоящим квантовым, а лишь иммитацией. (В 70е годы много надежд возлагалось на оптические компьютеры, автор принимал участие в оценке экспериментальных прототипов, но, как и ожидалось, в дело они не пошли.)

Влияние новой информатики на экономику очевидно и огромно. Она явилась решающим фактором значительного подъема производительности труда в последние десятилетия. Тот факт, что сейчас в пятерке компаний с самым большим в мире рыночным капиталом - три лидера современной компьютеризации (Apple, Microsoft и IBM) и Apple – лидер, опередив нефтяные компании, говорит о том, что информатика стала локомотивом мировой экономики.

Все технологические революции приводили в конечном счете к кардинальным преобразованиям социальных структур. Метафора *«Глобальная деревня» (Global Village)* хорошо описывает вырисовывающуюся сегодня новую мировую социологическую структуру, в которой Интернет (прежде всего блоги и социальные сети), позволяет людям быстро обмениваться информацией, не контролируемой СМИ и правительствами, быстро реагировать на нее и самоорганизовываться в акции и движения (как случилось во время «Арабской Весны» или «Occupy Wall Street»). Государственные границы становятся прозрачными для обмена информацией, что будет способствовать «дружбе народов». Возможны и отрицательные побочные эффекты, которые уже давно предсказывали писатели-фантасты (безработица, киберпреступления, вторжение в частную жизнь, ...).

В статье «Компьютер для 21-го века» в журнале «Scientific American» Марк Вайзер писал еще в 1991 году «По мере своего развития, (информационные) технологии становятся все более встроенными и невидимыми ... Они постепенно вплетаются в повседневную жизнь пока не становятся неотличимыми от нее.»[37] Это пророчество может показаться парадоксом, но 20 лет спустя оно подтверждается. Несмотря на взрывной рост накапливаемых и обрабатываемых данных, они преобразуются в информацию, которая проста в использовании, благодаря скрытой от пользователя обработке, простым и удобным устройствам доступа и интуитивным интерфейсам. А встроенные системы информатики реализуют на практике давние проекты полной автоматизации не только производства, но и обыденной жизни.

**Список литературы**


[1] Moore, G. E. Cramming more components onto integrated circuits. Electronics, Vol. 38, 1965, pp.114-117.
[2] Goldworm B. and Skamarock A. Blade Servers and Virtualization: Transforming Enterprise Computing While Cutting Costs. Wiley, 2007, 408 p.
[3] Geng H. Data Center Handbook. McGraw-Hill Osborne Media, 2012, 608 p.
[4] Held G. Making Your Data Center Energy Efficient. Auerbach Publications, 2011, 286 p.
[5] Halperin D., Kandula S., Padhye J., Bahl P. and Wetherall D. Augmenting Data Center Networks with Multi-Gigabit Wireless Links. SIGCOMM'11, Toronto, Canada, 2011.
[6] Kusnetzky D. Virtualization: A Manager's Guide. O'Reilly Media, 2011, 72 p.
[7] Kotov, V. Systems of Systems as Communicating Structures. Object-Oriented Technology and Computing Systems Re-Engineering, Horwood Publishing, 1997, pp.141-154.
[8] Carlock, P.G., and Fenton R.E. System-of-Systems (SoS) Enterprise Systems for Information-Intensive Organizations. Systems Engineering, Vol. 4, No. 4, 2001, pp. 242-261.
[9] Dean J. and Ghemawat S. MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters. 6th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation. San Francisco, USA, 2004.
[10] White T. Hadoop: The Definitive Guide. O'Reilly Media, 2012, 630 p.
[11] Graupner S., Kotov V., Andrzejak A., Trinks H. Service-Centric Organization of Globally Distributed Computing. IEEE Internet Computing, Vol. 4, No. 7, 2003, pp. 36-43.
[12] Erl T. Service-Oriented Architecture (SOA): Concepts, Technology, and Design. Prentice Hall, 2005, 792 p.
[13] Reese G. Cloud Application Architectures: Building Applications and Infrastructure in the Cloud. O'Reilly Media, 2009, 208 p.
[14] Kotov, V. On Virtual Data Centers and Their Operating Environments. HP Laboratories Technical Report HPL-2001-44, 2001.
[15] Josyula V., Orr M., Page G. Cloud Computing: Automating the Virtualized Data Center. Cisco Press, 2011, 336 p.
[16] Han J., Kamber M., Pei J. Data Mining: Concepts and Techniques. Morgan Kaufmann, 2011, 744 p.
[17] Davenport T.H., G. Harris J.G., Morison R. Analytics at Work: Smarter Decisions, Better Results. Harvard Business Review Press, 2010, 240 p.
[18] Marsland S. Machine Learning: An Algorithmic Perspective. Chapman and Hall/CRC, 2009, 406 p.
[19] Telea A.C. Data Visualization. A K Peters, Ltd., 2007, 460 p.
[20] Inselberg A. Parallel Coordinates.Visual Multidimensional Geometry and Its Applications. Springer Verlag, 2009, 554 p.
[21] Duhigg Ch. How Companies Learn Your Secrets. New York Times, February 16, 2012, (also: http://www.nytimes.com/2012/02/19/magazine/shopping-habits.html?_r=1&pagewanted=all).
[22] Prell Ch. Social Network Analysis: History, Theory and Methodology. Sage Publications Ltd., 2011, 272 p.
[23] Simpson W. and Greenfield H. IPTV and Internet Video: Expanding the Reach of Television Broadcasting. Focal Press, 2009, 224 p.
[24] Goodwin S. Smart Home Automation with Linux. Apress, 1010, 312 p.
[25] Location and Context Awareness. Proceeding of the 4th International Symposium, LoCA 2009, Tokyo, Japan, Springer, 2009, 291 p.
[26] Harte L. Introduction to Bluetooth. Althos, 2009, 104 p.

[27] Cooke D.J. Multi-agent smart environments. Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments, Vol. 1, No. 1, 2009, pp. 47–51.
[28] Momoh J. Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis. Wiley-IEEE Press, 2012, 232 p.
[29] Buehler M., Iagnemma K., Singh S. (Editors). The DARPA Urban Challenge: Autonomous Vehicles in City Traffic. Springer, 2009, 662 p.
[30] Fei Hu, Xiaojun Cao. Wireless Sensor Networks: Principles and Practice. Auerbach Publications, 2010, 531p.
[31] Avižienis A., Laprie J.-C., Randell B., and Landwehr C. Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing. Vol. 1, Issue 1, 2004.
[32] Карпов Ю. Г. Model Checking. Верификация параллельных и распределенных программных систем. СПб.: БХВ-Петербург. 2009.
[33] Kotov V., Mehrotra V. Redwood: Dependability Testbed Instrumentation Platform. International Conference on Dependable System and Networks, Florence, Italy, 2004.
[34] Bruno E. J., Bollella G. Real-Time Java Programming: With Java RTS. Prentice Hall, 2009, 432 p.
[35] Paun G, Rozenberg G., Salomaa A. DNA Computing: New Computing Paradigms. Springer, 2010, 410 p.
[36] Yanofsky N.S., Mannucci M.A. Quantum Computing for Computer Scientists. Cambridge University Press, 368 p.
[37] Weiser M. The Computer for the 21st Century. Scientific American, Vol. 265 No. 9, 1991, pp.66-75.

**Biography**

*Vadim E. Kotov* is a correspondent member of the Russian Academy of Science (RAS). His main research interest is in large-scale concurrent and distributed systems. In 1962 – 1991 he worked in the Siberian Division of RAS. Since 1991 he resides in Silicon Valley, California, working on performance, cost-effectiveness and dependability of the enterprise and mission-critical systems, first at the Hewlett-Packard Laboratories and then at the local Carnegie Mellon University Campus.

# СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ПИЛОТИРУЕМЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ ПОЛЁТАМИ

**В.А. Соловьев**
ОАО «РКК «Энергия»
Московская обл., Королев, ул. Ленина, 4А, Россия
vladimir.soloviev@scsc.ru
тел: +7 (498) 602-95-08

***Ключевые слова:*** *космический аппарат, технология управления полетом, перспективная космическая инфраструктура, транспортная система, орбитальная станция*

**Abstract**
The article deals with the flight control technology of long-term orbital stations. Evaluated the achievements of Russian cosmonautics from the experience of flight control of orbital stations: “Solut”, “Mir”, and International Space Station. The article is analyzed perspective directions of development of space infrastructure.

Создание и эксплуатация долговременных орбитальных космических станций в течение нескольких десятков лет может по праву считаться одним из главных достижений отечественной космонавтики. Освоение вселенной человеком невозможно без длительного его пребывания вне земной атмосферы. Именно технологии длительного пребывания человека в космическом пространстве, которые являются одним из ключевых факторов продвижения человечества в космос, отрабатывались на орбитальных космических комплексах.

Важными аспектами такой технологии являются: создание и испытания систем жизнеобеспечения, позволяющих человеку находится длительное время в космосе; систем медицинского обеспечения и психофизиологической поддержки экипажа, позволяющих сохранять космонавтам здоровье и работоспособность в условиях агрессивной космической среды; систем связи обмена данными с бортовыми системами; систем управления движением и навигацией и т.д.

Однако одним из наиболее важных результатов полученных в процессе эксплуатации долговременных орбитальных космических комплексов является созданная технология управления их полетом. Эта технология представляет собой уникальный инструмент управления сложным человеко-машинным объектом, отделенным от субъекта управления значительным расстоянием, а иногда и временными задержками. Системой в которой и с помощью которой действует данная технология является автоматизированная система управления полетом.

Составными частями этой технологии являются планирование полета, реализация управления, анализ работы бортовых систем, всесторонняя поддержка экипажа, различные аспекты принятия решений и т.д [3]. Очевидно, что все части технологии управления полетом могут слаженно реализовываться с требуемым уровнем эффективности, только в том случае, если процесс управления полетом соответствующим образом организован.

Начало длительных пилотируемых полетов было положено серией орбитальных станций «Салют». При эксплуатации этих станций были созданы и реализованы многие элементы организации технологии управления полетом, такие как создание полноценной гражданской Главной оперативной группы управления полетом, включившей в себя представителей различных ведомств и предприятий, участвующих в управлении полетом; создание многоэтапного процесса планирования и т.д.

По мере усложнения программы полета орбитальных станций совершенствовались и методы организации их управления. Дальнейшим развитием системы управления полета стала эксплуатация станции «Мир». Станция «Мир», вобравшая в себя опыт орбитальных станций серии «Салют», заложила основы ставшего классическим подхода к созданию современных и будущих долговременных пилотируемых комплексов на околоземной орбите и технологии их управления. К этим основам относится, например, модульность и поэтапное строительство; ремонтопригодность бортовых систем и конструкций; регулярность транспортно-технического снабжения; безопасность непрерывной работы экипажа; адаптивность к изменениям программы полета, функционирования бортовых систем, состава наземных средств; технология периодического обслуживания свободнолетающих аппаратов; многоплановость целевого использования и т.д.

В процессе летной эксплуатации станция «Мир» постоянно совершенствовалась, наращивалась и развивалась. Всего на околоземную орбиту было выведено 7 модулей общей массой 135 тонн: базовый блок, модули «Квант», «Квант-2», «Кристалл», «Спектр», «Природа», стыковочный отсек для приема американских кораблей «Спейс Шаттл». Система транспортно-технического снабжения станции «Мир» предусматривала регулярное использование пилотируемых кораблей типа «Союз» и грузовых кораблей типа «Прогресс». О высокой эффективности системы свидетельствует тот факт, что общий грузопоток «земля-борт» составил более 170 тонн топлива и полезных грузов. За время полета станции к ней были запущены и пристыкованы 31 корабль «Союз», 64 корабля «Прогресс», проведено 9 стыковок комплекса «Мир» с кораблями «Спейс Шаттл». За время полета станции «Мир» на ее борту работали 104 космонавта и астронавта России, США, европейских и азиатских стран, выполнены исследования по 55 российским и зарубежным программам объемом более 31 тысячи сеансов экспериментов.

Важным достижением программы «Мир» стал опыт широкомасштабного международного сотрудничества по выполнению исследований и экспериментов в космосе. Благодаря успешной эксплуатации станции «Мир» была открыта дорога многолетнему и многоплановому сотрудничеству при реализации будущих международных программ.

Рекордно длительный 15-летний полет космической станции «Мир», преодоление ряда серьезных нештатных и аварийных ситуаций, проявившихся в процессе её полета, дали бесценный опыт эксплуатации космических орбитальных комплексов, обеспечили совершенствование организации и системы управления полетом, средств и методов подготовки космонавтов.

Следующим важнейшим шагом в развитии мировой космонавтики стала реализация программы строительства и эксплуатации МКС. По своему техническому совершенству, сложности реализуемых задач, налаженному взаимодействию всех международных партнеров в процессе создания и эксплуатации уникального космического комплекса проект МКС стал наивысшим достижением мировой космонавтики нашего времени [4].

Программа МКС объединила в себе усилия лучших ученых и инженеров 14 наиболее развитых стран мирового сообщества при ведущей роли двух космических гигантов – России и США. За истекший период 11-летнего срока её эксплуатации в непрерывном пилотируемом режиме успешно подтверждены выбранные технические решения, разработаны уникальные процедуры совместного управления полетом МКС с участием национальных Центров управления полетом (ЦУП) стран-участниц проекта, получены огромные объемы результатов научных и технических исследований на борту станции, внедрены новые перспективные космические технологии.

На сегодняшний день МКС – это огромный космический комплекс, состоящий из 14 модулей, 12 ферм, транспортных пилотируемых и грузовых кораблей «Союз» и «Прогресс» общим объемом герметичных отсеков более 800 кубических метров и общим весом более 400 тонн. В процессе строительства и эксплуатации станции на её борту работали 29 основных экспедиций, 17 экспедиций посещения по программе РС МКС, 36 экспедиций посещения по

программе АС МКС, выполнено 75 транспортных операций с участием российских модулей «Звезда», «Заря», «Пирс», «Поиск», «Рассвет», российских кораблей «Союз» и «Прогресс», выполнено 36 транспортных операций с участием американских кораблей «Шаттл», по две транспортные операции выполнили грузовые корабли Европейского космического агентства (ЕКА) и Японии. При реализации транспортных операций было выполнено более 140 стыковок и перестыковок к различным стыковочным узлам станции. Всего на борту станции работали более 220 человек из 15 стран, более 30 из них многократно. Для обеспечения работ по дооснащению МКС, проведения регламентных и ремонтных работ, работ по программе научно-прикладных и технических экспериментов осуществлено более 100 выходов экипажа в открытый космос, в том числе более 30 выходов по программе РС МКС.

Огромный объем проведенных работ был бы невозможен без применения новых прогрессивных технологий управления полетом МКС, скоординированных усилий всех стран-участниц проекта. Огромный вклад в успешную эксплуатацию МКС внес Российский сегмент станции. Имея самый большой опыт эксплуатации орбитальных станций предыдущих поколений, Россия не только заложила фундамент основ формирования облика МКС, его надежной и безопасной эксплуатации, но и сама совершила большой рывок в деле освоения космоса, наработала новые технологии управления полетом сложных космических систем, обогатилась опытом и наработками других стран-участниц программы МКС.

Необходимость совершенствования новых технологий управления полетом для программы МКС была продиктована как возрастанием объемов контролируемых параметров бортовых систем и команд управления, так и тесным взаимодействием национальных Центров управления стран-участниц при решении общих задач управления полетом и обеспечения безопасности экипажа. Если при эксплуатации станции «Мир» применялась технология так называемого суточного управления, что для своего времени было большим шагом вперед, то для МКС потребовалось разработать и внедрить технологию распределенного управления. Это позволило, используя потенциал всех стран-участников проекта, успешно справляться с возросшими нагрузками на наземный контур управления и обеспечивать надежное управление самого сложного на сегодняшний день космического объекта – МКС.

Применяемая в настоящее время технология управления полетом РС МКС является уникальным продуктом, позволяющим реализовывать любые самые сложные космические проекты, обеспечивать России лидирующее положение в мире в вопросах космической деятельности. Она впитала в себя весь накопленный опыт эксплуатации орбитальных станций предыдущих поколений, обогатилась опытом международного сотрудничества и находится в постоянном развитии. Это дает возможность успешно эксплуатировать космические объекты и комплексы, видоизменяемые в процессе длительного непрерывного полета, с нарастающей сложностью процесса управления, позволяя персоналу управления в условиях повышенной интенсивности нагрузки выполнять возложенные на них задачи управления без снижения надежности и качества работы.

Еще в середине 70-х годов были сформулированы основные цели и направления развития мировой космонавтики, например [1]. Эти направления определяются в первую очередь объективными экономическими предпосылками использования человечеством космического пространства. К данным направлениям можно отнести:

Околоземные системы связи, передачи данных и навигации, образованные группировками искусственных спутников Земли и наземным сегментом управления служебными бортами и целевой нагрузкой. Основная цель таких систем значительное расширение информационного пространства и оперативности получения информации заинтересованными пользователями.

Управление наземными системами с помощью систем космических ретрансляторов, позволяющих воздействовать на объекты управления в территориально удаленных и труднодоступных районах земной поверхности.

Промышленное получение уникальных материалов в космосе, производство которых затруднено в земных условиях. К подобным материалам могут относиться: специфические медикаменты (иммуноглобулины, особые вакцины и т.д.), кристаллы с заданной структурой и свойствами, изделия из спецсплавов и композиционных материалов, стекла для научных установок и технологических оптических систем, полые сферы для высокоточных шарикоподшипников повышенной надежности и т.д.

Космические системы освещения заданных районов земной поверхности с использованием рефлекторов для отражения солнечного света, которые могут быть использованы для повышения эффективности сельского хозяйства.

Генерация энергии на околоземных орбитах, например, с помощью ядерных реакторов и передача ее потребителям на земной поверхности.

Освоение и индустриальное использование Луны и в отдаленной перспективе Марса.

Жизнедеятельность этих и других экономически перспективных направлений может осуществляться только посредством построения и функционирования соответствующей космической инфраструктуры [2]. В комплекс средств такой космической инфраструктуры входят:

- автоматические космические аппараты для обеспечения связи, навигации, метеорологических наблюдений и дистанционного зондирования Земли, исследования планет, объектов Солнечной системы и космического пространства;
- орбитальные и планетные элементы инфраструктуры: околоземные орбитальные станции, автономно летающие корабли, посещаемые автоматические платформы или собираемые в космосе крупногабаритные аппараты, околопланетные орбитальные станции, планетные базы;
- транспортная космическая система, обеспечивающая доставку элементов инфраструктуры, а также людей и грузов в различные точки Солнечной системы;
- наземные комплексы подготовки и запуска космических аппаратов, наземные комплексы контроля и управления.

Ключевым элементом подобной космической инфраструктуры будет являться транспортная космическая система, поскольку она является связующим звеном между остальными элементами космической инфраструктуры, кроме того создание и функционирование элементов космической инфраструктуры без этой системы представляется крайне затруднительным.

Одним из вариантов построения транспортной космической системы является трехуровневая структура. На каждом уровне элементы системы объединены по общим признакам: решаемым задачам, схемам полёта, особенностям конструктивного исполнения и т. д. Причем, в некоторых случаях, возможно «пересечение уровней», то есть использование элементов первого уровня на втором уровне и наоборот.

Первый уровень транспортной космической системы будет обеспечивать полёты в околоземном пространстве с поверхности Земли до опорной околоземной орбиты (высота 200 км); с опорной околоземной орбиты до рабочей околоземной орбиты (высота 400 – 800 км) и до геостационарной орбиты. Все элементы системы первого уровня предназначены для перемещения в околоземном пространстве. Первый уровень также характеризуется доставкой с Земли с помощью ракет-носителей полезных грузов. В частности, для доставки грузов и людей с поверхности Земли на опорную околоземную орбиту могут использоваться одноразовые или многоразовые ракеты-носители различной размерности.

На первом уровне будут использоваться в основном космические аппараты с жидкостными ракетными двигателями, так как на их траектории движения оказывает большое влияние притяжение Земли и атмосфера. Для доставки грузов с опорной околоземной орбиты на низкие рабочие околоземные орбиты (высота 400 – 800 км) будет использоваться транспортный грузовой корабль или низкоорбитальная грузовая транспортная система типа буксир-контейнер.

Для доставки людей на рабочую околоземную орбиту будет использоваться пилотируемый транспортный корабль. Элементы первого уровня, такие как пилотируемый транспортный корабль и разгонные блоки, будут использоваться для выполнения транспортных операций на втором уровне, например для полётов к Луне, к точкам либрации и на орбиту ожидания межпланетных экспедиционных комплексов.

Второй уровень космической транспортной системы обеспечивает полёты между околоземной орбитой и околопланетной или окололунной орбитами, а также к точкам либрации. Второй уровень характеризуется использованием космических аппаратов с использованием электроракетных двигателей, что существенно повышает эффективность транспортных операций, в связи с необходимостью достижения больших характеристических скоростей.

Третий уровень космической транспортной системы обеспечивает полёты с околопланетных орбит на поверхность планеты и обратно и характеризуется использованием взлётно-посадочных и посадочных комплексов.

Очевидно, что космическая инфраструктура будет состоять из достаточно большого количества неоднородных элементов и только скоординированная работа всех этих элементов может обеспечить требуемых уровень эффективности функционирования инфраструктуры. Требуемая степень координации обеспечивается как согласованной совместной работой структурных элементов, так и адаптивными возможностями этих элементов. Остановимся на этих факторах подробнее.

Дальнейшее освоение человечеством космического пространства диктует необходимость создание будущей космической инфраструктуры как единой сложной системы. Создание этой системы на пустом месте невозможно, поэтому опыт, полученный отечественной космонавтикой в целом и особенно опыт эксплуатации долговременных орбитальных станций, является неоценимой базой знаний, в том числе, для создания новых технологий организации управления полетом.

Расширение спектра задач, решаемых человеком в космическом пространстве, диктует необходимость создания космической инфраструктуры, а требование эффективности и гибкости в решении этих задач определяет тесное взаимодействие элементов этой инфраструктуры.

Облик будущих процессов управления полетами будет, во многом, определятся выбранным путем развития мировой космонавтики. Однако, уже в настоящее время, очевидно, что согласованная работа элементов космической инфраструктуры и адаптационные возможности систем управления полетом будут играть значительное влияние в формировании этого облика.

**Список литературы**


[1] Крафт Э. Будущее космической индустрии.- М.: Машиностроение, 1979.

[2] Лопота В. А. Космонавтика в XXI веке // Вестник Российской академии наук. - 2011. - Т. 81, № 9.

[3] Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полётами. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009.

[4] Соловьёв В.А. Любинский В.Е. МКС – новый этап международного сотрудничества в космосе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2010.

# EFFECTIVENESS AND EFFICIENCY OF AUTOPOIETIC SYSTEMS IMPROVING ORGANISATIONAL ADAPTIVENESS BY ENRICHING AND AUGMENTING AUTOPOIETIC CYCLES

**Udo Inden**

Research Centre for Knowledge Management and Applications of Intelligent Systems
Cologne University of Applied Sciences, Faculty of Business Administration and Economics
50678, Köln, Claudiusstrasse, 1, Germany
udo-inden@fh-koeln.de

***Key-words:*** *autopoietic systems, self-referential systems, intelligent organisation, augmented (socio-technical) systems, Internet of Things, Technology that Thinks, computational science, content as a service*

**Абстракт**

Интеллектуальная организация, сформированная интеллектуальным сотрудничеством ее членов и дополненная интеллектуальными технологиями, является единственным эффективным ответом на проблему сложности все более увеличивающегося количества операционных действий. Теория автопоэзиса предлагает как унифицированный способ описания и объяснения появления организационного интеллекта, так и отправную точку для стратегий обогащения и роста организационных циклов автопоэзиса. Более того, эта теория позволяет структурировать влияние событий, которые могут превысить человеческие способности управления развивающимися организациями. Первая и вторая части статьи представляют собой краткое введение в автопоэзис и интеллектуальные организации: как в логике высказываний "машина – это проблема: решение находится в машине" (Poullet, 2006), так в сложности ведущее начало принадлежит технологии. Четвертая и пятая части, основанные на консалтинговом опыте и прикладных научно-исследовательских проектах, объясняют практические меры улучшения результативности и эффективности эксплуатационных циклов автопоэзиса. В последней части представлена реализация проекта Технологии, которая «Думает в большом масштабе».

## On Autopoietic and Self-referential Systems and Organisational Intelligence

"*There is, strictly speaking, no presupposition*less *science*." (*Nietzsche,* 1887) To phrase it simple: There must be knowledge to pose a question. The question predetermines the answer and with this the presuppositions of further questions. This in short describes the core of self-referentiality as conceptualised by *Luhmann* (2004). More fundamentally *Maturana* (1992) and Varela developed the concept of autopoiesis[1] as the principle how biological systems reproduce.[2] With a focus on the im-

[1] From Greek: αὐτο = self and ποίησις = creation, production, i.e. self-(re)producing systems.

[2] The theory of autopoietic systems explains self-organisational capabilities of life. Starting from initial autocatalytic and recursive metabolic processes on the level of cells life continued growing its complexity by differentiating the same autopoietic algorithm. And the same algorithm enabled life to recover from catastrophic events. The first global mass-extinction, the "Great Oxygenation Event" occurred in the Palaeoproterozoic when a new type of prokaryotes "discovered" a way of producing food (primarily sugars) from $CO_2$, $H_2O$ and light (photosynthesis) – while poisoning almost all other life by their waste: oxygen. And new life emerged from metabolic cycles exploiting this waste as source of energy. Autopoietic networks also establish self-organising resilience of life systems, e.g. in the form of stable oscillations between populations of predators and prey or between parasites and their hosts. The sustainability of co-evolving life systems of systems (ecotopes) increases with biodiversity, i.e. with increasing complexity. The same applies to economic structures coupled across numerous markets. The development of the internet shows how with networking the variety of business opportunities (arbitrages) almost explodes. But it also demonstrates that and how speculation fed by massive imbalances between real and financial economy again drive the risk of catastrophic failure turning into mass-extinction of businesses and ruin of social wealth.

pact of technology this paper takes an effort to exemplify the relevance of these fundamental concepts to the management of organisations. In contrary to Luhmann's interpretation of autopoietics as a general pattern of self-referential reproduction that includes social systems[3] that emerge from symbolic-conceptual communication Maturana and Varela restricted the concept to biological systems. But in fact a self-referential process also is an autopoietic process. For the purpose of this paper differences will not be elaborated.

The biological theory of Since Maturana says that the existence and dynamics of life is equal to the emergence and sustainability of self-organised, self-feeding metabolic cycles as beginning with the development of first prokaryotic cells three billion years ago and established on the exchange of substances with their environment and among their population. In contrast self-referentiality has its origin in sociology which understands social systems to be established by communication, i.e. by the exchange of messages that have meaning in a shared social context. Autopoietic cycles are established by both pairs, substance and energy as well as message and meaning. The generalising concepts are 'event' (arriving of substance or message) and 'impact' (production of energy or meaning).

With complex brains the ability emerged to create complex knowledge about the world in which they live and of defining their position in this world. Thus while basic life-forms (bacteria, cells) have code controlling metabolic processes, higher life also has knowledge (complex code) that controls more complex and more dynamic autopoietic processes. Wile the exchange of substances maintains energy budgets of cells, the exchange of messages maintains and develops coherence of social systems. Social systems of higher life-forms need to share knowledge and to exchange meaningful messages.

The German term 'Anschlussfähigkeit' means '*contributing to the continuation of an autopoietic processes*'. In brains or social systems of brains it is the self-referentiality of the knowledge-system that decides about the meaning of a message, i.e. whether a message is meaningful as update, extension or possibly as a contradiction to existing knowledge: 'non-sense' or 'irritation' indicates 'Anschlussfähigkeit' by delivering reason to question previous knowledge**.** Otherwise it may be a reason to discriminate the message.

Knowledge-networks are more or less flexible. In the wording of Maturana they are "plastic". In this view intelligence is equal to the effectiveness and efficiency of a self-referential knowledge-network to adapt to perceived change: Intelligence is the product of a network rather than of a node. This is true for the brain which is intelligent because of the richness and efficiency of the neural network, it is true for a colony of termites which is intelligent because of the efficiency of their network of activity (pheromone-based communication, functional differentiation …), it is true for multi-agent systems mimicking ant's colonies, and by effective collaboration it can become true for human organisations.

As a matter of fact individual termites are remarkably stupid, but as collective they produce structures still outclassing civil engineering. (*Turner,* 2008) But also as a matter of fact individual humans are remarkably intelligent, but frequently fail as collectives: Likely not the human brain is the most complex system we may know, but societies of human brains each complex and evolving its own agenda. Termites don't cheat each other and are not greedy, they don't have believes which entitle them to become a suicide bomber, a crusader or a benefactor …

Although logic or science are self-referential systems - self-referential systems are not necessarily grounded in logic and science. As example take esoteric interpretations of the world or creationist positions. Actually most powerful self-referential cycles find their grounds in old collections of narratives like assembled in the Bible or the Quran.[4] However in any knowledge-system one will

[3] Social systems refer to societies in their whole, to groups (families, clubs, political parties), to formal organisations (firms, public administrations' offices), to social classes, to functional subsystems like politics, economy, religion …

[4] Until Gutenberg invented letterpress printing in the middle of the 15th century narratives have been the only way of disseminating content and transferring it to next generations. (Chinese invented a kind of printing already about 200 B.C. and letterpress printing about 800 of our calendar.) Bible and Quran belong to the oldest and most powerful collections of narratives

find belief grounding it, among others the one that scientific proceeding approximates a true picture of the world. Thus also any paper is based on the belief that truth emerges from discourse.

If uncertainty increases we should be careful about convictions and be prepared for the unexpected. There is a little joke: "*Dad, did you have a PC when you were a child? – No. – And how did you get onto the internet?*" Everybody knows famous words like "*640k should be ample for anyone*." (*Bill Gates, 1980, w/o ref.*) Or "*There is not the slightest indication that nuclear energy will ever be obtainable. That would mean that the atom would have to be shattered at will*." (*Einstein,* 1932) Obviously children, world leaders and Nobel laureates have in common that horizons of imagination and expectation are part of their self-referential system which visibly can create overconfidence, path dependencies as well as the controlled "flight into ground" of a firm, an industry or of whole markets.[5]

To avoid the pitfalls of self-referentiality the clear objective should be to enrich and increase efficiency of knowledge networks. A frequent fault is that assumptions underlying the rational are not rigorously questioned or that no experimental approach is implemented widening the portfolio of alternatives and providing a sense for uncertainty. The tendency of creating organisational monocultures violates *Ashby's Law* (1957*,* p. 206) saying that only variety copes with variety and only diversity of brains and cultures and ideas (*Page,* 2007) growths chances of getting a wider picture of the world. The left hemisphere of the brain needs to acknowledge contributions of the right one.

**The Performance of Intelligent Organisations and the Acceleration of Change**

Organisations are social systems formed by purposeful and structured collaboration of individuals and endowed with resources. 'Structured' refers to the differentiation of function, role, or authorisation etc, 'purposeful' to e.g., commercial or political goals and 'resources' to material means required for pursuing objectives. However human organisations frequently fail because intelligent people fail to intelligently collaborate. In contrast colonies of stupid termites don't run bankrupt. Thus why do colonies termites perform better than human organisations?

The hypothesis is that control inefficiencies of complex systems consisting of complex systems are the reasons of failing. The intelligence of termites only resides in the collaboration and the framework of genetic programs whereas collaboration of human being is bound to an individual autopoietic cycle emerging its own agenda and social intelligence. Termites offer genetically programmed services and communicate by molecular clues. Human agents offer a rich variety of services and communicate by a manifold of media in parallel (e.g. speech and body language). While Termites cannot deviate from organising principles of the colony (and if they are extinguished) the indi-

---

ever and the dissemination via print media and nowadays via TV and Internet make these narratives even more effective. Strong narratives build communal embedding, confidence and orientation, a scarce good in uncertain times and opaque, complex environments. – The "*power of narratives*" also became the pattern for commercial brands (*Edvardson,* 1991) by telling "*multidimensional, multifaceted brand stories*" (*DBB,* 2005). Interestingly these strategies are discussed under the title of "*tribalisation*" (*Cova,* 2002), i.e. of a countermovement to globalisation and urbanisation aiming at reducing complexity of life. The same is with political convictions and the service of spin doctors. – Religious and marketing narratives have one in common: Their aim is to seal the respective system off from external influence, to restrict it to the one axiom. Bible (*Jesaja 45*) and almost Quran homonymic (*21:25*) say "*There is no god but I."* There is no curiosity allowed about alternatives! Admittedly no brand compare to the Bible; but the impetus of both claims for exclusiveness.

[5] Investment bankers and hedge-fond managers are considered to be rational – and then running like lemmings into a trillion Dollars bubble. Actually they are using left-brain tools (e.g. artificial intelligence and massive computing power) to achieve right-brain goals: making more money. In other words they are mistaken regarding the pragmatic power of their knowledge because they are mistaken regarding the reference actually guiding their decisions – probably except those who escaped from the disaster by successfully transferring the loss to the public. Also cynicism is self-referential. Bower and Christensen (*Bower 1995*) show how too close relationships (in the context here meaning: non-questioned self-referential cycles) between firms and customers create disaster in times of disruptive change. As an example take the current situation of automotive industry which is facing a fundamental change of the demand for mobility in core markets: Instead of buying cars, actually being immobile 90% of the day, more and more customers ask for mobility as a service, forcing car-makers to become service providers – or to leave contact to final customers to service providers.

vidual self-reference of human brains implies a need for freedom and the will and means to escape from enforced conformity.

Knowledge and intelligence (adaptiveness of knowledge) in the first instance are tied to people. Organisational knowledge networks are as rich and effective as knowledge is shared in the organisation. Organisational intelligence is a social exercise depending on motivation, social intelligence and supportive infrastructure. The self-reference of organisations is equal to the shared agenda, culture, the mainstream of thinking, rules conduct and best practices, implemented business processes and technologies. As far as human organisations emerge managerial roles, managerial excellence is very much about the art of aligning agendas and of growing social competencies.

The commercial relevance of autopoietic theory lies in the mission-criticality of 'brain-to-cash-cycles'. In economic contexts acceleration grows in competition driving the variety and the complexity of organisations and effort. (*Ashby, 1956*; on thermodynamic context see: *Kondepudi*, *1998*). In result control, i.e. management systems need to adopt more fundamental concepts explaining more than just the immediate impact and improving organisational intelligence as the only way to cope with a more complex competition. In economy and with this in social and political systems this acceleration raises the question how autopoietic processes are to be designed and managed in order to keep in pace with change in the relevant environments.

However although the theory of autopoietic systems offers unifying ideas how to enhance organisational intelligence it did not yet arrive in thinking about operations' management. The concepts have been applied e.g., to the historic analysis of economic systems (*Freier, 2007*), to the sociological analysis of corporate governance (*Klett 2005*) and to knowledge management, corporate culture or human resource management (*Seidl, 2005*), particularly contributing theory on organisational identity: "*The particular vision that was created can be summarised as follows: the concept of autopoiesis has allowed us to observe organisational identity and self-transformation from the perspective of the organisation itself*." (*P. 162*) *Kirsch* (*1992*) attempts a comprehensive approach integrating autopoietic and organisations theory, where organisational identity may be conceived as core element of corporate culture answering to the questions: Who are we? What justifies our existence?[6]

Acceleration is fuelled by interactions of two sources: the globalisation of markets and by technological innovation, mainly of ICT (Moore's Law) and Nano Technology. Both accelerators are autopoietic systems of their own origin. And they are coupled: Globalisation increases the swarm of brains searching for ideas how to exploit new technology. Vice versa technology (e.g. the Internet) enables globalisation and creates new arbitrages which feeding new business models. Together they establish positive, intensifying feed-back cycles joining in the 'paradox of technology' or in the words of Poullet (2006) "*The machine is the problem: the solution is in the machine*".

With the first stone cut technology is coded know-how. With the first elk skinned it has been the major source of making a living. Technology is the world largest and fastest growing repository of knowledge and any organisation is a socio-technical system. A ongoing race for better technology is driving up the complexity and due to Moore's Law now running at an unprecedented speed.[7] Most technological inventions ever been made in history of mankind have been made in the last 10 years. Acceleration means that this sentence likely will be true again in 10 years from now. Just some examples of current and expected innovations, which will be picked in the chapter on Technology that Thinks:

---

[6] This just an exemplification of adopting autopoietic thinking in economic science. *Freier* (*2007*) explains why China in the Sun-Dynasty (960-1279 A.D.) failed industrialisation and why instead this happened 800 years later in Europe. Avoiding Eurocentric explanatory patterns the autopoietic model allows developing a theory based on the endogenous developments of China and Europe of the respective time. *Klett* (*2005*), himself a son of an editor's family, elaborates a theory of family-owned businesses explaining the dynamics and consequences of paradoxes emerging from the social systems involved: on the side of the firm it is the paradox of birth and competence, on the side of the family the paradox of equal chance and selection. *Koskinen* (*2010*) analyses how and "where knowledge is created, adapted or reframed as well as used to produce project output" (foreword) in project-driven firms with typically changing organisational structures.

[7] Just software is delayed in exploiting these capabilities, indicating that organisations are lacking of know-why to use it.

- The 2020 generation of chips will offer up to 512 logic cores (*Hochberger, 2008*) enabling massive parallel processing on board of almost any device.
- Earlier IPv6, with $2^{128}$ = 340.282.366.920.938.463.463.374.607.431.768.211.456 addresses (*Zivadinovic, 2007*) will provide any relevant object in the Internet of Things with an identity.
- In summer 2011 at the Karlsruhe Institute of Technology the equivalent of about 700 DVD (26 Terabit) has been transmitted per second via optical cable connection (*Hillerkuss, 2011*).
- Both enable hybrid high-performance networks of things, human users and legacy-systems (*Rückemann, 2010*). Grids of multicore-devices will equal to current high-end computing.
- In-memory computing is likely to radically change rules of cloud-computing – which just has made its first steps of implementation. Accordingly to the CEO of SAP the new IMC-system "SAP Hana" has been implemented by lead-users like large health insurances or hospitals and e.g. accelerates the analysis of the DNS of a patient (about 2 Terabyte of data) by up to 500 times (minutes instead of days). Other applications show a potential to be accelerated by factors of 1000 to even 100.000 (*Snabe, 2012*).
- Just a day later Nanopore Technologies Ltd. (*Nanopore, 2012*), a UK/US-based venture publishes the market-ready availability of a device of the size of large USB-stick able of DNS sequencing if need be in minutes.
- Fabbing, a coinage made from fabrication and printing (3D-Printing), is a laser-sintering technology for largely digitalised production of material goods from different material, already used e.g., for on-site production of components for manufacturing or in medicine for the production of implants. (*Marcoux, 2012; Fabbing, 2011/2012 [a - d]*)

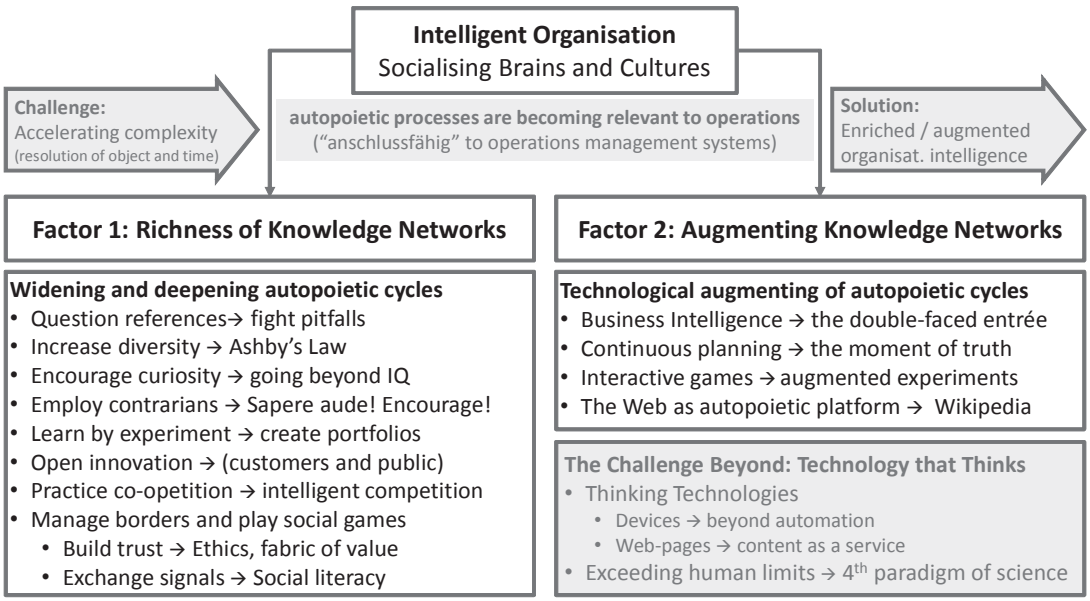



Figure 1

### The First Challenge: Proficiency in Enriching Sources

The examples listed in the previous chapter give an idea of dimension, speed and disruptiveness of change. In order to enable organisations developing an intelligence coping with its pace the first step is to enrich organisational autopoietic cycles, i.e. to provide more material to the game: more concepts, ideas, views and interpretations – the raw material of meaningful associations which make

a difference in terms of an organisation's objectives. On the other side more openness and wider horizons challenge the coherence respectively the "identity" of organisations: It needs rules, probably rituals, in short a culture and managerial excellence to balance. The figure the left side it lists a number of strategies enriching organisational autopoietic cycles proven in consulting projects:

***Question references and assumptions*:** Path-dependencies and overconfidence inhere from self-referentiality (assumptions and beliefs underlying perceptions as well as decisions). Risks are hidden in the long-tail of stochastic models (black swans), in rulebooks and best practices applied in daily business or in the implicitness of common sense. Nevertheless improving awareness of these pitfalls belongs to basic risk management growing best practice of questioning. Risk analysis proceedings applied in aviation industry can serve as model: E.g., airports and airlines run daily debriefings of operations. Aircrafts and infrastructures are subject of checks using mandatory schemes of detailed inspections depending e.g., in the case of aircrafts on flight hours as well as the number of stars and landings. If failures or weaknesses are identified binding instructions are issued by the company and / or by authorities – as all instructions also being subject of review. Obviously this proceeding is far to elaborated for most organisations. But it is as model not a system that could be copied and pasted. It is scalable (e.g. monthly debriefings) and is to be analysed and examined for transferable standards.

***Increase diversity:*** Ashby says that only variety can cope with variety. In that light monocultures are 'deadly sins'. Diversity in terms of gender, age, national or social background, education and disciplines, or experience is a complementary strategy to fighting pitfalls of self-referentiality by questioning: It increases not the number but the variety of brains raising questions. Since each one to a degree follows its own program it enriches the organisation by more knowledge, views, interests, intelligence, discipline … But it is not for free: it requires a corporate culture fostering both variety and communalities. Professionalism is the way of virtualising differences and offering a clear interface to peers: Different interests and views don't play a role in the job. On a simpler level political correctness provides a similar service. On the other side a basically well-meaning conduct of conflicts, i.e. taking a risk together and challenging each other – but than finding a common solution is the source of acquaintance and trust translating the tensions of diversity into an organisational strength.

***Encourage curiosity*:** A recent meta-analysis of 200 studies that examined the behaviour of about 50.000 students confirms that "*intelligence is the single most powerful predictor of academic performance*" but also proposes "*that the additive predictive effect of the personality traits of intellectual curiosity and effort rival the influence of intelligence*." (*Stumm*, *2011*) It should be noted that in is this study intelligence is defined by IQ-tests, i.e. more specific than the term used in this paper: intelligence as capability to adapt knowledge. The psychological perception disaggregates the construct of "intelligence" into a number of different kinds of intelligence + curiosity. In the holistic view of autopoietic systems curiosity it is a generic prerequisite of intelligence in terms of the openness and readiness to adapt. Intelligence separated from curiosity can also be used to seal off from external influence and to engage the enrichment of knowledge (see footnote 5). But also curiosity is no panacea for enriching autopoietics and overcoming self-referential traps. The finding that continuous effort, i.e. also discipline is required is also supported by latest research at Harvard University (*Killingsworth, 2112*).

***Employ contrarians*:** Sapere Aude! Dare reasoning.[8] *Kant* (*1784*) and enlightenment may be too wide on the first sight, but actually it means "Escape from common sense!" Lateral thinking is a facet

[8] "*Aufklärung ist der Ausgang des Menschen aus selbstverschuldeter Unmündigkeit. Unmündigkeit ist das Unvermögen, sich seines Verstandes ohne Leitung eines anderen zu bedienen. Selbstverschuldet ist diese Unmündigkeit, wenn die Ursache derselben nicht am Mangel des Verstandes, sondern der Entschließung und des Mutes liegt, sich seiner ohne Leitung eines andern zu bedienen. Sapere aude! Habe Mut, dich deines eigenen Verstandes zu bedienen! ist also der Wahlspruch der Aufklärung." (Kant, 1784. P.* 481) [Enlightenment is the exit of men from self-inflicted immaturity. Immaturity is the inability of making use of own intellect without guidance of somebody else. Immaturity is self-inflicted if this is not caused by a lack of intellect but by a lack of will and of courage to use the own intellect without guidance. Sapere aude! Have the courage to make use of your own intellect! therefore is the mottoe of enlightenment. – translation, ui]

of diversity. But it needs courage of thinkers and encouraging by the organisation. Please note the difference between contrarians and intriguers or obstructionists. Contrarians swerve from the mainstream and by this they provoke commons sense. Contrarians by nature ask time for dialogue and effort to accommodate "strange ideas". Actually they are intimate enemies of so-called experts. Proving the self-immunising effect of self-reference they may be treated as fools. Contrarians hardly make straight careers and most hold minor positions, hardly one authorising to interfere with norms. It is a vicious circle to the disadvantage of the people able of lateral thinking and of the organisation. To change the situation it needs a sensitive management understanding the value of contrarians. One should not be feared about that: Most contrarians don't expect a standard career. Rather they expect to be included into the discourse of alternatives. A simple but effective solution is to provide open, encouraging space for hierarchy-free horizontal and particularly vertical communication via blogs or, actually more effective, face-to-face in workshops or brainstorming cycles, e.g. hold twice a year. Results of these sessions should be transformed into small experimental projects (see below). There are fields where contrarians can take responsibility. If they are successful they may even become a backbone of a new mainstream. And hopefully they also become sensitive sponsors of new contrarians.

***Learning by experimenting*:** "*Knowledge is useless … until it has been translated into deeds*." (*Drucker*, *2004*, P. 3). Experimental learning is a bridge from idea to effective acting by testing validity and viability of ideas. Advanced and admittedly larger organisations run portfolios of experiments, some of them in parallel for testing alternatives on the same topic. And they have learned how to couple topics into R&D-portfolios. (*Huchzermeier, 2001*) The art is to substantiate metrics and milestones enabling decisions whether to abandon or continue a project respectively to invest into improvement of respectively to postpone that decision (so-called managerial options). However experimental learning reaches deeper than evaluating "What-now-decisions". It is a fundamental approach of acting under high complexity: "*Search theory describes how organisations address problems that are too complex to be solved through optimisation*." (*Sting, 2011.* P. 1) Depending on the degree of uncertainty different strategies and tools or workflows and roles apply. The list on the right side of the figure above includes a number of systems augmenting experimental learning.

***Open innovation*:** How to invite and team up with customers or the "interested public" in creating new value? Eric von *Hippel* (*1978*), one of the earliest theorists working on customer collaboration in the development of standardised industrial products, states that "*customers who need the product are difficult to identify through manufacturer-initiated action*." (P. 46) From here the concept of Leadusers developed (*Hippel, 1986*) and finally the concept of open innovation. "*Under this … model, economically important innovations are developed by users and other agents who divide up the tasks and costs of innovation development and then freely reveal their results. Users obtain direct use benefits from the collaborative effort. Other participants obtain diverse benefits such as enjoyment, learning, reputation, or an increased demand for complementary goods and services*." (*Hippel, 2011*) Lead-user management and open innovation build autopoietic cycles with customers based on practice of collaborative development of new value rather than on marketing narratives. Augmented by the Internet and social networks and other media open innovation takes place as continuous action and in real-time. "*The second event in the 'user innovation track' of our model is the transition from isolated user-innovators to a community of user-innovators who freely exchange information on their designs in real-time. By real-time, we mean that designers learn of other designs in time to influence their decisions to search or not on the next round*." (*Baldwin, 2006,* P. 9)

***Practice co-opetition*:** Competitors not only compete but also cooperate. Driven by the need of realising economies of scale e.g., automotive industry provides a manifold of examples. Based on game theory the "*co-operate to* compete" strategy (*Brandenburger, 2008*) offers win-win-scenarios between competitors. It makes e.g. sense to share exorbitant R&D-costs in fields without impact on customer decisions. E.g., Toyota delivers electric hybrid engines to and receives Diesel engines from

BMW. Both firms earn economies of scale and the exchange doesn't affect respective brands. Airline alliances are another example. There is almost no industry not practicing co-opetition.

But it may be two-faceted: If partners share knowledge they widen scopes but they also may reduce overall variety. Thus cooperating firms may together run into the trap they tried to avoid. E.g. the cooperation between the automotive firm PSA (Peugeot/Citroen) and General Motors with its German daughter Opel very much looks like an "alliance of the infirm": Both are suffering from the shrinking EU market.[9] (*ACEA, 2012*) And just in this market PSA and Opel continue to compete. Therefore most indicators say that a lack of alternatives made the car producers cooperate: it is a rescue mission rather than a proactive initiative. In contrast "*Successful business strategy is about actively playing the game you play, not just playing the game you find*." (*Brandenburger, 1995*).

***Manage Borders*:** Diversity, curiosity, lateral thinking, experimenting, openness, co-opetition – all strategies in some way include sharing of knowledge and crossing of borders between organisations and between individuals. Since individuality implies differentiation crossing of borders is to be balanced against the need to preserve individual or organisational identity. Thus what are the controls and how do they have to be used in order to guide decisions whether to collaborate and share – or not? This question marks the management level[10] of autopoietic cycles: E.g. co-opetition is about a game between market players and 'above' this game floor there are management floors where the switch is shifted from one to the other mode. But also the staff on the 'management deck' has to evolve the answer to the question on its own resources. There is no indisputable answer – but a chance to influence side-conditions of the decision: trust, and signals avoiding misapprehension.

**Trust** is the foundation of human personality (hopefully granted to a child by its family) as well as of social relations. As life teaches adults and organisations "*trust is a risky investment into relationships*" (*Luhmann, 1973*). Consider the impact if someone becomes aware that his negotiant or colleague is pursuing a hidden agenda or that his IT-system is corrupted. How has the "cold war" been managed and how can danger of war in the Near-east between Iran and Israel be mitigated? What induces EU banks hoarding almost 800 billion € on their central bank accounts?[11] These examples may make obvious, why the philosopher *Wittgenstein* came to the conclusion that "*Ethics is to be a condition in the world that compares to logic*." (*Wimmer, n/d*) Ethic behaviour can be understood as bound to reasons to refrain from doing something that could be done. Such reasons are called 'values'. Trust builds if values are shared. Ethics forms the platform of value sharing like logic builds a common platform of reasoning. Just rationality cannot avoid disasters.[12] It makes sense to invest into trust, also in terms of economics, because it "*is a social mechanism to reduce complexity*". (*Luhmann, 1973*) Trust is a source of information. It reduces uncertainty and enables acting. It is crucial to organisations, even for competitors or for enemies to build at least some trust. But because ethics is reason to abstain it is not for free. It needs courage and in some businesses it may have a

[9] GM strategy excludes the Opel brand from Asian and US markets; PSA never gained a significant foothold outside Europe. Asian markets are the fastest growing ones and exclusion implies significant losses of economies of scale.

[10] Note that also hierarchy-free organisations need to distinguish between operations and decisions about operations.

[11] September 15th 2008 the Lehman Bank crashed an in that moment world-wide financial industry was trapped in mutual distrust blocking almost any interbanking business, stalling the provision of liquidity to real economy and driving the world into the deepest economic crisis ever. The cause has been the biggest financial bubble ever driven by the massive misuse of Collateralized Debt Obligations which poisoned the industry. Everybody in banking and finance now knew that there are no assets but poison in the books. The interbanking market froze since no bank could know (and does not know until today) whether others would be able to pay back. Today in the EU state depth crisis, the European Central Bank again flooded the market with liquidity. But simple fear of risk makes banks hoarding most of the cash. (*Reuters, 2012*)

[12] In September 26th 1983 Станислав Евграфович Петров, a lieutenant colonel of the Soviet Army served as commanding officer of the Russian satellite surveillance system which in that night notified "СТАРТ NYCK" for at first and than fife American nuclear missiles. It was in the time that Ronald Reagan had called the Soviet Union to be the "evil empire". What if an American silo-commander would have gone loopy? But Petrow was aware of a number of false alarms and his gut feeling told him that America would not attack with just 5 missiles. So he decided to ignore the alarm – knowing that in case of error Moscow might have been incinerated some minutes later. (*Vowinkel, 2012*) Petrow acted right – not because he hazarded a Russian city (the attack was not to stop and the revenge would have followed anyhow) but because he did not act just logically but also ethically. A machine would have initiated the counter attack.

semblance of unloved lateral thinking. The reasoning of Wittgenstein can be validated by a simple thought experiment on options to escape from prisoner's dilemma.

***Play social games*:** *Signalling* is a strategy of building trust in precarious situations. Colonel Petrow was locked in a bunker and had no chance to receive informative signals. And the Americans had no reason to send signals because they had no idea about the failing of the Russian surveillance system. The means would have been available since 1963 Khrushchev and Kennedy agreed in a direct telephone line between the White House and the Kremlin. But since it is hard to distinguish between truth and fraud only the risky investment of trust to overcoming uncertainty: In a prisoners dilemma delinquents may outsmart the detective and exchange signals. How can they know that their peers do not cheat? Obviously as long as opportunistic behaviour prevails there is no escape from the dilemma since logic reasoning cannot overcome the ambiguity of communication. It needs reliable sharing of values and thus ethics building values and trust to create a win-win situation. Or in the wording of decision theory or of Luhmann: Trust reduces complexity by adding information.

Some years ago we discussed contributions of game theory to a theory of collaboration. Since it is a formal theory it just contributes mathematic algorithms for competitive as well as for collaborative games. It abstracts from the game as a social mechanism. But this simplification disables escaping from opportunism leading into the prisoner's dilemma: The decision whether to cooperate and to share or to compete on the expense of other agents takes place outside the formal game but nevertheless dominates its course. The widely practiced co-opetition strategy starts from the insight that competition and collaboration only can be joined if managements achieve a new mind-set (*Brandenburger, 2008*. P. 23). The decision which game to play is the first decision of the game: A game is social exercise and agents (software agents included) are also to learn about the choice of the game. Pure opportunism may make rich but finally it destructs its own fundaments.

Signalling to build trust by education is an alternative: It is called the tit-for-tat strategy where a second agent answers with a 'tat' to a 'tit' of a first one. In a primitive form it is the biblical "an-eye-for-an-eye" principle of equal revenge (*Moses, B.C.*), in its modern version it has been inverted by Kant's Categorical Imperative[13], which simplified can be phrased as "Don't do to others what you don't want to be done by others to you." To escape from the prisoner's dilemma the assumption is that agents involved chose a cooperative game and understand respective signals. A simple rule of signalling is that if 'tit' is positive also 'tat' will be positive, accordingly in case of a negative tit. Assumed that agent starts with a negative tit, the answer may provide an opportunity to think over the approach. To demonstrate goodwill the sequence may also be a tit-for-tit-for-tat, i.e. showing tolerance and offering time for learning. In case of a lack of sensitivity a tit-for-TAT, the zero-tolerance strategy, may apply.

Social intelligence is very much about social literacy: The variations on one side assume that the aggressive agent is able of learning and on the other provide an approach of experimental learning for the attacked agent how to respond in which context. If the game continues the parties have a chance to build a platform of shared values and collaborative behaviour. Organisational intelligence only emerges from intelligent people collaborating and sharing knowledge and ideas as well as from organisational frameworks fostering them. Organisational intelligence is a social exercise and social intelligence respectively social literacy therefore are its lubricants.

### The Second Challenge: Augmenting Autopoietic Systems

Answering to challenge complexity and change in the previous chapter options have been discussed how to *enrich* organisational autopoietic cycles. This chapter focuses options *augmenting* organisational intelligence. Again concepts are proven in respectively projections based on consulting practice.

---

[13] „*Handle so, dass die Maxime deines Willens jederzeit zugleich als Prinzip einer allgemeinen Gesetzgebung gelten* könne." [Always act in a way that the maxim of your will at any time may serve as principle of general legislation. - ui]

- Business intelligence is an entrée into technologies exploiting mass data and a primer of computational marketing taken up again in the last chapter on changing scientific paradigms.
- Interactive games are experimental strategies of shaping future (simulation-based planning), continuous planning may be the last resort of acting in the 'moment of truth'. Both segments deal with knowledge and complexity in immediate operations management.
- "Knowledge Integration" delineates an example of building shared knowledge in very complex technological venture in a global scale.
- The Wikipedia section builds a bridge towards the use of the Internet as enabling platform of autopoietic systems and prepares the next chapter on Technology that Thinks.

***Business intelligence:*** The term has been coined by the IBM researcher Hans Peter Luhm (1958): "This intelligence system will utilize data-processing machines for auto-abstracting and auto-encoding of documents and for creating interest profiles for each of the "action points" in an organization." Initially BI was restricted to corporate data-warehouses holding data collected by sales or purchasing departments respectively from documents exchanged or business transactions. In the meantime the Internet has become an ubiquitous infrastructure for any kind of collaborative intelligence. Internet-based BI is a legitimate source to retrieve information or to identify patterns and learn asking relevant questions. The semantic web still is a vision and relevant information is difficult to find in the masses of unrelated material or trash. Particularly the content of the internet is hardly accessible by quantitative methodologies. Now with the pervasiveness of Facebook, Google+, Twitter & Co. or of iTunes and apps in the mobile world this has changed. Internet-based BI has become double faced.

Social networks pre-organise and simplify collaboration as well as the sharing knowledge and opinion, in case reduced a like-it click. Among others it spares financial and programming effort of users. And social networks are not the only 'lime-twigs'. Google, Amazon, Apple & Co. also offer a manifold of cloud services. E.g. have a look at the blog on the Knowls project.[14] These invitations for sure are not for free. User data, more general: the renunciation of privacy is the currency services are paid with. Google will likely not spy calendars and emails of users but patterns of calendars or mails combined with further data may become a source of behavioural patterns.

Prima facie the business model of social networks seems to rely on contribution to advertisement. But looking at opportunities deriving from the masses of data users leave in social networks advertisement looks as an intermediate financing rather than a primary business model. Social networks become cash-machines by providing data about non-quantifiable behaviour which can be analysed with quantitative methods. In consequence there is an ongoing struggle between firms pushing business models which exploit arbitrages of free access to everything on one and organisations and people on the other side defending intellectual property rights and their privacy as well as ownership of their data.[15]

The claim for free access to content including the traces and comments ("like it") left by users pertains to the core of governance in the Internet: In the words of *Berners-Lee* (*2010*), the inventor of the Internet: "*The Web evolved into a powerful, ubiquitous tool because it was built on egalitarian principles and because thousands of individuals, universities and companies have worked, both inde-*

[14] There is no indication that this project has been continued. But it gives an idea of the principle: http://googleblog.blogspot.de/2007/12/encouraging-people-to-contribute.html

[15] In Germany a new political party, the „Piratenpartei" (pirates' party), has been founded shortly with the primary objectives of protecting the freedoms of the Internet and providing full transparency of governmental acting. The "Pirates" already entered a number of county and city parliaments (including a number of lager cities and of the state-capital of Lower Saxony) as well recently the Saarland state parliament with 7.4% of the votes. Current polls („How would you vote if there would be elections on next Sunday?") deliver estimates of 12 % for the party on the federal level. Although this success is owed to a considerable number of protest voters, there is clearly a strong fraction of all voters in favour of the democratic internet. Worldwide the Organisation of "Pirates Parties International" currently counts member or candidate organisations from 63 states world-wide. (*Source: http://www.pp-international.net/, retrieved April 2nd 2012*) These concerns also have induced regulatory activity of the Commission of the European Union. (*Reding, 2011*)

*pendently and together as part of the World Wide Web Consortium, to expand its capabilities based on those principles. The Web as we know it, however, is being threatened in different ways. Some of its most successful inhabitants have begun to chip away at its principles. Large social-networking sites are walling off information posted by their users from the rest of the Web. Wireless Internet providers are being tempted to slow traffic to sites with which they have not made deals. Governments - totalitarian and democratic alike- are monitoring people's online habits, endangering important human rights."*[16]

However it is not unlikely that Berners-Lee's wake-up call will not stand up to the massive financial interests carving out their territories and which are going far beyond the social networks. Major customers are large, world-wide operating marketing conglomerates like WPP[17], large manufacturers of consumer goods – and Hedgefunds.

Regarding the effectiveness of predicting consumer behaviour *Cova* (*1999*) said: "*The link is more important than the thing*." 2012 social network providers proof this sentence. Twitter just sold millions of tweets to Datasift, a UK-based platform offering the analysis of social-media data for commercial purposes. (*Forbes, 2012*) Amazon considers providing the same service on its own resources. (*NY Times, 2012*) In 2011 the Financial Computing Centre of the University College London started a research project called 'SocialSTREAM' developing analytic software "*to haul from millions of pages of digital chatter – from Facebook, Twitter, blogs and new stories – into a real-time archive which could be analysed for signs of the public mode, particularly in regard to financial markets*." (*Knight*, *2012*) Raw material is gathered in the clouds of the networks and transferred to the clouds translating them into relevant information substantiating the beds of Hedge-funds and beds of the marketing or product development strategists of manufacturers.[18]

**'Quants'** is the name of experts extracting patterns from huge masses of data. The SocialSTREAM project is about 'computational finance'. Further projects will be about 'computational marketing' exploiting consumer trends, 'computational healthcare' analysing medicinal transaction or about 'computational education' understanding and addressing deficiencies and 'computational politics' in preparation of the next polls strategies (probably funded by the Wall street).

Without any deterministic approach Quants develop knowledge about social, economic and political behaviour in a way significantly differing from conventional proceeding: "*With the quantity of data ... [and] with the networking of numerous touring machines and the manipulation of software by software [recursive algorithms] ... a new step has been done. Quantity changes into a new quality ...*." Replacing deterministic if-than modelling by probability and association "*makes it far more appropriate to the erratic, non reducible nature of human behaviour than anything that has been thought since Renaissance about "man". So even 'affective computation" (as it was called by W. Picard, MIT), i.e. the decomposition and recomposing of sentimental values like spontaneous acceptance, denial, excitation trepidation, animosity is becoming a machine issue*." (*Dath*, 2012 [translation: ui]) In other words patterns of users' thinking and feeling, of social autopoietic cycles are made visible by the Quants' touring machines in real-time.

But visibility of behavioural patterns implies the chance and in consequence the risk of manipulation. Like imaging techniques enable neurologists in animal experiments to control physical behav-

[16] There are widely known efforts of the Chinese or the Iran governments to control the Internet in order to control citizens. The US National Security Agency (NSA) is just about taking one of the largest Internet surveillance centres into service in Bluffdale, Utah. As far as passed through US servers this centre will read any SMS, any email or any entry into social networks – in real-time. (*Bamford, 2012*) Also the major application of the SAP-Hana in-memory computing solution likely will not be the sequencing of human DNS but the real-time analysis of traces users left in the internet.

[17] The WPP Group belongs to the world-wide largest conglomerates in the media and communication business with about 158.000 employees and 2.500 offices in 107 countries and an annual turn-over of 10 billion $ (Dec. 2011).

[18] In a private discussion in June 2011 the managing director of a market research unit stated: *„We need developing and implementing strategies based on a far deeper and earlier understanding of mainstreams as they build up in shaping consumer opinions and finally consumer behaviour. And based on this understanding we need to learn how to capitalise on these developments."*

iour by electric stimuli likely the real-time visibility of social patterns of thinking and feeling will be tested by communicative stimuli. Spin doctors of hedge-funds, marketing or politics will try taking influence. The addressees of Tim Berners-Lee, already today exclude content from their pages contradicting their commercial and governmental partners. The more likely they will perfect their cash-machines by shaping content accordingly to the narratives of spin doctors. And the latter will find ways to use the multi-media mix for disseminating their "spins".

***Continuous (real-time) planning:*** *The lifetime of information compares to dead fish* (no source). This fact has different impact to markets: While financial markets enjoy arbitrages deriving from dynamics and uncertainty by dealing derivatives or running speed trade with the clock-speed of processors[19] real-economy struggles with response-times and long-lasting commitments into capital intensive infrastructures and the implementation of decisions relies on response-times of resources or of conventional software systems. If an aircraft expected to arrive in some minutes and a dislocated passenger stair needed is 4 km away at the other end of the field the closest time to real-time is 20 minutes. I.e. the "compression of time" on one side translates into more chances to earn money with beds on risks or with even more transactions per second on the other one it translates into trouble. Most operations in real-economy are marked by a continuous floor of interference which, because of some unforeseen interactions, may run out of plan and sometimes out of control. In the moment of truth when it becomes obvious that the plan has failed real-time management responds with resources available.

If there is not much time the *parallelisation* of computing may be an intermediate solution. Current graphic processors like the NVIDIA Tesla GPUs support 128 parallel threads. Already by 2020 chips with 512 logic cores are expected. But most existing software is not designed for parallel computing. To a degree re-compiling and partially re-editing conventional software may serve as intermediate solution. The US-based firm VectorFabrics offers tools for auto-parallelising sequential software code. (*Vector, 2012*) But it will need generically parallel software architectures, e.g. following the model of Multi-agent systems which allow for high resolution of detail as well as organising the interaction of agents into holonic structures with many parallel threads or even parallel working interacting multi-agent systems. Also the development of web-services (*Karnouskos*, *2007*, see below: Technology that Thinks) follows a strategy inspired by the model of multi-agent systems.

'*Exemption policies'* are a second, operations-based strategy to accelerate at short response times. Airports and airlines have implemented exemption procedures, e.g. for the transfer of passenger baggage from a delayed incoming flight to continuing ones. The proceeding is more personnel-intensive and expensive but still cheaper than annoyed passengers. Only capabilities of keeping control of processes deviating from standards limit the complexity of policies. In the iC-RFID project[20] we developed in collaboration with the Airbus Cabin Design Centre and EADS a prototype multi-agent system which among others implemented policies catching up with service failures in air-catering. *Policies are the last resort of optimal planning* and they acknowledge that the validity of any optimum depends on the life-time of underlying assumptions. They imply *expected events*: a "*trouble, occurring frequently as well as being expensive enough to be tackled by an exemption procedure*"[21]. Policies are no compromises. They respond to the fact that in particular scenarios standard procedures are suboptimal.

[19] Fastest real-time information and even fully automated decision making systems operate in high-speed trade systems in financial markets. They take advantage from arbitrages which may just last for some minutes and may be quite small. But since the automated system is continuously fed by relevant data wherever they may have been produced in the world and able of decision making as well as executing transaction within seconds for large trade volumes they make thousands of trades per day an at the end return significant profits.

[20] Intelligent RFID-based Air-Catering Systems (iC-RFID), 2007 / 2010, research project co-funded by the German Federal ministry of Economy and Technology. – Also with EADS research we developed basics of internet-based MAS infrastructures for recovering aircraft rotations' (sequences of flights of an aircraft mostly planned for a day) from delays.

[21] A non-official definition of a senior supervisor at Cologne-Bonn Airport

If also policies fail '*improvisation'* is the last resort at all. It is the capability of achieving objectives in spite of unexpected events and with resources available. Improvisational solutions are to be feasible (implementable) and valid (obeying rules) but not necessarily optimal. Improvisation is based on intuition emerging from deep knowledge about business processes and capabilities of resources. In service systems formed by the collaboration of many providers also improvisation needs to be carefully orchestrated, it needs ad-hoc communication as well as knowledge and even intuition shared by decision makers even if they may be distributed across different organisations and places.

The iC-RFID system has been designed for response to unexpected events beyond the reach of pre-defined policies. It maps real-world objects with properties and relationships to other objects in the virtual world of software agents. (*Rzevski*, 2010) Plans are elaborated by negotiations as dialogues between agents who ask respectively offer services. E.g. a catering high-loader (a truck with a lifting platform) responds to a request for transport and now requests a free loading gate. Planning session ends when all agents are satisfied in terms of their individual KPI.

Unplanned events (delay of aircraft) now may affect at least one state of at least one agent and by this induce a sequence of new negotiations. In this process agents try to recover satisfying states. But the new set of states not necessarily is "optimal". Actually MAS do not have optimizing mechanisms except comparative optimisation, i.e. repeating simulations of a scene, comparing results and choosing the best one – if there is time for this proceeding. However if there is just a little time left and no policy available there is no to optimise because of the complexity of the problem and because of shortening response-times. In case of high dynamics an optimum is of theoretical interest only: The time to calculate is longer than the life-time of the plan and MAS negotiate feasible (implementable, limited by available resources) and valid (accordant with applicable rules) solutions.

However also in a real-time environment instead of an optimum '*exact points of reference*' matter: In an economic view particularly the decision to be made is to be precisely determined by two factors: In response to a chance (e.g. a new order) costs which are sunk in the very moment on one and the thresholds of costs to be covered in order to not increase the loss on the other side are to precisely identified and calculated. '*Contributions to margins*' are a model for structuring and tracking this context of economic decisions. 'Margins' can be interpreted as rules to determine sunk costs of operations (that what is spent or committed by previous decisions) on one and additional direct costs of a new decision (e.g. on a new offer) on the other side. The direct costs implied by the new decision are the bottom-line (the threshold of pain). Any surplus requires an educated bet about competition. If competition is tough price-buffers will be squeezed out. I.e. sunk costs entering price calculations may turn into a loss of the order at all – and of its partial "contribution to the margins". Improper calculation of both, lower and upper levels of the elbow-room of pricing can ruin a firm.

***Interactive Games:*** Experimental learning can be organised as portfolio of *real* projects which are carefully controlled along milestones. Based on their contributions to the value of the portfolio are subject of Darwinian selections (see *Huchzermeier, 2001*). But real-world experiments may not be possible, not allowed or too expensive. Simulation is an alternative and frequently a complementary methodology, too. Both proceedings are structured as recursive processes starting from initial options or models and feeding back lessons learned from real or simulative experiment into a more mature model to start the next iteration.

Since with increasing complexity regularly more objects are becoming relevant i.e. source as well as target of events the scalability of experiments or simulation to resolution of object and time is crucial. An example may be the ramp-up planning for the Boeing 787 "Dreamliner". To prepare a "Virtual Ramp-up System" (VRS) was implemented, a grid of simulators including operations across manufacturing sites of suppliers, final assembly lines of Boeing as well as logistics. As known the plan failed and the Dreamliner was significantly delayed.[22] Among others there was the problem with

[22] Take the Airbus A380 story as proof that the problem is not a Boeing-specific one. Currently we are planning a research project on developing and implementing the prototype of a complex multiagent-system for aviation ramp-up management linking strategic and tactical planning as well as real-time operations control into an adaptive management structure which

the "fasteners" (comparing to rivets) needed for connecting carbon-fibre reinforced polymer components. But the supplier of the fasteners run into problems, intermediate solutions failed certification, and the lacking fasteners became a serious problem of airframe assembly. On the top of all there was a problem to allocate delivered fasteners to those assembly lines which could actually use them.

Sure design / certification / manufacturing / sales / finance environments of airframers are too complex to be modelled in real detail. Boeing's fasteners likely were considered to be too tiny to model them in the VRS. Since discrimination of details relies on experience and statistical evaluation inevitably models imply long-tail risks, so-called black swans. Presumably the VRS failed the integration of black swans because effective interfaces between the knowledge growing in the brains of users, the ontology and the simulator(s) were missing. The system-wide consistent integration of details which have been not considered before is a prerequisite for designing a laboratory that supports early identification and evaluation of black swans (before they transmute into dragons). It requires technology which enables

- easily entering new classes of objects and processes with their properties and relations etc. into simulators / planners[23] and
- seamless processing across workflows of risk-management and the planning and implementation of decisions (identification, simulation-supported evaluation, operations re-planning and real-time operations control).

**The 'Knowledge Integrator':** The CargoLifter project (1995 – 2002) attempted the development of a very large airship for the transport of heavy and oversized goods. Despite remarkable progress the project failed because of financial problems in the so-called dot-com crisis in 2000 / 2002 but also because the complexity of this undertaking turned out to be largely underestimated. However efforts to tackle the complexity of this project also yielded new strategies of using interactive games:

The scope of the project spanned the markets of airframers (like Airbus: airship development), airlines (like Lufthansa: airship operations), infrastructure providers (like airports: infrastructures for the exchange of ballast against payloads at industrial sites, at river- or seaports or for parking), and of logistics service integrators (project forwarders), each again representing numerous domains of expertise.

Basically there were two teams: technical engineers working through the interdependencies among airship systems as well as of manufacturing on one and market engineers on the other side. The latter leveraged lead-user relationships and market knowledge, service strategies and structures of service-production, airship operations networks, and not at least substantiated relations to investors as well as lead-users by providing knowledge about market risk and chance, related effort, milestones and implied time-windows.[24] To support effective collaboration across this very heterogeneous community a tool for creating a shared semantics and knowledge-base was implemented.

The Knowledge Integrator was designed as ontology-based multi-agent system simulating CargoLifter Airship in realistic operations' scenes in the model of a continental network in cross-modal cooperation with shipping companies (inland and sea). The physical performance of the airship (more than 100 parameters), was defined on the base of technological knowledge. E.g., if engineers consid-

---

enabling integrating so-called late-change requests and other non-expected or neglected events when they occur. These black swans largely dominate the ramp-up of large aircrafts. Particularly the concept of learning curves fails in this environment. Pattern recognition and 'instant learning' are mandatory: Each aircraft development, thus each ramp-up hardly compares to previous ones, among others because new technologies (e.g. CFRP structures in the latest versions) and new production systems and certification proceedings have been implemented.

[23] We call it the WYKIWYG principle: What You Know Is What You Get. About 20 years ago *WYSIWYG* in that time made sure that *What You See Is What You Get,* i.e. that print-outs were equal to the representation of e.g. a text on the screen. Now the problem is to make sure that the representation of the problem of the scene in simulators or planners is homologous to the representation in the brains of users. The initial information about black swans and considerations on their structure and impact will come from risk-aware people who need to be enabled to validate and evaluate their concerns. By the way: Swans may have more colours than just white (considered) or black (not known): In the long tail also chances to improve are hidden and they also should be evaluated and taken to action.

[24] The volume to be substantiated was about 0,4 billion € by 2002 with an horizon of at least 3 billion € by 2010.

ered the implementation of alternative propulsion systems or load-exchange procedures the related performance parameters (properties) of the virtual fleet of airships were adjusted.

The economic performance of model-operations relied on extensive data about projects and revenues derived from global market surveys and more than 60 use studies with industrial lead-users from 15 countries, the estimated physical performance of the airships in flight and ground operations, the network to be operated and the estimated operations costs (about 90 cost parameters).

Experiments were organised to either economically validate planned milestones marking expected quality of achievements at a specific point of time or to analyse the economic impact of shortcomings and alternatives. The logic of validation was based on real-options theory (*Huchzermeier, 2001*) and had been elaborated in a comprehensive research project.[25] Already in tests with the first version of the "Knowledge Integrator" the participating teams step by step elaborated common ideas of interdependencies and a sense for good and bad estimates as well a strategies for proceeding. And the model significantly contributed to positive results of five large financial due-diligence projects by major banks and industry. There are three lessons we learned from the Knowledge Integrator.

- Ontology-based simulation is a great instrument for collaborative experimental learning e.g. for testing ideas and new designs with respect to real-options models controlling the progress of the project. Stress-testing of operations layouts is another application which at least implicitly was executed in simulations explained above.
- Interactive simulation effectively captures tacit knowledge and growing shared knowledge across a heterogeneous network of participants (technical engineers, business scientists, lead-users, investors, analysts …). As explained the understanding of interaction of technology and market driven operations gradually improved in a widely unknown area of technology.
- We experienced that knowledge grows by use and sharing – as well as that perception and response to open issues and new information (adaptiveness) increased.

***The model of Wikipedi*a:** Building organisational knowledge implies organisational discourse. In the CargoLifter project this discourse has been structured by growing a simulation model running on a single server.[26] But collaborative knowledge building will also self-organise if there is motivation and an effective communication infrastructure: the Internet. Among others there are numerous internet blogs or forums for sharing content and inviting for discourse. The Internet also enables ad-hoc communication (Skype conference) or forms of temporary collaboration. These structures may restrict participation or be open to the public. But in any case they establish autopoietic processes across their members or users just by offering the chance of doing it.

Wikipedia may be the most prominent example of a collaborative venture with the encyclopaedic pretention of providing a repository of knowledge that is open to everybody as well as growing and learning. *Pankowska* (*2011,* p. 34) describes Wikipedia to be "*considered as self-productive, self-organizing and self-referential knowledge system*" and "*an ongoing work in which, in principle and in particular, older articles tend to be more comprehensive and balanced, while newer articles may contain significant misinformation*."

Wikipedia projects also establish self-controlling structures with regard to the integrity (protection against forgery) and quality (relevance, correctness …) of articles. Attention and commitment of the community of editors and the public are major tools of control. Consequently "*more intense patterns of cooperation in the high-quality articles*" are the source of quality (*Wilkinson, 2007*).

The German section e.g. defines supervisor roles: 'checkers' [*Sichter*] for basic control, 'assayers' [*Prüfer*] for expert control and for commenting on articles, or 'bureaucrats' [*Bürokrat*] entitling

[25] ADVENTURES (Assessment of Dynamic Ventures Using REal options in Services, 2000-2004) initiated by CargoLifter and the Beisheim School of Management (Koblenz, Germany), in collaboration with INSEAD (Fauntainebleau, France), The Wharton School (Philadelphia, USA), funded by the German Federal Ministry of Economics and Technology.

[26] It was planned to grow a grid of interacting simulators (a holonic MAS-architecture), each simulator specialising on one domain, besides network operations e.g. ground infrastructure layouts, airship systems and components, airship operations or airship production and its ramp-up.

checkers and assayers. Bureaucrats are elected by users on special Wikipedia-org web-pages; checkers and assayers as well as voters need to achieve particular levels of participation. (*Rühle, 2008*; *Wikipedia-org, n/d*) Self-control is not effectless: A study comparing the German Wikipedia with the online edition of Brockhaus, a major German encyclopaedia, came to the result that in the fields of politics, economy, science, sports, culture, entertainment, geography, medicine, history, and religion Wikipedia may even be better. (*Süddeutsche,* 2007)

**The Challenge Beyond: Technology that Thinks**

The previous examples show how growing as well as application of knowledge may be augmented by ICT. This chapter shall show that technology may be about to achieve a new quality and emerging a new challenge to its inventors. Technology is knowledge coded in hard- or software and it is part of the human autopoietic system. Always the innovation from the previous day has become the soil of new challenges and new innovation. So far this was driven by human invention only: Man made a tool from the stone. On its own resources also the stone as any other technology did not become inventive.

Artificial, particularly bio-inspired intelligence raised technology to the level of termites, still stupid – but collaboratively able of an amazing performance. Computer intelligence is able of running recursive, self-referential algorithms much faster – but with the exception of high-performance computing – with current capacity it is restricted to small problems. Technology is coded know-how but lacking any self-inventive mechanism. And even if technology still might lack know-why. *This* may change. Future technology – introduced above as major driver of change, complexity and demand for intelligence – may take an active role in future autopoietic systems.

***From the Internet of Things to the Internet of Technology that Thinks:*** The vision of the IoT includes ideas like car-to-car communication for traffic control and navigation or future aircraft-to-aircraft air traffic management (*Hotham, 2011*). It includes concepts of the intelligent home or the smart electric grid[27] as well as automation in factory and logistics environment by connecting related infrastructure of sensors, actors and management systems gathering and process data on unplanned events to synchronise system-wide response in almost real-time (see: *Karnouskos, 2007*).

Things will be providers and consumers of web-services and finally able of agent-like problem solving by negotiations rather than being coordinated via SCADA systems[28] with central and rule-based processing of data. "*This new breed of devices will not only be able to store and report information about themselves and their physical surroundings, but execute more computations and local logic. They will form collaborative peer-to-peer networks and also connect to central systems. By eliminating media breaks, e.g. by replacing manual data entry with a direct connection to devices, this "internet of things" will feature end-to-end connectivity, making the models of the real world, as they exist in business systems, follow reality more precisely and with shorter delay*." (*Karnouskos, 2010.* P 423)

However future devices may have CPUs on board with up to 512 logic cores, representing more power as many current servers have installed. They may run applications in parallel or even local multi-agents systems. Services they provide or ask will become more complex. This is the vision of the Internet of Technologies that Think (iTtT)[29] continuously or on demand forming collaborative systems in the Internet connected by terabit networks. Likely future operations systems will achieve self-awareness and become self-learning or self-protecting and even self-designing. Parallel to ongoing operations management things may run local as well as collaborative simulations to optimise the network of services. In factory, logistics and multi-modal transport environments the network may decide what to produce in which place and how to deliver. To grasp the potential impact is crucial to

[27] For quick information see http://en.wikipedia.org/wiki/Smart_grid
[28] Supervisory Control and Data Acquisition, a factory automation system gathering for central control
[29] Later we shall call them „Intelligent Artificial Termites"

see the iTtT development in the context of other technologies like the flexibilisation by the increasing digitalisation of the production of material goods (*Fabbing*, *2011/2012*) or by new, self-organising nano-materials.

***Web-pages – content as a service:*** In the Internet of Things cars, aircrafts, sensors or management systems provide, search and use content. They are artificial intelligent termites connected by web-services, the lingua franca of the internet marked by a service-oriented grammar (SOA). But by far the most content in the Internet is composed in web-pages which are not yet easily accessible by computers or organised as services. (*Iksold, 2007*) Also in 2012 the semantic web is still under construction and largely limited to tags, thesauruses, standardised ontologies or to the sharing of bookmarks.

Computers still cannot interpret natural language since there is a lack of access to structural information and / or of algorithms of semantic composition. (*Giesbrecht, 2012*)[30] Web-pages are a mix of content and code for lay-out and rendering and not designed to provide their content as a service. This is about to change with the introduction of "Web 3.0" meaning that "*major web sites are going to be transformed into web services – and will actively expose their information in the world*." As example he refers to Amazon's WebOS strategy opening "*access to the majority of items in Amazon's product catalogue. The API is quite rich, allowing manipulation of users, with lists and shopping carts. However its essence is the ability to lookup Amazon's products*." (*Iksold, l.c.*)

Back to an e-science environment the same could be done by scientific libraries, publications in the web, by Wikipedia or any other scientific repository. And it will become the more essential the more complexity and particularly technological progress dissolve borders between scientific disciplines. There are converging technologies – thus converging sciences. Inspiring ideas and initiatives are more likely born in diverse, interdisciplinary settings, i.e. by widening rather narrowing scopes. And deep insight emerged from deep scope will gain power only by dissemination, i.e. by becoming anschlussfähig in a wider audience.

As discussed: Under conditions of increasing complexity any organisation is required to improve the effective scope and the efficiency of its autopoietic structures in order to become meaningful in extended discourses, to encourage cross-border activity and to overcome lock-ups in specialists' tracks – without loosing advantages of specialisation. Is the meaning of "computational science" (*Knight*, *2012*; *Dath*, *2012*) that interacting Services of a future Knowledge-Web may become the infrastructure of a meta-science finding and exploiting common patterns of fragmented disciplines – the same way as 'computational healthcare' of 'computational education' identify epidemic patterns or lacks of professional advancement? Will it as a kind of 'computational politics' become a tool of future European Research Framework Programs to analyse and direct research activity?

What will be the future of scientific and all web-pages, at least in direction? They may become more "pushy" and develop strategies similar to Amazon extending their linkage in the net. In science it may be more complicated since scientific content needs more explanation than commercial content. But also more discipline is to be expected. Linking more and more pages into autopoietic on the other side may also become an alternative or a complement to Wikipedia. The European **e-Science** program[31] wants to make the mobility of knowledge to be the fifth freedom of the community opening up new perspectives for collaboration of European and global research societies e.g., by developing an ecosystem of digital repositories and grids connecting researchers' workflows.

Pull-strategies may be applied as well. *Iksold* (*l.c.*) continues with describing an alternative to transforming web-pages by API into web-services: scraping. It is a kind of reverse engineering for

[30] In a talk to post graduates of the Karlsruhe Institute of Technology (Feb. 2012) Giesbrecht presented a tensor based model "that accounts for order-dependent word contexts and assigns to words characteristic matrices such that semantic composition can be realized in a natural way via matrix multiplication." Tensor based models extend vector-based models of meaning (exploiting similarities of words). *Firth* (*1957*) states that "a word is known by the company it keeps" which may be very close to the idea that 'meaning is an emergence of a self-referential cycle maintained by the company'.

[31] http://europa.eu/legislation_summaries/information_society/internet/si0006_en.htm

extracting content from html-code. He continues: "*Scraping technologies are actually fairly questionable. In a way, they can be perceived as stealing the information … it is unclear where copy/paste ends and scraping begins. It is okay for people to copy and save the information from web pages, but it might not be legal to have software do this automatically. But scraping of the page … without crediting the original source is unlikely to be legal.*" However it is possible and it is increasingly done for commercial purposes. Accordingly to The Wall Street Journal (*Angwin, 2010*) "*the spending on data from online sources is set o more than double, to $ 840 million in 2012 from $ 410 million in 2009.*"

**A scenario:** Assumed a researcher is just about to start a new project in a new or in one undergoing fast change and with interdisciplinary aspects. In the planning meeting he makes notes and downloads presentations with a multicore UNIPs (U-Name-It-Pads). Already during the conference 'ARA', the autonomous research application, starts checking with local resources and in parallel internet search for candidates relevant for further dialogues by following web-page services or asking future equivalents to scraping services for support. In search for patterns ARA also may find, suggest or even organise computational science services.

The "cyber-infrastructure" (US jargon) of intelligent devices will emerge an additional layer of collaborative intelligence in the internet. In the first instance the internet becomes a real-time environment for secondary research, developing further sources of knowledge and establishing developing structures. Comparing to Muggelton's chemical Turing machines UNIPs of researchers involved will form a grid and reduce findings to initial model and hypothesis … In future likely any trader in financial markets as any researcher in any domain may be cleverer than his UNIP or the society of UNIPs.

***Exceeding Human Limits:*** Computational finance (see: SocialSTREAM; *Knight*, *2012*) and equivalents like computational marketing have already been introduced above in the section on business intelligence. In March 2006 the science journal *nature* (*2006,* Pp. 416–17) featured a number of papers and commentaries. E.g., R. *Brent* (*2006*) and J. Bruck posed the question "*2020-Computing: Can computers help to explain biology?*" As exemplary answer they "*envision a new approach to species distribution prediction: publishing both observe species presence / absence data and prediction models as Web services and then chain these Web services as scientific workflows.*" The *Nanopore* (*2012*) DNS sequencer mentioned above in the list of current breaking technologies is a chemical touring machine "*reducing the experimental cycle time from hours to milliseconds*".[23] It proves that Muggelton's predictions come true 6 years later. There are many examples suggesting that technology step by step is crossing the border from passive to active knowledge, from depending on human autopoietic cycles and being a product of self-referential innovative human processes towards at least basic capabilities contributing to the scope of human autopoietic cycles.

Under the title *"2020-Computing: Exceeding human limits" Muggelton (2006, Pp. 409–410) continues "Future advances will have the ability to yield powerful new forms of science that could blur the boundaries between theory and experiment."*[32] Future, massive parallel computing capabili-

[32] „*Meanwhile, machine-learning techniques from computer science (including neural nets and genetic algorithms) are being used to automate the generation of scientific hypotheses from data. … Some of the* ***more advanced forms of machine learning enable new hypotheses****, in the form of logical rules and principles, to be extracted relative to predefined background knowledge. … The resulting 'probabilistic logic' [from integrating mathematical logic and probability calculus. - ui] is a formal language that supports statements of sound inference, such as 'The probability of A being true if B is true is 0.7'. … One exciting development that we might expect in the next ten years is the* ***construction of the first microfluidic robot*** *scientist, which would combine active learning and autonomous experimentation with micro-fluidic technology. … Such chips contain miniature reaction chambers, ducts, gates, ionic pumps and reagent stores, and allow for chemical synthesis and testing at high speed. We can imagine miniaturizing our* ***robot-scientist technology*** *in this way, with the overall goal of reducing the experimental cycle time from hours to milliseconds. [compare: Nanopore, 2012 - ui] The* ***chemical Turing machine*** *would be a universal processor capable of performing a broad range of chemical operations on both the reagents available to it at the start and those chemicals it later generates. … Just as Turing's original machine later formed the theoretical basis of modern computation, so the programmability of a chemical Turing machine would allow a degree of flexibility far beyond the present robot-scientist experiments, including complex iterative behaviour. … One can* ***imagine an artificial cell based on a chemical Turing machine*** *being used as an alternative to in vivo drug testing. The program running this machine would need to contain*

ties on combined local and global level drive chances of emerging autopoietic cycles of technical systems manipulating information rather than depending on human intervention. Technology is not (yet?) about to achieve human capabilities. But it may become more intelligent than termites. In any prediction lies speculation, but concepts as well as effective progress significantly exceeding the scope of current "small world" (*Milram, 1967; Travers, 1969*) applications in factories and logistics prove the development and on the top of this give an idea of the influence of technology on the dynamics of open large-world knowledge-network.

The new development has been identified by Microsoft research as the "*forth paradigm of science"*[33]: *"A touring-machine, i.e. a system calculating accordingly to strict rules (algorithms) enables abbreviating the description of processes in the dimension of time, in plain language: prediction. With the immense volume of data which nowadays is processed that way, with networking of numerous touring-machines and with the manipulation of software by software this third step, as correctly recognised by Microsoft research, a forth one has emerged: Quantity translates into a new quality - just as one cannot make a headdress from two hairs but from thousands." That what now looms is the coalescence of theory, experiment and simulation, i.e. of inductive and deductive methodology which preliminary may be rather palely called "data exploration". (Dath, l.c.)*

But as in the example of business intelligence are may experience another double-faced phenomenon: ***the distraction of scientific results from the scientific discourse by computational sciences***. There is indication that computational research is about to slip away from the scientific discourse: "*Scientific communication relies on evidence that cannot be entirely included in publications, but the rise of computational science has added a new layer of inaccessibility. Although it is now accepted that data should be made available on request, the current regulations regarding the availability of software are inconsistent. We argue that, with some exceptions, anything less than the release of source programs is intolerable for results that depend on computation. The vagaries of hardware, software and natural language will always ensure that exact reproducibility remains uncertain, but withholding code increases the chances that efforts to reproduce results will fail*." (*Darrel*, *2012*).

## References


[1] ACEA (2012). Passenger Cars: Registration drop by 9.7 % in February. European Automobile Manufacturers Association, press release March 15th 2012. Retrieved March 15th 2012. From http://www.acea.be/

[2] Angwin, J.; Stecklow, St. (2010), 'Scrapers' Dig Deep for Data on Web. The Wall Street Journal. October 11th 2010. Retrieved Jan. 30th 2011. Online: http://online.wsj.com/article/SB10001424052748703358504575544381288117888.html#printMode

[3] Ashby W.R**.** (1956). An Introduction to Cybernetics. London, U.K.: Chapman & Hall Ltd. Retrieved: June 21st 2011. Online: pcp.vub.ac.be/books/IntroCyb.pdf


---

*algorithms both for controlling the experiment and for conducting the cell simulation. It would represent a fundamental advance in the **integration of computation with its environment**. … However, one can imagine taking the integration between experiment and environment even further. In particular, by connecting the input and output ducts of the microfluidic Turing machine to the chemical environment of a living cell, one could **conduct experiments on cell function**. Such levels of close integration between computers, scientific models and experimental materials are, however, still a decade or more away from becoming standard scientific practice." (Muggelton, 2006,* Pp. 409-410) [ui = inserts by U. Inden]

[33] The first paradigm goes back to the Ionian philosophy of Thales of Miletus (Τηαλεσ οφ Μιλετ ab. 624–546 b.C., the first and major representative) taking the view that the world can be explained with the means the world provides particularly by experiment, i.e. without referring to Gods. The second one is owed to Galileo or Newton representing the paradigm of mathematical description and explanation of natural phenomena (and widely emulated by social and particularly economic sciences). The third paradigm is marked by touring machines, the major architecture of software-based intelligence, applying recursive algorithms to the data about a domain. It is exemplified by the SocialSTREAM project. The forth paradigm now is emerging from the interaction of thousands and millions of touring machines. (*Dath*, l.c., Dietmar Dath is a German author and scientific journalist.)

[4] Baldwin, **C.;** Hienerth, C.; Hippel E.v. (2006). How user innovations become commercial products: a theoretical investigation and case study. HBS Finance Working Paper No. 876967. Retrieved Dec. 12th 2010. Online: http://www.people.hbs.edu/cbaldwin/DR2/BHVRODEOKayakHBSWPv2.pdf

[5] Bamford, James (2012). The NSA Is Building the Country's Biggest Spy Center (Watch What You Say). WIRED magazine. Privacy, Crime and Security Online. Published and retrieved March 15th 2012. Online: http://www.wired.com/threatlevel/2012/03/ff_nsadatacenter/all/1

[6] Berners-Lee, Tim (2010). Long Live the Web: A Call for Continued Open Standards and Neutrality. Scientific American. Nov. 22nd 1020. Retrieved Jan. 12th 2011.
Permanent Address: http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=long-live-the-web

[7] Bower; Christiansen (1995). „Disruptive Technologies: Catching the Wave". Harvard Business Review, Jan/Feb 1995. Retrieved: March 1st 2011. Online: www.cc.gatech.edu/~spencer/courses/ethics/misc/bower.pdf

[8] Brandenburger**, A.**; Nalebuff, B. (1995). The Right Game: Use Game Theory to Shape Strategy. Harvard Business Review. Retrieved Dec. 12th 2009. Online:http://www2.dse.unibo.it/mantovan/Harvard%20Business%20Review%20-%20Using%20Game%20Theory%20To%20Shape%20Strategy%20(1995).pdf

[9] Brandenburger**, A.**; Nalebuff, B. (2008): Co-Opetition: A Revolution Mindset That Combines Competition and Cooperation: The Game Theory Strategy That's Changing the Game of Business. Currency Doubleday, New York. ISBN 0-385-47950-6

[10] Brent R**.;** & Bruck, J. (2006). 2020 Computing: Can computers help to explain biology? Nature 440, P. 416-417. Doi: 10.1038/440416a

[11] Cerutti, Herbert (1998): Ein Haus wie ein Berg, Termiten errichten gigantische Bauwerke. NZZ Folio 08/98 Thema: Grossbauten. Retrieved: March 4th 2012. Online available: http://www.nzzfolio.ch/www/d80bd71b-b264-4db4-afd0-277884b93470/showarticle/18c3307a-de8b-4903-ae34-076abce59a9e.aspx

[12] Cova, Bernhard (1999). From Marketing to Societing: When the Link is More Important than the Thing. In: Brownlie, Saren, Wensley, Whittington (Editors): Rethinking Marketing, Towards Critical Marketing Accountings. Sage Publications Ltd, London. ISBN 0-8039-7490-6. Pp. 64-83

[13] Cova, Bernhard; Cova Veronique (2002). Tribal Marketing: The tribalisation of society and its impact on the conduct of marketing. European Journal of Marketing. Vol. 36, Iss. 5/6, pp. 595-620.

[14] Darrel **C.,** Hatton Ince Leslie, Graham-Cumming John (2012). The case for open computer programs. Nature 482, p. 485–488 (23 February 2012) doi:10.1038/nature10836

[15] Dath, Dietmar (2012). Teurer Irrtum: Gemeinwissen gegen Geheimwissen. Frankfurter Allgemeine Zeitung, FAZnet March 23rd 2012. Retrieved March 23rd 2012. Online: http://www.faz.net/aktuell/feuilleton/teurer-irrtum-gemeinwissen-gegen-geheimwissen-11700677.html

[16] DDB (2005). Brand Narratives, Positioning in the time of media fragmentation. DBB Worldwide Communications Group Inc. The Yellow Paper Series. Retrieved Feb. 5th 2010 Online: http://www.ddb.com/pdf/yellowpapers/DDB_YP_BrandNarratives_0108.pdf

[17] Drucker, Peter F. (2004). What makes an Effective Executive. Harvard Business Review, Reprint (Product 6980). Retrieved Dec. 15th 2011Online: http://hbr.org/2004/06/what-makes-an-effective-executive/ar/1.

[18] Edvardson, Bo (1991). Values-based service brands: narratives from IKEA. In: Managing Service Quality. Volume 16, Iss. 3, pp. 230-246. Emerald Group Publishing Limited. ISSN: 0960-4529

[19] Einstein, Albert (1932), Source: New York Times, Magazine, "Tomorrow Never Knows", 9/29 1996 Online: http://www.nytimes.com/1996/09/29/magazine/tomorrow-never-knows.html

[20] Fabbing (2011/12). All retrieved March, 8th 2012
[a] http://www.faz.net/aktuell/feuilleton/aus-dem-maschinenraum/3d-drucker-die-ersten-replikatoren-11107670.html – 3D-Drucker: Die ersten Replikatoren
[b] http://wsutoday.wsu.edu/pages/publications.asp?Action=Detail&PublicationID=29002
3D printer used to make bone-like material (video)
[c] www.engadget.com/2011/09/20/makerbots-turtle-shell-racers-cruise-around-our-offices-video/ printing of a turtle-shell-racer (a "Bobby-Car" toy)
[d] http://www.spiegel.de/wissenschaft/medizin/0,1518,druck-813885,00.html
Frau erhält neuen Unterkiefer aus 3D-Drucker.

[21] Forbes (2012). Twitter To Sell Your Old Tweets. Online available:
http://www.forbes.com/sites/davidthier/2012/02/29/twitter-to-sell-your-old-tweets/print/

[22] Freier, Axel (2007). Multi-Kondratieff-Cycles in Chinese Economic History. A Holistic Theory about the Innovative-iterative Evolution, the Development and the Autopoiesis of Economic Systems. Universität Marburg Fachbereich Wirtschaftswissenschaften. urn:nbn:de:hebis:04-z2007-03520

[23] Hippel, Eric v. (1978). Successful Industrial Products from Customer Ideas, Presentation of a new customer-active paradigm with evidence and implications. Journal of Marketing, Jan. 1978. Retrieved Jan. 22nd 2009. Online: http://web.mit.edu/evhippel/www/papers/evh-01.htm
[24] Hippel, E. v. (1986). Lead Users: A Source of Novel Product Concepts. Management Science 32(7), Pp. 791–806. http://web.mit.edu/evhippel/www/papers/Lead%20Users%20Paper%20-1986.pdf
[25] Hippel, E. v. (2011). Open User Innovation. In: Soegaard, Mads and Dam, Rikke Friis (eds.). "Encyclopaedia of Human-Computer Interaction". The Interaction-Design.org Foundation .
Online at http://www.interaction-design.org/encyclopedia/open_user_innovation.html
[26] Holmgren, S. (2011). The Nordic e-Science Globalisation Initiative. Keynote Presentation. Norden 2011 eScience Conference Sept. 29th – 30th 2011, Helsinki. Retrieved 12. Dec. 2012. Online: http://www.csc.fi/english/pages/escience/pdf/HOLMGREN_SVERKER_eScience_2011
[27] Hotham, P. (2011). SESAR & NextGen Working together for Aviation Interoperability. Presentation to the Royal Aeronautical Society Annual Conference, London, April 14th 2011
[28] Huchzermeier, A**.;** Loch, C. (2001) "Project management under risk: using the real options approach to evaluate flexibility in R&D." Management Science, 47(1): 85-101
Online: http://bbs.cenet.org.cn/uploadimages/20031020158334585.pdf
[29] Hutter, M**.** (1989). Die Produktion von Recht. J.C.B. Mohr, Tübingen. ISBN 3-16-345499-2
[30] Huxley, A. (1932). Brave New World. Chatto and Windus (London). ISBN ISBN 0-06-080983-3
[31] Iskold**, A.** (2007). Web 3.0: When Web Sites Become Web Services. Read Write Web. March 19th 2007. Retrieved Mar. 12th 2012.
Online: http://www.readwriteweb.com/archives/web_30_when_web_sites_become_web_services.php
[32] Kant, Immanuel (1784). Beantwortung der Frage: Was ist Aufklärung? In: Berlinische Monatsschrift. Dezember-Heft 1784. Pp. 481-494. Online:
http://www.uni-potsdam.de/u/philosophie/texte/kant/aufklaer.htm
[33] Karnouskos, S.; Baecker, Oliver ;Moreira Sá de Souza, Luciana; Spieß, Patrik (2007). Integration of SOA-ready Networked Embedded Devices in Enterprise Systems via a Cross-Layered Web Service Infrastructure. in: Emerging Technologies and Factory Automation. ETFA. IEEE Conference. Pp. 293 – 300. E-ISBN: 978-1-4244-0826-9, Print ISBN: 978-1-4244-0825-2. Retrieved: June 29th 2010. Online: http://www.socrades.eu/Documents/objects/file1192208072.69
[34] Karnouskos, S.; Savio, D.; Spiess, P.; Guinard, D; V. Trifa, V.; O. Baecker, O (2010). Real-world Service Interaction with Enterprise Systems in Dynamic Manufacturing Environments. In: Artificial Intelligence Techniques for Networked Manufacturing Enterprises Management. ISBN 978-1-84996-118-9, Publisher: Springer, Pages: 423–457. Retrieved Sept. 22nd 2011. Online: http://vs.inf.ethz.ch/res/papers/dguinard-manufacturing-book.pdf
[35] Kauffman, Stuart (2010). Das ist Futter, das ist Gift. Interview, Der Spiegel, 1 / 2010, pp. 120-122.Online: http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-68525308.html
[36] Killingsworth, M. (2012). Dem Glück auf der Spur. Harvard Business Manager, April 2012. P. 42-43. (Dissertation, Harvard University)
[37] Kirsch, Werner (1992). Kommunikatives Handeln, Autopoiese, Rationalität. Kirsch, Herrsching, Munich. Second edition 1997. ISBN 10-3882320664
[38] Klett, David, (2006). Zwischen Kompetenz und Herkunft - zwischen Gleichheit und Selektion. Paradoxe Anforderungen an Familienunternehmen und ihre Unternehmensfamilien. Carl-Auer Verlag. ISBN 3-89670-355-2
[39] Knight, Sam (2012). School for quants. FT Magazine, March 2nd 2012. Retrieved March 2nd 2012. Online: http://www.ft.com/cms/s/2/0664cd92-6277-11e1-872e-00144feabdc0.html
[40] Kondepudi, Dilip K.; Prigogine, Ilya (1998). Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures. John Wiley. ISBN 0471973939
[41] Koskinen, Kai U. (2010). Autopoietic Knowledge Systems in Project-Based Companies. Palgrave Macmillan, 1st Edition, ISBN 10: 0230278582
[42] Luhm, H.P**.** (1958). A business intelligence system. In: IBM Journal of Research and Development, Volume 2 Issue 4. ISSN : 0018-8646
[43] Luhmann, Niklas (1973). Vertrauen - Ein Mechanismus der Reduktion sozialer Komplexität. UTB Stuttgart.
[44] Luhman, Niklas (1984). Die Wirtschaft der Gesellschaft als autopoietisches System. Zeitschrift für Soziologie, Year 13, Iss. 4, pp. 308-327. Online
viahttp://www.zfs-online.org/index.php/zfs/article/viewFile/2528/2065

[45] Luhman, Niklas (1985). Erwiderung auf H. Mader. Zeitschrift für Soziologie, Year 14, volume 4. Pp. 333-334. Online via: http://www.zfs-online.org/index.php/zfs/article/view/2559
[46] Luhmann, Niklas (2004). Einführung in die Systemtheorie. Carl Auer–Systeme Verlag, Heidelberg. ISBN 3-89670-459-1. P. 233
[47] Mahder, Helmut (1985). Zu Luhmanns Aufsatz: Die Wirtschaft der Gesellschaft als autopoietisches System. Zeitschrift für Soziologie, Year 14, Iss. 4, pp. 330-332. Online: http://www.zfs-online.org/index.php/zfs/article/viewFile/2558/2095
[48] Marcoux, J.; Bonin, K-R. (2012). Three Dimensional Printing: An introduction for information professionals. ICDS 2012: The Sixth International Conference on Digital Society, Valencia, Spain January 30, 2012 to February 4, 2012. ISBN: 978-1-61208-176-2. Retrieved Mar. 3rd 2012
Online: http://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=icds_2012_3_10_10018
[49] Maturana, H., & Varela, F. (1992). The tree of knowledge: biological roots of human understanding (original: El árbol del conocimiento. Bases biológicas del entendimiento humano, 1984). Boston, MA: Shambhala Publications, Inc.
[50] Milgram, St. (1967). The Small-World Problem. Psychology Today, vol. 1, Pp. 61□67. Online: http://measure.igpp.ucla.edu/GK12-SEE-LA/Lesson_Files_09/Tina_Wey/TW_social_networks_Milgram_1967_small_world_problem.pdf
[51] Moses (b.C.). Zweites Buch Moses, Kapitel 21 (in the translation of Martin Luther). In: Bible online, http://www.bibel-online.net/buch/luther_1912/2_mose/21/. Retrieved March 10th, 2012
[52] Muggleton St. H. (2020). Computing: Exceeding human limits. Nature 440, Pp. 409-410. Doi: 10.1038/440409a; Online: http://www.doc.ic.ac.uk/~shm/Papers/NatureCommentaryFinal.pdf
[53] Nanopore Technologies Ltd. (2012). Oxford Nanopore introduces DNA 'strand sequencing' on the high-throughput GridION platform and presents MinION, a sequencer the size of a USB memory stick. Online: http://www.nanoporetech.com/news/press-releases/view/39 (retrieved 1.3.2012)
[54] Nature (2006). Web Focus: 2020 – Future of Computing. Retrieved Dec. 12th 2012. http://www.nature.com/nature/focus/futurecomputing/
[55] Nietzsche, Friedrich Wilhelm (1887). Jenseits von Gut und Böse. Zur Genealogie der Moral. Deutscher Taschenbuch Verlag, de Gruyter Verlag. ISBN 3-423-30155-4. Online: http://www.nietzsche.tv/genealogie-der-moral.html
[56] NY Times (2012). Will Amazon Offer Analytics as a Service? Online: http://bits.blogs.nytimes.com/2012/01/04/will-amazon-offer-analytics-as-a-service/?pagemode=print
[57] Pankowska, Malgorzata (2011). Autopoiesis and Open Access Repositories, [In:] International Journal for e-Learning Security (IJeLS), Volume 1, Issue 1/2, March/June 2011, G.Akmayeva, Ch.Shoniregun (eds.) ISSN 2046-4568, pp. 33-41
[58] Scott E. Page (2007). The Difference: How the Power of Diversity Creates Better Groups, Firms, Schools, and Societies. Princeton University Press. ISBN: 9780691128382
[59] Reding, Viviane (2011), Vice-President of the European Commission, Justice Commissioner. Wider die Datenfresser. Online: http://ec.europa.eu/deutschland/pdf/s11_305_de.pdf
[60] Reuters (2012). Banken horten 777 Milliarden Euro bei der EZB. In: Neue Züricher Zeitung, NZZ Online. Retrieved March 2nd 2012. Online available: http://www.nzz.ch/nachrichten/wirtschaft/aktuell/banken_horten_777_milliarden_euro_bei_der_ezb_1.15377560.html
[61] Rivkin Jan W., Siggelkow N. (2002). "Organizational Sticking Points on NK Landscapes. Complexity, 7 (5), pp. 31-43.
Online: http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cplx.v7:5/issuetoc
[62] Röttker (2009), Snabe, J. H. (CEO of SAP, 2012). Wir arbeiten an der nächsten Cloud. Interview on the occasion of Cebit 2012. Online: http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/cebit-2012/sap-chef-jim-hagemann-snabe-wir-arbeiten-an-der-naechsten-cloud-11673333.html
[63] Rühle**,** Alex (20089). Wikipedia, Qualitätskontrolle für Schwarmgeister. Süddeutsche Zeitung Digitale Medien GmbH / Süddeutsche Zeitung GmbH. Retrieved March 12th 2012. Online: http://www.sueddeutsche.de/digital/wikipedia-qualitaetskontrolle-fuer-schwarmgeister-1.184049
[64] Rzevski, G. (2011). A practical Methodology for Managing Complexity. In: Emergence: Complexity & Organization - An International Transdisciplinary Journal of Complex Social Systems. Vol. 13, Nos. 1-2, 2011, ISSN 1521-3250, pp. 38-56.
[65] Scott E. Page (2007). The Difference: How the Power of Diversity Creates Better Groups, Firms, Schools, and Societies. Princeton University Press. ISBN: 9780691128382

[66] Seidl, David (2005). Organisational Identity and Self-Transformation, An Autopoietic Perspective. Asjgate Publishing Limited, Aldershot, UK. ISBN 0754644588
[67] Sting, F.; Mihm, J.; Loch Ch. (2011): Collaborative Research. INSEAD Faculty & Research Working Paper, 2011/62/TOM. Accessible online via: INSEAD Facult & Reseach – Search and Download page http://www.insead.edu/facultyresearch/research/search_papers.cfm; Retrieved December 7th 2011.
[68] Stumm, S.; Hell, B.; Chamorro-Premuzic, T. (2011). The Hungry Mind: Intellectual Curiosity Is the Third Pillar of Academic Performance. Perspectives on Psychological Science, Journal of the Association for Psychological Science, in press. Abstract online: http://pps.sagepub.com/content/6/6/574. Retrieved Jan. 2nd 2012
[69] Süddeutsche (2007). Besser als der Brockhaus. Süddeutsche Zeitung Digitale Medien GmbH / Süddeutsche Zeitung GmbH. Online: http://www.sueddeutsche.de/digital/wikipedia-besser-als-der-brockhaus-1.324954. Retrieved Mar. 13th 2012.
[70] Teubner, Günther (1989). Recht als autopoietisches System. Suhrkamp Verlag. ISBN 3-518-57982-7
[71] Travers, J.; & Milgram, S. (1969). An experimental study of the small world problem.. Pp. 425–443. Online: http://www.uvm.edu/~pdodds/files/papers/others/1969/travers1969.pdf
[72] Turner, J.; Scott; Soar, Rupert C (2008). Beyond biomimicry: What termites can tell us about realizing the living building. First International Conference on Industrialized, Intelligent Construction (I3CON) Loughborough University. Online: http://www.rshanthini.com/tmp/CP551/SDProjectPapers/ BeyondBiomimicry-Termites.PDF
[73] Vowinkel, Heike (2012). Atomalarm: Der stille Held, der den dritten Weltkrieg verhinderte. Welt Online. http://www.welt.de/kultur/history/article13890998/Der-stille-Held-der-den-dritten-Weltkrieg-verhinderte.html Retrieved: March 3rd 2012
[74] VectorFabrics (2012). http://www.vectorfabrics.com/products/vfthreaded, retrieved March 9th 2012
[75] VW (2012). Neues Konstruktionssystem bei VW. http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,druck-814246,00.html. Retrieved Feb. 12th 2012
[76] Wilkinson, Dennis; Hubermann, Bernardo (2007). Cooperation and Quality in Wikipedia. Proceedings of the 2007 international symposium on Wikis, ACM New York, NY, USA. Retrieved Mar. 15th 2012. Online: http://www.hpl.hp.com/research/scl/papers/wikipedia/wikipedia07.pdf
[77] Wikipedia.org (n./d.).
On Checkers: http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Gesichtete_Versionen/Rechtevergabe
On Assayer: http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Gepr%C3%BCfte_Versionen
On Bureaucrats: http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:B%C3%BCrokraten#Aufgabentrennung
On Elections: http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Kandidaturen
On Voters: http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Stimmberechtigung
[78] Wimmer, Reiner, (no date). Zum Wesen der Stimmungen. Begriffliche Erörterungen. In: Otto Friedrich Bollnow Gesellschaft e.V., Bibliographie – Schriften über Bollnow, Hermeneutische Philosophie und Pädagogik. P. 19. Online: http://www.otto-friedrich-bollnow.de/doc/WimmerA.pdf.

# КОНВЕРГЕНЦИЯ НАУК ОБ ИСКУССТВЕННОМ И ГУМАНИТАРНЫХ НАУК

**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**: конвергенция, науки об искусственном, гуманитарные науки, проблемная ситуация, объективность, субъективность, интерсубъективность, понимание, диалог, интерсубъективная система, интерсубъективная теория*

**Abstract**
The convergence of the artificial and the humanities sciences is proved. It should enter a human being into the theory of complex artificial (intersubjective) systems, should use (along with objective) the subjective and intersubjective knowledge and should rise a comprehension and a dialog role in the processes of problem situations investigation and regulation.

## Введение

Г. Саймон в своей монографии [1] обосновал необходимость создания «наук об искусственном, поскольку мир, в котором мы живем, в значительно большей мере является творением человеческих рук, чем природы». При этом «искусственность и сложность всегда тесно связаны и переплетены между собой», что позволяет говорить о связи наук об искусственном с теорией сложных систем. По мнению Г. Саймона проблема искусственности затрагивает широкий спектр дисциплин. Это и теория организаций и административного поведения, и экономика, и инженерные науки, и многие другие. «И если в естественных явлениях всё выглядит «неизбежным», что вызвано непререкаемостью естественных законов, то на искусственных явлениях всегда лежит печать «свободы выбора»» [1]. А выбор делает человек: ведь термин «искусственный» Г. Саймон использует в смысле «сделанное человеком», в противовес природному.

Однако, придерживаясь характерной для естествознания классической научной рациональности [2], Г. Саймон «со стороны» рассматривает человека как некоторую поведенческую систему. С его точки зрения «человек весьма прост. Кажущаяся сложность его поведения во времени в основном отражает сложность окружающей его среды». Подобная идеализация является типичной для естественных наук с их оппозицией субъекта (исследователя) и объекта в стремлении постичь объективную истину, рассматривая действительность «как она есть сама по себе» без примеси человеческой субъективности. Г. Саймон переносит такой подход в науки об искусственном, тем самым располагает их «в фарватере» естественных наук, что делает чаще всего и подавляющее большинство других учёных; а это приводит к потере адекватности создаваемых ими моделей действительности.

Если же *рассматривать человека как целостность с его субъективными взглядами, интересами и интерсубъективностью* (структурой индивидуального сознания, отвечающей факту существования других индивидов), то в науках об искусственном человек должен предстать «не как вещь среди вещей, а как субъект, способный к изменению мира и самого себя» [3]. В этом случае, поскольку субъект влияет на содержимое знаний об объекте в силу своих ценностно-целевых установок, *классический тип научной рациональности должен быть заменён на постнеклассический* [2,4]. А это означает, что *в науках об искусственном, наряду с естестеннонаучными, необходимо использовать методы гуманитарных наук*,

предметом которых является нечто такое, к чему принадлежит с необходимостью и сам познающий [5]. Тогда можно говорить о конвергенции наук об искусственном и гуманитарных наук, имеющих свои специфические особенности познания действительности. Прежде всего это касается вопроса об объективности гуманитарного знания.

## 1 Объективное, субъективное и интерсубъективное

В основе классического естествознания лежит предположение, что можно описать мир или его часть, ничего не говоря о нас самих; человеку отводится роль стороннего наблюдателя, который может с какой угодно точностью (объективно) описывать (обычно на математическом языке) происходящее вокруг него события, не оказывая при этом никакого воздействия на их ход [6]. Объективное – то, что существует независимо от индивидуального сознания, прежде всего это физические вещи и события в пространстве и времени [7]. Объективное знание, которое не зависит от человека, обычно принимается за истинное. В этом смысле естественные науки нацелены на приобретение объективно-истинного знания.

Гуманитарные науки ориентированы на постижение человека, человеческого духа. Именно *духовность*, по М. Хайдеггеру, *отличает «человеческое» от «природного», при этом место всеобщего «унифицированного» субъекта*, каковым в естествознании является субъект рационалистической гносеологии, *в гуманитарном познании занимает индивид, личность* [8]. И если в естественных науках ценностные, мировоззренческие компоненты остаются как бы внешними по отношению к содержанию знания, то в гуманитарных они входят в само содержание знания. Поэтому гуманитарное знание в своей основе знание субъективное, поскольку на него существенным образом влияет человек, и его можно признать разве что относительно истинным.

Традиционная философия, сводившая субъективность человека к познанию, оценивала её по меркам познавательных стандартов. В таком истолковании человеческая субъективность представала в своей «неполноценности, была символом ненадёжности и ограниченности человеческого опыта» [9]. Если же, следуя М. Хайдеггеру, *бытие* понимать как *бытие человека*, то учение о бытии вообще предстаёт как *онтология субъективности* [8]: человек располагается в центре своего предметного мира.

Тогда субъективность становится важнейшим аспектом бытия человека. И в этом случае «попытки строить социальные онтологии, т.е. схемы социального бытия, отвлекаясь от человеческих индивидов как субъектов социального процесса, приводят к серьёзным противоречиям: из теории исчезают люди и их энергия преобразования социальных форм, а социальные системы приобретают качества квазиприродных сил, стоящих над человеческим бытием» [9]. Такое исключение человека из теории, кстати сказать, характерно не только для социальных, но и для других наук об искусственном.

В то же самое время субъективное знание, значимое и «верное» (относительно истинное) для субъекта, может иметь ценность и для других людей, находящихся с ним в общей проблемной ситуации, которая принуждает их взаимодействовать и участвовать в принятии совместных решений. А *человеческое бытие есть всегда бытие в некоторых ситуациях* [8]. Тогда, следуя конвенциональной концепции истины А. Пуанкаре, трактующей истину как результат соглашения, может быть достигнута *договорённость о признании истинным некоторого субъективного знания* для ограниченного круга коммуницирующих людей. Такое знание может быть названо *интерсубъективным* [10], если опираться на введённое Э. Гуссерлем понятие «интерсубъективность», указывающее на внутреннюю социальность индивидуального сознания: мир, который мы обнаруживаем в сознании, есть интерсубъективный мир [11]. И поскольку теория, в широком смысле, рассматривается как форма синтетического, систематизированного знания, то для сведения в единую систему

интерсубъективных знаний, придания им целостности, можно ввести понятие интерсубъективной теории [12].

Использование методов гуманитарных наук при изучении сложных искусственных систем приводит к необходимости рассматривать их как *интерсубъективные системы*, атомарными коммуницирующими элементами которых являются неоднородные акторы, приобретающие, накапливающие и применяющие в процессах принятия коллегиальных решений об урегулировании проблемных ситуаций субъективные, интерсубъективные и объективные (в пределах допустимых идеализаций) знания [4].

## 2 Объяснение и понимание

Объяснение считается функцией познания, раскрывающей сущность одного предмета или явления (объясняемого) через другое (объясняющее), которое имеет статус достоверного и «очевидного». По своей логической структуре объяснение представляет собой рассуждение или умозаключение, посылки которого содержат информацию, необходимую для обоснования такого рассуждения (умозаключения). Объяснение направлено прежде всего на установление причинно-следственных зависимостей в изучаемом объекте с позиций гносеологии, рассматривающей процесс познания с точки зрения отношений субъекта к объекту или в категориальной оппозиции «субъект-объект». *В европейской культуре функция объяснения постепенно закрепилась за научным знанием* [13].

*Понимание, как процедура постижения смысла, не вписывается в субъект-объектную познавательную схему* [13]. Феномен понимания не опирается на классическую гносеологию с её внеположенностью субъекта объекту и использованием метода объяснения, основным содержанием которого является подведение индивидуального под всеобщее, то есть поиск закономерностей [9]. Истоки *трактовки понимания как специфической процедуры гуманитарного знания* можно найти в 19 веке в герменевтике Ф. Шлейермахера, который определял герменевтику как *искусство понимания, предполагающее раскрытие смысла сказанного или написанного*. На протяжении всего 20 века предлагались различные варианты перестройки гуманитарных наук на основе метода понимания [7]. Как философская концепция герменевтика получила развитие в трудах М. Хайдеггера и Х. Гадамера. Понимание в [14] выступает не как способ познания, а как способ бытия. Тем самым герменевтика приобретает онтологический статус. Она перестаёт быть вспомогательной дисциплиной или методологией гуманитарного познания, становясь универсальной «философией понимания» [7].

Логические основания, методы и правила понимания смысла текстов (знаково-символических систем) исследуются в *герменевтической логике*, в которой с точки зрения классической логики встают необычные проблемы, такие, например, как проблема контекстного значения. В герменевтической логике вводится в логические сферы то, от чего классическая логика сознательно отвлекается; в ней существенное значение имеет различение понимания, объяснения и интерпретации (последняя трактуется как средство достижения взаимопонимания). Понимание же рассматривается как усвоение смысла текста [6].

Всестороннюю и глубокую разработку ключевой для герменевтики категории понимания осуществил в своих трудах Х. Гадамер, для которого понимание не столько познание, сколько универсальный способ освоения мира; понимание неотделимо от самопонимания интерпретатора и невозможно без предпонимания. Поэтому понять нечто, по Х. Гадамеру, можно лишь благодаря заранее имеющимся относительно него предположениям. Тем самым предметом понимания является не только смысл, вложенный в текст автором, но и то предметное содержание («суть дела»), с осмыслением которого связан данный текст. Понимание возможно при соотнесении содержания текста с культурным мыслительным опытом современности. Таким образом, интерпретация текста состоит не в воссоздании первичного (авторского) смысла текста, а в создании смысла заново [5].

## 3 Диалог

Х. Гадамер подчёркивает диалогический характер философской герменевтики как логики вопроса и ответа, как своеобразной философии понимания. Диалог он считает (вслед за Сократом и Платоном) основным способом постижения истины в гуманитарных науках [5]. «Фундаментальная истина герменевтики такова: истину не может познавать и сообщать кто-то один. Всемерно поддерживать диалог, давать сказать своё слово и инакомыслящему, уметь усваивать произносимое им – вот в чём душа герменевтики» [15]. *Диалог, то есть логика вопроса и ответа, и есть логика гуманитарных наук* («наук о духе»), к которой мы, по мнению Х. Гадамера, подготовлены очень слабо [5]. «Чтобы вести беседу, нужно не играть на понижение аргументов собеседника, но суметь действительно оценить фактическую весомость чужого мнения» [16].

Диалог – это «сложные динамические отношения особого типа. Они возможны только между целыми высказываниями разных речевых субъектов… Диалогические отношения – это смысловые отношения между всякими высказываниями в речевом общении» [17]. *Процесс понимания всегда носит диалогический характер*, поскольку понимание тесно связано с общением, предполагает «встречу субъектов». Понимание – это всегда диалог личностей, текстов, мыслей, культур и т.д. Именно в диалоге осуществляется взаимопознание и взаимопонимание субъектов, каждый из этих двух субъективных миров в этом процессе раскрывает свои смысловые глубины [5]. «Не будет преувеличением сказать, что логика диалога во многом заменяет эксперимент в гуманитарных науках» [18].

Известный исследователь диалога М.М. Бахтин считал диалогом способ взаимодействия сознаний, реализуемый через «спрашивание и беседу». Диалог раскрывается через текст (понимаемый семиотически), однако М.М. Бахтин полагал, что диалог первичен по отношению к тексту, поскольку *текст выступает как продукт общения, а диалог является механизмом текстопроизводства* [9].

Диалог играет ключевую роль в процессах коммуникации акторов при регулировании проблемных ситуаций в сложных искусственных системах, основная функция которой достижение социальной общности и взаимопонимания при сохранении индивидуальности каждого её элемента [19]. Сам термин *«диалог»* используется в современных теориях коммуникации для обозначения особого уровня коммуникативного процесса, на котором происходит *слияние личностей участников коммуникации* [9]. Коммуникация в сложных системах опирается, таким образом, на библейскую традицию с её «диалогической духовностью», которая противостоит греческому монологизму. Иными словами, речь идёт о субъект-субъектных отношениях в противовес классическим субъект-объектным. Когда человек познаёт мир как объект, мир остаётся непричастным процессу познания. Он лишь позволяет изучать себя, но не откликается, не соучаствует. Человек получается отделённым от другого человека и от самого себя [7].

## Заключение

Науки об искусственном (экономика, социология, технические науки и т.п.), опирающиеся, как правило, на методологию естественных наук, рассматривают сложные искусственные системы как квазиприродные объекты, превращая человека (с целью приобретения объективно-истинного знания) во внешнего наблюдателя и исключая его из теории. Однако искусственные системы, создаваемые человеком и функционирующие при его участии, развиваются не по законам природы, а под влиянием тех решений и действий которые люди реализуют, находясь в той или иной ситуации «внутри» системы. Тогда они должны рассматриваться как акторы, осознающие ситуацию, выполняющие познавательно-деятельные функции и коммуницирующие между собой для достижения взаимопонимания и консенсуса. Тем самым, место всеобщего «унифицированного» (вынесенного за пределы

системы) субъекта классической научной рациональности должен занять индивид, личность. Иными словами, науки об искусственном необходимо создавать в рамках постнеклассической научной рациональности, учитывающей соотнесённость получаемых знаний об объекте не только со средствами наблюдений и деятельности, но и с особенностями человека: с его субъективными взглядами на мир, интересами и интерсубъективностью – структурой индивидуального сознания, отвечающей факту существования других индивидов. А это и приводит к конвергенции наук об искусственном и гуманитарных наук.

Если в естественных науках ценностные, мировоззренческие компоненты остаются внешними по отношению к содержанию знания, то в гуманитарных они входят в само содержание знания. Поэтому гуманитарное знание в своей основе знание субъективное, поскольку на него существенным образом влияет человек, и его можно признать только относительно истинным. Такое знание, значимое и «верное» для одного субъекта, может быть ценным и для других людей. Тогда между ними может быть достигнута договорённость о признании истинным этого субъективного знания для ограниченного круга коммуницирующих субъектов, находящихся в общей для них проблемной ситуации. Такое знание может быть названо интерсубъективным, а поскольку теория, в широком смысле, рассматривается как форма синтетического, систематизированного знания, то для сведения в единую систему интерсубъективных знаний, придания им целостности, можно использовать понятие интерсубъективной теории.

Применение методов гуманитарных наук при изучении сложных искусственных систем приводит к необходимости рассматривать их как интерсубъективные системы, атомарными коммуницирующими элементами которых являются неоднородные акторы, приобретающие, накапливающие и использующие субъективные, интерсубъективные и объективные (в пределах допустимых идеализаций) знания.

В науках об искусственном возрастет роль понимания как специфической процедуры гуманитарного знания, поскольку сложные искусственные системы скорее можно понять, чем объяснить. Соответственно получают развитие и применение логические основания, методы и правила понимания смысла текстов (знаково-символических систем), изучаемые в герменевтической логике. Процесс понимания носит диалогический характер, тесно связан с общением и предполагает «встречу субъектов». Диалог – это особый уровень коммуникативного взаимодействия в сложных искусственных системах, на котором происходят слияние личностей участников коммуникации.

Таким образом, конвергенция наук об искусственном и гуманитарных наук должна привести к включению человека в теорию сложных искусственных (интерсубъективных) систем, использованию (наряду с объективными) субъективных и интерсубъективных знаний, повышению роли понимания и диалога в процессах исследований и регулирования проблемных ситуаций.

**Список литературы**


[1] Саймон Г. Науки об искусственном. – М.: Мир, 1972.
[2] Степин В.С., Горохов В.Г., Розов М.А. Философия науки и техники. – М.: Гардарика, 1996.
[3] Философия. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2003.
[4] Виттих В.А. Интерсубъективные системы как объекты постнеклассической науки. – Мехатроника, автоматизация, управление. - №1, 2012, С. 53-55
[5] В.П. Кохановский, Т.Г. Лешкевич, Т.П. Матяш, Т.Б. Фатхи. Основы философии науки. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2004.
[6] Словарь философских терминов. – М.: Инфра-М, 2004.
[7] Новая философская энциклопедия (в четырёх томах). – М.: Мысль, 2010.
[8] А.Ф. Зотов. Современная западная философия. – М.: Проспект, 2010.
[9] Современный философский словарь. – Лондон, Франкфурт-на-Майне, Париж, Люксембург, Москва, Минск. – Панпринт, 1998.

[10] Виттих В.А. Когнитология развивающихся систем, Мехатроника, автоматизация, управление – №10, 2011, С 45-49.
[11] Философия. – М.: Гардарики, 2004.
[12] Виттих В.А. Управление ситуациями в сложных развивающихся системах с применением интерсубъективных теорий. – Мехатроника, автоматизация, управление. – №12, 2011, С. 2-6.
[13] Всемирная энциклопедия. Философия. – М.: АСТ, Мн.: Харвест, Современный литератор, 2001.
[14] Хайдеггер М. Бытие и время. – Харьков: Фолио, 2003.
[15] Гадамер Х.Г. Актуальность прекрасного. – М., 1991.
[16] Гадамер Х.Г. Истина и метод. – М., 1991.
[17] Бахтин М.М. Автор и герой. К философским основаниям гуманитарных наук. – СПб, 2000.
[18] Коршунов А.М., Мантатов В.В. Диалектика социального познания. М., 1998.
[19] Виттих В.А. Организация сложных систем. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2010.

# COMPLEX SYSTEM ANALYSIS OF THE RUSSIAN INNOVATION MECHANISM

**S.I. Kretov**

Russian Academy for Entrepreneurship Research Center
105005, Moscow, Radio str., 14, Russia
kretsi@orc.ru, kretsi1955@gmail.com
phone:+7-903-122-31-19

***Key words:*** *pattern of organization, system structure, the process of functioning of the system, autopoesis, innovation, bifurcation point, Russia*

**Абстракт**

Историческая оценка процессов индустриального развития страны, включая инновационные прорывы и модернизационные достижения, показывает крайнюю нестабильность и фрагментарность экономической политики в России. Успешные решения, принимавшиеся ранее, были реализованы благодаря относительной простоты задач, как по составу, так и по горизонтам планирования. Сложность экономики в целом и инновационной подсистемы в частности сейчас достигла такого значения, когда прежние административные методы ручного управления не могут быть эффективными. Первым объективным шагом должно стать фундаментальное переосмысление проблем современного социально-экономического развития страны с позиций теории сложных систем. В настоящей статье и прилагаемом перечне публикаций изложены результаты исследований автора.

## Introduction

Investigation of the innovative mechanism in Russia is of special interest for Complex System Analysis. It has passed through several bifurcation points during a relatively short period of time. This allows us to make some generalizations of innovation practice in the modern Russian economy.

## 1 Historical view

Historically, the first bifurcation point was in the period of the late 19-th - early 20-th century. One of the world-best scientific schools had been almost completely destroyed during the socialist revolution in Russia. But Bolsheviks who came to power realized the vital importance of innovative mechanisms very quickly. They executed very strict administrative levers and used the advantage of totally centralized ownership of all the factors of production for the restoring of the innovation course. As a result, an enormous amount of advanced enterprises was built and put into operation from 1928 to 1940 in Russia. It was the main basis of the Victory in the Second World War.

From the point of view of Complex System Analysis, the major determinants of such an innovative revolution in Russia in the early 20-th century were the following.

The innovation mechanism of that time had relatively low complexity. It allowed maximizing the effective use of administrative management levers and state property.

The goal of the “innovation jump” involved only the task of catching up to the level of technology of advanced western countries and companies. There were not objectives to dictate innovative fashion. Therefore, the “innovation jump” in Russia of Stalin’s period can be interpreted as a local phenomenon. It was based on the intensive dissemination of existing technologies through the new territories and countries. This greatly simplifies the task to manage such innovative mechanisms. The main goal was only to copy the existing advanced technology designs, and not to create fundamentally new technical and technological complex systems. This experience is not exceptional. The similar

scenario later was used by Asian dragons and some other countries for their innovative breakthroughs.

The Soviet authorities continued to develop innovative mechanisms on the bases of tried and tested principles of administrative regulation and state ownership after the Second World War. However, the complexity of the economy of the postwar period in a whole and the complexity of the innovative mechanisms in particular had grown substantially. Objective growth of complexity and as the result "the shift from quantity to quality" predetermined inability of Soviet authorities to continue the effective development of innovative mechanisms based on exclusive public ownership and conservative administration levers in all spheres of industrial activity.

Therefore, some scientific, technical and technological areas in which these principles should be applied rather rigidly have been chosen in USSR. The military-industrial complex, space, aeronautics, nuclear industry, oil, gas and some other areas became the locomotive of Soviet innovation mechanism in the end of XX century. This concentration of efforts let the USSR to achieve in the selected innovation priority areas vivid results with the help of the administrative levers. On the other hand, little attention paid to other industries manufacturing consumer goods, so called "light industry" resulted in its raising inefficiency and falling behind its western adversaries. Moreover, the high and inefficient industrial resource consumption had made impossible the innovative transformation of that industries, including manufacturing consumer goods, food, etc. Loss of control over consumption of industrial resources in high-tech spheres in turn illustrated the inability of current management mechanism based only on administrative levers to cope with the challenges of progress. The historical question about the collapse of the economy, and innovative mechanisms, based on the administrative leavers, torn by internal systemic contradictions, was only a matter of time.

In other words, the objective growth of complexity of the innovative mechanism in the USSR made rigid administrative management of state property first, ineffective, and then essentially impossible.

## 2 Research Hypothesis

The collapse of the Soviet innovative mechanism in the process of elimination of state ownership and the USSR, as the organizational form of governance has become a new bifurcation point. Its essential feature was almost the complete disintegration of the innovation system. It was evolved into a set of non-systematic components which are not able not only to self-creation (autopoesis), but even to a simple self-reproduction. Historically, an innovative mechanism in Russia has not passed the bifurcation point until today. The research of modern innovation mechanism in Russia needs to specify some basic categories and concepts of Complex System Analysis.

One of the basic postulates of Complex System Analysis and the scientific investigation of the innovation mechanism can be expressed in the following axiom. The problems of knowledge, determined as major scientific challenges that face Russian authorities, can't be solved at the same level of thinking where the researchers were when formulating them. The solution of practical problems can be achieved at the level of theoretical generalization. Theoretical problems can only be solved by investigating their essence and including in the processes of the philosophical approach and understanding of the situation. These are classic stages of any science: practice, theory, philosophy and the essence of Complex System Analysis.

At the level of routine understanding of this thesis, this idea can be stated very simple. You cannot, sitting in an opaque sphere, solve problems that are on its surface. It is even impossible to know about their existence. Understanding of this thesis is the first condition to move forward in restructuring of the innovative mechanisms in the Russian economy.

Consider methodological principles and approaches to scientific investigation of financial and economic regulators innovation activity in Russia in order to modernizing its economy based on domestic innovations match the conceptual apparatus of science epistemology. Epistemology is the

study of processes of cognition, thinking, and difficult decisions by individuals or a structured set of people to achieve its goals.

Among the prominent well known in Russia scientists who have formulated the principles which were used as the methodology bases on the researches are: G. Bateson, F. Capra, B. King, D. Cleland, S.L Optner, I. Prigogine, I. Stengers, F. Engels, C. Yang, G. Rzevski, J. Jonson and some other scientists.

## 3 The subject

The subject of this research is the complex system analysis of innovation mechanism in Russia. The purpose of this research is to develop practical solutions to improve the financial and economic leavers used in the field of financial management of applied researches and development in Russia for the successful modernization of the economy based on domestic and foreign innovations.

As a base, this study applies the methodology of scientific analysis of complex systems in locations far from equilibrium, taking into account uncertainty and irreversibility of main processes and system in the whole. This methodology requires consideration of any complex phenomenon, in the unity of the three aspects.

The analyzed phenomenon is regarded as a complex system that synergistically formed from its constituent subsystems. And each of these subsystems may itself constitute a complex system. This type of interaction is directed "inwards" of the system, which is studied on the basis of classical methods of knowledge: abstraction, analysis and synthesis, logical and historical, the methodology of multiple comparisons, as well as the laws of formal and dialectical logic.

On the other hand, the complex system under the study is itself an element of higher-laying meta-system. All restrictive conditions, factors and properties of meta-system, determining the nature of the object under study will be considered as a "circle of circumstances". The system under study can provide only an indirect effect on meta-system through the chains of feedbacks. Moreover, the given complex relationships should be considered in two aspects:

- Through the classification of the factors determining the functionally essential characteristics of the system,
- From the perspective of the resulting effect of evolving system on the macroeconomic parameters of the meta-system.

Any innovative system is characterized by three key factors, which include:

- Pattern of organization of the innovation system, which in its most general form. It can be defined as the configuration of internal relationships, the components defining the essential characteristics of this system (essence-level studies);
- Structure of the innovation system - it is a physical materialization of the pattern of organization of the system (the theoretical level of research);
- Process of the system implementation - it is a practical, specific activities aimed at the reproduction pattern of organization of the system by improving the structure of the system (level of empirical investigation).

In other words, present day innovation mechanism in Russia should be considered as the complex system only if all components of its pattern are materialized in system structure as factors of interdependence and interaction. The absence of even one mandatory component disintegrates the whole system and transforms it into non-system manually managed “dead” mechanism. The pattern of the system must be understood as the necessary and sufficient configuration of relationships and interdependencies of subsystems, which provides the essential characteristics of the system. The differences between disintegrated mechanism and complex system are like the differences between alive person and dead body of the person.

I. Prigogine [1] rightly emphasizes that the first scientific description of the pattern of nature on Earth as a self-sustaining and self-replicating complex system, is presented in the "Dialectics of Nature" by F. Engels [2]. Throughout his work he mentions three necessary and sufficient components of a pattern of organization of life on Earth.

First, is the availability of energy and the laws according to which there are various energy conversions.

Secondly, there should be the living cell as a structural component that can self-organize and self-develop against the second law of thermodynamics, reducing the entropy and moving away from the state of thermal equilibrium.

Thirdly, the large-scale process of species evolution, which is the key to an integral understanding of the pattern of organization of life on Earth. This approach to scientific investigation of the innovation system is the basis of the methodology employed to the Russian innovative mechanism.

However, before we begin to consider the subject of research, it is necessary to emphasize one more point. F. Engels, unconsciously extracting a pattern of organization of life on Earth, in his work formed a picture not only of biological life, but also the socio-economic and political organization of people's life. Just no one of the researchers had noticed it. At the practical level, everyone understands the difference between the Nature and essence of the biological and socio-economic and political life, which is the cornerstone and the form of existence of Homo Sapience on Earth. In terms of the “pattern of organization of the system” this difference is articulated in the context of the "Dialectics of Nature" as well.

The fourth component of pattern of socio-economic and political life can be summarized as follows. Conscious process of formation of the legislation of socio-economic and political development is the “paper activity”, which allows one to "deify" or legalize the violation of the laws of Nature. Violation of objective laws of Nature by people in law under the “roof” of the adopted by individuals’ artificial legislation may be carried out in a limited area and for a finite time interval. Then the laws of Nature restore its objective dominant position through the bifurcation point. The society of individuals in a short span of time with the blind faith of pagan construct their artificial “paper laws” to give the appearance of "legal" violations of the objective laws of Nature. This component of the pattern of organization of social, economic and political life on Earth can be formulated as “social laws are carried out through its contravention (violation)”.

The most vivid illustration of this thesis is the follows. Homo Sapience Community during the time of the existence of socio-economic and political life on the Earth developed and adopted more than 30 million artificial “paper laws” to execute 10 of the Bible commandments (i.e. the laws of Nature). The result is known. Complete failure of the entire legislative activity, which only removes the humanity far from the laws of Nature.

The millennium before the Industrial Revolution “mind and handmade” legislation only slightly bend the laws of Nature. So the community of individuals had developed evolutionarily, in harmony with Nature as an organic part of the whole, one of the subsystems of the Universe. Roman Classic Law, which originated in the depths of the period of coexistence between Nature and human being, was first essential part of the future society the conquerors and tyrants of Nature. The Industrial Revolution and the associated capital fetishism that fertilized Roman Classic Law and gave life to individualism and competition founded an unnatural pattern of organization of life on Earth. All Nature phenomena for billion years were built on the principles of teamwork and cooperation. This is vividly demonstrated in his book "Web of Life” by Fritjof Capra [3]. This is just a canvas of the “web of life”, but it has led humanity to the next bifurcation point, which may be the end of the existing civilization. And it is only the recovery of the dominant laws of Nature to the “paper”, artificial laws that create the appearance of possibility to violate them.

Description of the pattern of organization means the categorical (abstract) reflection of relationships and interdependencies of sub-components within the system under study, while the formalization of the structure is based on real physical properties of the sub-components. In other words, the

shift from considering the pattern of organization to study its structure is a movement from abstract to concrete stages of investigations. However, the unique pattern of complex system can be materialized in a set of affordable and acceptable structures of the system. So, the structure of the system as a material realization (embodiment) of a pattern of organization may not be single. Therefore, it is possible to investigate the structure of actual Russian innovative mechanism as present day system. In the future, more efficient innovating system can be developed on this pattern component configuration, as well. This study will open the way through the theoretical postulates of improving the structure of the Russian innovation system to achieve its desired more effective state.

Pattern of organization of the innovation system in Russia includes a specific set of essential components. The absence of at least one component of the system Russian innovative mechanism cannot be identified as an integral phenomenon of the economy.

The components (sub-systems) of the innovation system in Russia are:

- availability of adequate legal framework creating an effective balance between the objectives of state regulation of innovation mechanism and implementation of elements of reproduction (autopoesis) heuristic factors in the innovation process;
- formation of the dynamic mechanism of goal-setting of the innovation system, taking into account the trend of technical and technological progress and the limits of the available resources;
- maintaining an adequate system of regulation and governance of innovation system after the increase of the complexity level of the system and procedures for its continuous improvement;
- mechanism of communication between science, business and government, as the three sides of any innovation mechanism, based on public - private partnership;
- adequate quality of knowledge and qualification of individuals performing the functions of managers and executives in the innovation system.

Full and complete configuration of these functional components forms the pattern of the innovation system in Russia. In other words, an innovative mechanism, presented in Russia, will be the integrated system of financial management, applied researches and development in Russia for the successful modernization of the economy based on domestic and foreign innovations if and only if it will be configured from all these components (subsystems).

The same pattern of organization of the system can be realized in actual practice in some limited set of admissible structures of the system. However, any combination of these structural components are recognized and materialized as the various structural realizations (embodiments) of the same pattern of the system.

In the system structure pattern of Russian innovative mechanism is materialized through:

- set of laws and regulations governing the relations within the system, a system with meta-system as well as with the system of macro- and microeconomic goal-setting mechanism;
- interaction of entities of different ownership forms, with different legal forms and operating in the sector of material production and non-productive service sector;
- needs, interests and values of individuals who have certain qualifications and experience to achieve the goals and objectives to improve the structure of the system.

## 4 Comparison

After the privatization of property in Russia, the most radical difference between the western innovation system and Russian equivalent is the following. Russia's ruling elite continues to implement its innovative policies, mainly through administrative orders and control.

Administrative management can be described as the construction of legislative and regulatory corridor that leads to the desired goal. Unauthorized by regulators “exit” from the hallway leads to unavoidable sanctions and penalties. The present system of regulation of the economy and innovative mechanism in Russia based on this ineffective and outdated form of regulation, which does not correspond to the level of complexity of the innovation system.

Unfortunately, Russian authorities still do not realize that managing of innovation complex system is possible while executing the economic and financial market regulators. They can be visualized as "incorporation" into the desired goal "a magnet of interest" and "reference of values" that will automatically by "invisible hand of market" lead the units of innovative activity to the target, using the cumulative effect of competition in the speed to achieve goals and minimize the cost of passage along this way.

## 5 The future

Thus, the pattern of economic and financial regulators, as a complex socio-economic system can be represented as a combination of the following components.

Goal setting and visualization of desired innovation objectives in economic parameters and indicators.

- Specialized funds which are competitively allocated between the most effective innovators declare their intention to achieve this goal.
- Procedures of comparison of the actual position of innovators during the movement towards the desired goal.
- Effective stimuli to innovators who have reached the goals.

All that outlined above is only a framework study summary of the complex socio-economic innovation system in Russia. Major components and features of the system are resulted in the form of a real functioning of the system. At this level the essential properties and theoretical characteristics of the system can either be improved or be perverted and turned into its opposite. It is because of the fact that the needs, interests and values of the individuals operating inside the innovative system can be deformed by an inadequate system of relations between scientists, entrepreneurs and government clerks. It is one of the most essential factors which disintegrate the whole innovative system to the set of independent elements of specific Russian innovative mechanism.

For a complex innovation system, which includes in its structure heuristic element of the generation of new knowledge, an essential category is "self-organization" which in its most general form can be defined as the spontaneous emergence of new structures and new forms of behavior in far from equilibrium open systems, which is characterized by the appearance of internal feedback loops and described mathematically by nonlinear equations.

In modern scientific literature for a multifaceted, systemic concept of self objectively expanded reproduction of complex systems applied the concept of "autopoesis" or "self-creation". This category is used to characterize the objective processes of the functioning of self-developing systems. The absence of autopoesis effect in Russian innovative mechanism makes all efforts to reanimate it inefficient and unpromising. This is the key component of the pattern and structure.

Relevance of Complex System Analysis to the subject under study is that Russia's economic model, in which the overwhelming advantage of raw materials trade and administrative controls are dominated, now located at the bifurcation point.

Under the bifurcation point I. Prigogine [1] understand the stability threshold, where the dissipative structure may either break down or break through to one of several new states of order. What is actually happening at this critical point depends on the previous history of the system. Depending on which way it reached the point of instability, it is sent to one or another trend after the bifurcation point. It may be the change of the economy to the innovative way of reproduction or irreversible degradation of the innovation mechanism with the subsequent formation of a new pattern of Russia's economy, based solely on the backward technologies and strategies for the movement «after the leaders».

## Conclusions

History of the innovation system in Russia in 19-21 centuries, allows you to mark a significant instability of its development. This is due both to the problems solved by the authorities of the country and for the conditions of achievement of goals. The current state of the innovation system in Russia should be regarded as the most vulnerable of all the industrial era. On the one hand this is due the fact that the problems of innovation are much more complex now but the Russian authorities are still using archaic instruments as the legacy of the past. On the other hand, real situation is the lack of a scientific school, exploring contemporary economic issues in light of Complexity. These gaps destroy the hope for a quick exit from the crisis, called the innovation stagnation. Important economic issues that should be solved for the exit from the point of bifurcation and for the formation of innovative-oriented policy, paying special attention for approaching of the sixth technology epoch (according to Kondratiev theory), reviewed in several publications of the author. [4],[5],[6],[7],[8],[9],[10],[11],[12],[13],[14], [15],[16],[17],[18],[19].

## References


[1] Prigogine, Ilya; Stengers, Isabelle, 1984. “Order out of Chaos: Man's new dialogue with nature”. Flamingo.

[2] Engels Fridrich., 1883. “Dialectics of Nature”.

[3] Capra Fritjof, 1996. “Web of Life”, Anchor Books, A Division of Random House, Inc., New York.

[4] Kretov S. Инновации и модернизация экономики России // Москва, Агентство печати «Наука и образование», 2011, 245 с.

[5] Kretov S. Руководство по оценке экономической эффективности инновационных проектов (в соавторстве) // Москва, МАКС Пресс, 2011, 108 с.

[6] Kretov S. Мир инноваций и политика модернизации (в соавторстве: Кирпичников А.А., Кондаков А.Г.)// Москва, Мир и политика, № 10, 2011, с. 97-103.

[7] Kretov S. Инновации и модернизация в свете реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы». // Проблемы и перспективы развития предпринимательства в России. III Международная научно-практическая конференция, 2 декабря 2011 года, РАНХиГС при Президенте РФ, ЮФУ, Ростов-на-Дону, 2011.

[8] Kretov S. Методика обоснования начальной (максимальной) цены контракта на выполнение исследований и разработок. (в соавторстве: Кирпичников А.А., Михайлец В.Б., Радин И.В.) // Всероссийский научно-практический журнал «Инновации», №11 (157), 2011.

[9] Kretov S. Системный анализ в исследовании финансово-экономических регуляторов инновационной деятельности.// Москва, Финансовый бизнес, № 6, 2011, с. 32-51.

[10] Kretov S. «Инновационная экономика: сущность и стратегическая цель». // Сборник докладов «Инновационное развитие и экономический рост», Москва, РУДН, 2011, с. 421-429.

[11] Kretov S. Инновации для модернизации управлением финансированием федеральных целевых программ (опыт Минобрнауки РФ). // Сборник докладов «Инновационная политика хозяйствующего субъекта: цели, проблемы, пути совершенствования», Москва, РУДН, 2011.

[12] Kretov S. Инновационная модернизация российской экономики в свете теории сложных систем. // XIX Кондратьевские чтения. Сборник «Модернизация Российской экономики: уроки прошлого, шансы и риски», тезисы участников Чтений. Научный редактор – Бондаренко В. М., Международный фонд Н. Д. Кондратьева, Москва, 2011, с. 159-163.

[13] Kretov S. Инновационный механизм российской экономики как сложная система. // «Роль и место цивилизованного предпринимательства в экономике России. Сборник научных трудов». Выпуск XXVIII. Москва, Российская Академия предпринимательства, 2011, с. 69-81.

[14] Kretov S. Стартовая точка модернизации - победа над коррупционерами. // Москва, Человек и труд, № 9, 2011, с. 26-27.

[15] Kretov S. К вопросу об использовании инновационной, динамической, многофакторной модели управления экономическими параметрами процессов бюджетного финансирования отечественных прикладных исследований и разработок для целей модернизации экономики России. // «Роль и место цивилизованного предпринимательства в экономике России. Сборник научных трудов». Выпуск XXVII. Москва, Российская Академия предпринимательства, 2011, с. 29-47.

[16] Kretov S. Анализ системных условий и ограничений концепции перевода экономики России на инновационный путь развития // Путеводитель предпринимателя. Научно-практическое издание: Сб. науч. трудов. Вып. IX – Москва, Российская Академия предпринимательства, 2011, с. 94-108
[17] Kretov S. Инновационная модернизация экономики России и национальная идея // Москва, Мир и политика, № 4, 2011, с. 98-102.
[18] Kretov S. «Инновационная деятельность» как предмет научного анализа // Москва, Креативная экономика, № 7, 2011, с .52-57.
[19] Kretov S. Расширенное воспроизводство нетрудовых доходов – главный тормоз модернизации российской экономики // Москва, Человек и труд, № 7, 2011, с 14-18.

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ РАЗВИТИЯ РОССИИ

**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:*** *устойчивое развитие, индикаторы устойчивого развития, «зеленая экономика», экосистемные услуги*

**Abstract**

Current world development entails increasingly negative effects on the environment, as well as the exhaustion of natural resources and violation of the ecological balance of the biosphere. Odernization and use of the ecological principles of the economy is inevitable, including innovative development, the supply of energy efficiency, etc. This task can be defined as the guarantee of sustainable development on the basis of principles of ecological safety and a transition towards the broad introduction of a "green economy" to support the ecosystem services of the country. Russia is the main ecological donor of the planet, contributing the largest investment into the guarantee of a sustainable biosphere. In this report, an analysis is carried out and the proposals are made on the formation of sustainable development of the social-economic system of Russia, assuming the need to realize the principle of "decoupling."

Одним из важных результатов обретения Россией к началу XXI века макроэкономической и политической стабильности стало возобновление интереса к долгосрочным проблемам социально-экономического развития страны и мира. Последние годы показали растущую зависимость благосостояния человечества и развития человеческого потенциала от перехода к экологически устойчивому развитию. Такая задача определена в документах ООН для реализации «Целей развития на пороге тысячелетия». Эта Цель, ее задачи и показатели в контексте человеческого развития отражают необходимость решения двух главных проблем:

- снизить воздействие человека на окружающую среду и исчерпание им природных ресурсов;
- улучшить экологические условия для развития человека, уменьшить экологические угрозы для его безопасности, здоровья и проживания.

Следует отметить важность решения второй проблемы, которая часто выпадает при рассмотрении вопросов устойчивого развития и концентрации только на охране окружающей среды и использовании природных ресурсов. Необходимо поставить на повестку дня реальные шаги по глубокой «экологизации» экономики на основе едва ли не главного приоритета современного развития – повышения ценности природы и ее ресурсов, а также человека, его жизни и здоровья.

Для достижения и оценки указанных целей и эффективности обеспечения экологической устойчивости ООН предложила систему индикаторов «Цели развития тысячелетия (ЦРТ)» (Millennium Development Goals):

- Включить принципы устойчивого развития в страновые стратегии и программы, предотвращать потери природных ресурсов с возможным возмещением потерь;
- Обеспечить население чистой питьевой водой.
- Обеспечить улучшение качества жилищных условий населения.

Социальные, экономические и экологические проблемы, связанные с состоянием окружающей среды, всегда стояли в центре внимания ООН. Три крупнейших форума человечества за последние 20 лет были посвящены экологическим проблемам, решение которых тесно связано с переходом к устойчивому развитию: Рио-де-Жанейро (1992 г.), Йоханнесбург (2002 г.) и Копенгаген (2009 г.). Такое внимание во многом связано с резким обострением в мире глобальных экологических проблем: изменение климата, растущий дефицит пресной воды, сокращение биоразнообразия и лесов, опустынивание и многие другие. Обострение экологических проблем привело к осознанию и в теории, и на практике необходимости формирования нового типа экономического развития в мире, выработки нового «зеленого» экономического курса, который планируется рассмотреть на Саммите глав государств и правительств в июне 2012 года в Рио-де-Жанейро. Конференция по устойчивому развитию Рио+20 станет крупнейшим событием в истории ООН. О своем намерении принять в ней участие сообщили более 110 глав государств и правительств. На конференции будут обсуждаться две основные темы – переход к «зелёной» экономике, а также институциональные основы устойчивого развития.

Для обозначения процесса экологизации в мире все чаще используют понятия «зеленая экономика» (green economy) и «зеленый рост» (green growth). Начиная с 2009 г. эти термины все более активно входят в основные документы и терминологию международных организаций. В качестве ключевых терминов для дальнейшего развития человечества и отдельных стран особенно комплексно они рассматриваются в документах структур ООН и ОЭСР.

Формированию «зеленой» экономики способствовал и мировой кризис. Многие государства активно разрабатывают антикризисные программы, в которых значительное место занимает экологическая компонента. В США в соответствии с планом Обамы выделяются десятки миллиардов долларов на экологизацию экономики. План включает в себя создание новых «зеленых» технологий, энергосбережение, новые рабочие места в перспективных с экологической точки зрения видах деятельности и др.  Скандинавские страны идут на радикальную реструктуризацию экономики в пользу отраслей, производящих экологически совместимые новые виды технологий, продуктов и услуг. Такая реструктуризация будет осуществляться за счет государственной поддержки экологически передовых видов деятельности при минимальной поддержке традиционных производств.

Мощнейшее воздействие на будущее мировой экономики окажет борьба с глобальным изменением климата и повышение энергоэффективности. Стремление стран европейского сообщества сократить к 2020 году выбросы парниковых газов на 20%, повысить энергоэффективность на 20% и довести долю возобновимых источников энергии до 20% (план 20:20:20) радикально изменит экономику Европы. Провозглашаемое США стремление сократить выбросы на 50% к 2050 году, а затем и на 80% к 2080 году также окажет огромное воздействие на темпы инноваций и структурные изменения. Уже в ближайшем будущем ключевым определением для передовых экономик мира станет «низкоуглеродная экономика» с ее высокой энергоэффективностью и минимальным воздействием на климатическую систему. А реализация энергетических и климатических приоритетов автоматически означает резкое снижение экологического давления в силу тесной корреляции величин энергопотребления, использования природных ресурсов, выбросов парниковых газов и объемов загрязнений.

Все это означает, что в ближайшие десятилетия развитые страны будут иметь экономику с новой инновационной и технологической основой, важнейшей характеристикой которой будет минимальное воздействие на окружающую среду. Кому из развитых стран лет через 20–30 будут нужны большие объемы нефти и газа? Возможно, и улучшение энергетического обеспечения стран, которые до последнего времени были крупнейшими импортерами энергоресурсов. В прошлом году США обогнали Россию и стали крупнейшим производителем газа в мире за счет разработки собственного сланцевого газа. Крупные месторождения сланцевого газа обнаружены и в Европе. Ответ на эти новые изменения глобального энергетического рынка

является чрезвычайно важным для России в связи необходимостью колоссальных инвестиций на шельфах и в вечной мерзлоте.

Последний мировой финансово-экономический кризис, который не обошел и Россию, резко обострил вопрос о необходимости комплексной модернизации и инновационного развития, что делает долгосрочный взгляд еще более актуальным и поставил вопрос о необходимости разработки Стратегии социально-экономического развития на десятилетний период. Правительством страны была одобренная «Концепция социально-экономического развития страны до 2020 года», а также объявленный курс на инновационное развитие национальной экономики. Общим приоритетом социально-экономического развития является модернизация и диверсификация экономики. Тогда же были выделены пять приоритетов инновационного развития:

- энергоэффективность и энергосбережение, в том числе разработка новых видов топлива;
- ядерные технологии;
- космические технологии, прежде всего связанные с телекоммуникациями; ;
- медицинские технологии;
- стратегические информационные технологии, включая создание суперкомпьютеров и программного обеспечения.

Расширение временных горизонтов все более входит в современную российскую экономическую и политическую жизнь. О необходимости перехода к новой «зеленой» экономике в феврале 2010 г. заявил Президент РФ, отметив необходимость «зеленого» роста, «который сейчас является приоритетом практически для технологической политики всех стран. Он должен быть обеспечен при помощи такого рода решений, а эти решения должны приниматься правительствами и соответственно нашим Правительством…» [1].

Суть и направления модернизации (при всей важности задачи обеспечения технологического прогресса, экономического роста и конкурентоспособности) определяются ее конечной целью – *улучшение условий жизни каждого человека уже сегодня и обеспечение благоприятных условий для будущих поколений. Эта задача обычно определяется как* ***обеспечение устойчивого развития.***

Новая экономика требует адекватных индикаторов развития. Глобальный кризис, нарастание в мире социальных и экологических проблем еще раз подчеркнули необходимость изменения традиционных показателей развития. Слабая чувствительность макроэкономических показателей ВВП к экологическим и социальным проблемам явилась важной причиной неустойчивости мировой экономики. Прогресс и рост в мире и России до кризиса обычно отождествлялся с ростом ВВП, максимизацией прибыли, финансовых потоков и прочих финансовых показателей, а качество роста и его издержки (социальные и экологические) в значительной степени игнорировались.

Среди новейших работ в этой области следует отметить Доклад «Об измерении экономического развития и социального прогресса» двух лауреатов Нобелевской премии по экономике: Дж. Стиглица и основоположника концепции человеческого развития А. Сена (2009 г.) [2]. В частности, в Докладе отмечается, что ВВП не является идеальным показателем для измерения благосостояния, так как он не охватывает различные социальные процессы, изменения в окружающей среде, некоторые явления, которые принято называть «устойчивостью развития». Специальная часть Доклада посвящена вопросам устойчивого развития и окружающей среды.

Для России в целях реализации долгосрочных задач социально-экономического развития на следующем этапе развития приоритетными задачами должны стать: развитие человеческого потенциала, уход от экспортного сырьевого развития и формирование инновационного типа развития экономики. В связи с этим не надо гнаться за количественными показателями, будь то стоимостные индикаторы (ВВП и пр.) или физические объемы (нефть, газ, металлы и т. д.). Новая экономика должна делать акцент на качественном, а не количественном развитии. Было бы неверно сводить все проблемы к политическим или технологическим. Фундаментальной

задачей России является переплетение задач трех типов – технико-экономических, гуманитарных (развитие человеческого потенциала) и политических.

**Роль России в обеспечении глобальной экологической устойчивости**

Переход к устойчивому развитию тесно связан с сохранением экосистемных/экологических услуг. В настоящее время в мире активно начинается разработка широкого круга вопросов, связанных с такими услугами. В частности, важно разработать определение, функции, оценку, механизмы компенсации, формирование рынков этих услуг, выявить их потенциальных продавцов и покупателей. Само благосостояние человечества зависит от экосистемных услуг. Критически важны их регулирующие функции: очистка воды и атмосферного воздуха, регулирование климата и водного режима, ассимиляция отходов, формирование и сохранение почвы и многие другие.

Очень важно, что экосистемные услуги тесно связаны с экономикой, их поддержка приносит ощутимые прибыли. В документах международных организаций часто дается следующее простое определение: «Экосистемные услуги – это выгоды, которые люди получают от экосистем». В международных отношениях, в экономике экоуслуги все чаще связываются с такими новыми для всего мира терминами, как «платежи за экосистемные услуги», «экологический донор», «компенсационный механизм», «долги в обмен на природу» и др. Наряду с глубокими теоретическими разработками, примеры экономической оценки и компенсации экосистемных услуг появились в мировой практике и в отдельных странах. Киотский протокол в определенной степени стал первой попыткой мирового сообщества в глобальном масштабе включить экосистемные услуги, платежи за них и компенсацию отдельным странам в международные и страновые экономические механизмы для борьбы с изменением климата. Расширяются попытки реализовать механизм платежей за экосистемные услуги внутри отдельных стран.

В этой связи все более актуальной становится проблема компенсации экосистемных услуг на глобальном уровне для России. Страна играет ведущую роль в мире в деле сохранения глобальных экологических общественных благ и оказания важнейших экосистемных услуг всей планете. В Концепции долгосрочного социально-экономического развития РФ (КДР, 2008 г.), в которой определены цели развития России до 2020 года, отмечено, что успешная реализация страной экологической программы является важнейшим вкладом России в сохранение глобального биосферного потенциала и поддержание глобального экологического равновесия. В КДР также подчеркивается, что для России актуальна задача капитализации ее экологических ресурсов.

В связи с этим идентификация экосистемных услуг, их экономическая оценка из области теоретических научных исследований должны перейти в практическую плоскость и стать выгодными для России, так как страна очевидно является глобальным экологическим донором и вполне может претендовать на экономическую компенсацию поддержки своих экоуслуг. Кстати, такое позиционирование России уже было озвучено ведущими российскими политиками на форумах ООН.

Только услуги сохранившихся в стране естественных экосистем по смягчению рисков глобального изменения климата оцениваются в 11 млрд долл. в год (главным образом за счет депонирования углерода первичными лесами), что практически представляет собой косвенные субсидии мировой экономике со стороны России. Эта цифра косвенных субсидий еще более возрастет с учетом ценности услуг экосистем страны по сохранению биоразнообразия планеты и естественной защите территорий от природных бедствий.

Фактически идея об экономическом механизме компенсации экосистемных услуг развивает схему, уже апробированную в мире в рамках соглашений о квотах и торговле правами на

выброс парниковых газов в рамках Киотского протокола по предотвращению глобального изменения климата.

Для создания эколого-экономического компенсационного механизма есть предпосылки и понимание в структурах власти России. В частности, на Конференции ООН в Йоханнесбурге употребляемые российской правительственной делегацией термины «глобальные экологические услуги», «компенсация экологических услуг», «экологический донор» и т. д. делали российскую делегацию одной из самых конструктивных в эколого-экономическом плане. К сожалению, после Йоханнесбурга экологический аргумент для получения экономических выгод российскими властями использовался явно недостаточно. Научное сообщество России также слабо отстаивает значение экосистем страны. На международных конференциях имеется огромное количество докладов о значении природного капитала Бразилии, Индии, Канады и т.д., – и в то же время российский природный потенциал практически не обсуждается. Большие возможности в России есть для развития рынка экосистемных услуг и экологических инвестиций как на международном, так и на внутреннем рынке. Необходимо обеспечение кооперации регионов на основе оценки природных услуг (повышение ценности природного богатства и превращение в товар того, что раньше таковым не являлось, включая широкий спектр экосистемных услуг) с выходом на международный рынок для компенсации усилий по сохранению и приумножению природного богатства. Это позволит позиционировать Россию не только как энергетическую державу, но и как экологического донора, что предполагает капитализацию, получение страной выгод от своих экосистем.

Сейчас целесообразно вновь поднять вопрос о роли России в поддержании глобальной устойчивости, о ее экосистемных услугах и их экономических выгодах для мира. Подходящей площадкой для этого могут быть встречи «Большой восьмерки и двадцатки», конференции ООН, крупные международные конференции. Очевидно, что речь не идет о полном покрытии значительных российских экологических издержек. В частности, здесь возможно использование аналога схемы Целевых Экологических Инвестиций (ЦЭИ), впервые предложенной российской делегацией еще в 2000 году. В расширенной трактовке ЦЭИ могут представлять собой инновационный финансовый механизм, основанный на реинвестировании доходов, полученных страной в качестве компенсационных платежей за экоуслуги, от продажи излишков национальной квоты по выбросу парниковых газов и т.д., в проекты по поддержке экосистемных услуг, повышению энергоэффективности производства и потребления энергии, развитию возобновляемых источников энергии.

Россия сегодня среди стран, для которых это особенно актуально. На то есть ряд оснований. Это и экономический рост, и богатые природные ресурсы, и постановка вопроса о поисках оптимального пути развития. Приоритеты страны в инновационной политике, в энергоэффективности, в модернизации экономики в соответствии с современными требованиями естественным образом определяют движение в направлении устойчивого развития. Россия, совместно с другими странами БРИК (включая Бразилию, Индию и Китай), могла бы выступить в качестве лидера движения в направлении устойчивого развития.

Все это предполагает разработку и реализацию новой политики. Исходить при этом следует из того, что экология сегодня - это экономика. Именно экологические требования, которые сегодня озвучены как принципы «зеленой экономики» определяют направления инновационного развития и модернизации производства для того, чтобы обеспечить длительное благополучное развитие экономики. При всей важности инновационной политики - это долгосрочная задача, а природоресурсная политика нужна сейчас, поскольку именно природные ресурсы и наше отношение к ним определяют развитие страны сегодня и в ближайшей перспективе. Природоресурсная политика сегодня – это целенаправленная деятельность, последовательность шагов, исходя из нынешней реальной ситуации, и с видением перспектив ее желательного развития. Ее реализация должна быть инкорпорирована в стратегии, планы, программы и механизмы развития страны. Приоритеты «зеленой экономики», экологические тре-

бования должны быть включены в общие планы развития, нацеленные на решение социально-экономических задач, которые и волнуют всех в первую очередь. Даже обеспечение собственно природоохранных мер (организация ООПТ, сохранение биоразнообразия и пр.) целесообразно включить в понятные всем рыночные механизмы - в виде платежей за экосистемные услуги. Это же касается и других аспектов экологической политики, включая законодательство, образование, культуру, развитие гражданского общества. В противном случае будет продолжена современная практика несоблюдения экологического законодательства, отсутствия реальной поддержки экологического движения, действий власти «по остаточному принципу», потери экологического образования и экологической культуры.

**Задачи и показатели обеспечения экологической устойчивости для России**

Использование всеми структурами власти России идеологии ЦРТ в области обеспечения экологически устойчивого развития способствовало бы повышению эффективности природопользования, решению экологических проблем страны и снижению экологических угроз для здоровья населения. Фактически эта цель, отраженная во многих краеугольных документах ООН, принята и поддерживается Россией, однако ее реализация проводится недостаточно активно.

В качестве показателей прогресса предлагается ряд индикаторов (собственно экологических, эколого-экономических и социально-экологических) в Талице 1:

Таблица 1 – Цель ЦРТ «Обеспечение экологической устойчивости для России» [4]

| **Показатели прогресса в достижении цели для России** | **Современное значение показателя** | **Целевой показатель на 2015 г.** | **Целевой показатель на 2020 г.** |
|---|---|---|---|
| 1. Процент территории с лесным покровом | 47% | не менее 47% | не менее 47% |
| 2. Процент охраняемой территории для поддержания биоразнообразия наземной среды | 13% | 18-20% | 22-25% |
| 3.Энергоемкость на 1 долл. ВВП | 0, 324 т. н. э./ на тыс. долл. | не более 78% к уровню 2005 г | не более 57% к уровню 2005 г |
| 4. Выбросы двуокиси углерода в т. | 2193 млн т. в $CO_2$ эквиваленте, (около 70% от выбросов 1990 г.) | Снижение на 27–28% к уровню 1990 г. | Снижение на 25% к уровню 1990 г. |
| 5. Численность населения, проживающего в особо загрязненных городах | 56,3 млн чел. | 28 млн чел. | 14 млн чел. |
| 6. Удельный вес жилищного фонда (ж/фонда), оборудованного водопроводом (город, село) | 89% городского ж/фонда; 46% сельского ж/фонда | 95% городского ж/фонда; 53-54% сельского ж/фонда | 100% городского ж/фонда; 61-63% сельского ж/фонда |
| 7. Удельный вес жилищного фонда, оборудованного канализацией (город, село) | 87% городского ж/фонда; 37% сельского ж/фонда | 95% городского ж/фонда; 44-45% сельского ж/фонда | 100% городского ж/фонда; 51-53% сельского ж/фонда |
| 8. Доля ветхого и аварийного жилищного фонда | 3,2% | 1,5-1,6% | 0 |

В задачу реализации принципов устойчивого развития, входят два показателя, которые в российском контексте во многом связаны с лесным хозяйством:

- процент территории с лесным покровом;
- процент охраняемой территории для поддержания биоразнообразия наземной среды.

Данные показатели могут в неизменном виде использоваться и для российских стратегий/программ. Приведем один довод, почему так важен первый индикатор в этой таблице, которая предлагается для всех стран. В Китае подсчитали, что в результате деградации природных лесных экосистем страна теряет 12% ВВП. При этом из этих потерь только 8% приходится на деловую древесину. Всё остальное – за счёт потери экосистемных функций: изменение гидрорежима рек, потеря плодородия почв, эрозии и так далее. Аналогичные расчёты сделаны в США: оказалось, что чем меньше площадь лесных территорий, тем в несколько раз дороже становится очистка воды. Такие природные территории обладают не только экономическими показателями. Они обеспечивают нас совершенно необходимыми, многими жизненно функциями. Россия обладает самой большой лесной территорией мира (22% от мировой площади), и процент территорий с лесным покровом также является одним из самых высоких в мире – 46,6%. В связи с кризисом 1990-х годов резко снизилась вырубка леса, что способствовало сохранению лесных площадей в целом по стране. Вместе с тем этот индикатор имеет огромную региональную дифференциацию – он колеблется от 0,2–1,0% (Калмыкия, Ненецкий АО) до 70–80% (Коми, Иркутская область, Приморский край и др.). Невысок процент территорий с лесным покровом и во многих регионах европейской части страны, что делает усилия по сохранению и увеличению лесных территорий здесь вполне актуальными. Остается сложной ситуация с незаконной вырубкой леса в России. Серьёзно страдают российские леса и от лесных пожаров. В итоге, качество и площадь территории с лесным покровом России приобретает очень серьезное значение для обеспечения экологической устойчивости, как минимум, для северного полушария планеты.

К национальному достоянию России надо отнести и особо охраняемые природные территории (ООПТ). В стране имеется 101 заповедник, 9 заказников и 39 национальных парков с общей площадью 43,0 млн га, что составляет 2,5% территории России. Территория заповедников в России занимает чуть больше 1%, национальных парков – и того меньше, в совокупности федеральные ООПТ занимают 2,5% площади страны. В то же время, например, в США эта площадь достигает 15%, в Китае – 17. Какие принципиально важные особенности имеются у ООПТ? Они поставляют человеку абсолютно уникальные и незаменимые ничем другим функции. Наблюдения за природными процессами в многолетнем режиме при изменении климата – подобные данные бесценны, т.к. это единственных источник такой информации. Таким образом, ООПТ – это эталоны того, как должна выглядеть здоровая природа, и ценность их абсолютна. По индикаторам, связанным с лесом и охраной биоразнообразия, Россия благополучна и занимает хорошие позиции в мире.

Одной из объективных причин снижения внимания к экологическим проблемам за последнее десятилетие может стать тот факт, что глубокий социально-экономический кризис России 1990-х годов привел к значительному падению производства, что благоприятно сказалось на природе за счет значительного снижения нагрузки на окружающую среду. Следствием резкого спада промышленного производства, сельского и лесного хозяйств, других секторов стало уменьшение выбросов и сбросов загрязняющих веществ в воздух и водные объекты, значительно сократились темпы истощения природных ресурсов и их деградации. Эти тенденции хорошо прослеживаются в Таблице 2.

Таблица 2 – Основные показатели воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду и истощение природных ресурсов в России (1990–2008 годы)

| | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2008 |
|---|---|---|---|---|---|
| Сброс загрязненных сточных вод, млрд м3 | 27,8 | 24,5 | 20,3 | 17,7 | 17,1 |
| Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, млн т, в том числе | 55,1 | 32,3 | 32,3 | 35,8 | 37,4 |
| - от стационарных источников | 34,1 | 21,3 | 18,8 | 20,4 | 20,1 |
| - от автотранспорта | 21,0 | 11,0 | 13,5 | 15,4 | 17,3 |
| Забор воды из природных водных объектов для использования, млрд м3 | 106,1 | 86,6 | 75,9 | 69,3 | 69,5 |
| Нарушено земель в связи с несельскохозяйственной деятельностью, тыс. га | 119,3 | 83,4 | 54,6 | 35,1 | 46,2* |
| Образовалось отходов, млн т** | — | 83,3 | 127,5 | 3035,5 | 3876,9 |
| Вывозка древесины, млн м3 | — | 116 | 94,8 | 113 | 108 |
| Нефть, млн т | 516 | 307 | 324 | 470 | 488 |
| Газ, млрд м3 | 641 | 595 | 584 | 641 | 664 |
| Уголь, млн т | 395 | 263 | 258 | 299 | 326 |

Примечания: ** Данные за 2007 г. ** До 2002 г. – токсичные отходы; с 2002 г. – отходы производства и потребления (с I по IV класс опасности для окружающей природной среды)*

За последние два десятилетия наряду со снижением экологической нагрузки, произошло и повышение благоустройства жилищ, что также отражено в задачах ЦРТ. Все позитивные изменения в обеспечении услугами ЖКХ можно проследить по Таблице 1.

Так, за 1990–2008 годы сброс загрязненных вод сократился примерно на 40%, на столько же сократились выбросы загрязняющих веществ в воздух от стационарных источников. Уменьшился забор воды из водных объектов более чем на треть, нарушение земель в связи с несельскохозяйственной деятельностью сократился в 2,6 раза. В результате снижения добычи нефти и угля снизилось воздействие на окружающую среду одного из главных загрязнителей – топливно-энергетического комплекса [3].

Однако тенденция уменьшения загрязнения окружающей среды изменилась после начавшегося в 1999 году подъема экономики. Передышка для природы закончилась: росло загрязнение воздуха от стационарных источников и особенно от автотранспорта (рост на 57% по сравнению с 1995 г.); увеличивалась добыча энергоресурсов, прежде всего нефти. Ее рост составил 1,6 раза по сравнению с 1995 годом. Острейший характер приобретает проблема отходов, объем которых только после 2005 года увеличился почти на 30%. Начавшийся в 2008 году мировой экономический кризис внес свои коррективы в масштабы воздействия экономики на окружающую среду в результате снижения спроса на природные ресурсы и уменьшения объемов производства природоемкой продукции. Вместе с тем последние данные Росстата показывают, что началось постепенное восстановление экономики, что может сказаться на объемах загрязнения, а также на добыче и использовании природных ресурсов.

Задача ЦРТ по включению принципов устойчивого развития в национальные стратегии и программы и предотвращению потерь природных ресурсов адекватна задачам страны как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе. Для России острой проблемой является низкая эффективность использования и истощение невозобновлямых энергетических ресурсов. Неслучайно в Указе Президента РФ «О некоторых мерах по повышению энергетической и

экологической эффективности российской экономики» (2008 г.) тесно связаны энергетика и экология. В связи с этим, важнейшим индикатором в настоящее время является показатель энергоемкости ВВП. Этот индикатор является приоритетным не только для обеспечения страны. Здесь можно выделить ряд обстоятельств:

- ведущая роль энергетического сектора в российской экономике, в формировании ВВП, налогов, доходов бюджета, занятости, доходов от экспорта;
- самый большой вклад энергетического сектора в загрязнение окружающей среды России, истощение природных ресурсов и деградацию огромных девственных территорий. Энергетический сектор – крупнейший загрязнитель, выбрасывающий около 50% всех вредных веществ в атмосферу, 12% загрязненных сточных вод, примерно 90% отходов производства и потребления и четыре пятых общего объема парниковых газов;
- влияние энергетики на здоровье населения;
- показатель энергоемкости является представительным индикатором устойчивого развития, отражающим экономические, экологические и социальные аспекты;
- на перспективу роль энергетического сектора в экономике сохраняется при планах увеличения добычи энергоресурсов, что вероятно, увеличит антропогенное воздействие на окружающую среду.

В настоящее время энергоемкость российской экономики чрезвычайно высока и ее снижение – первоочередная задача. В Таблице 3 представлен данный индикатор в сравнении с другими странами и показана его динамика. Российская энергоемкость в среднем в 2–3 раза выше, чем в развитых странах.

Таблица 3 – Энергоемкость ВВП в некоторых странах, т. н. э. / тыс. долл. 2005 г. по ППС

| Страна | 1990 | 2000 | 2008 | 2008/1990 | 2008/2000 |
|---|---|---|---|---|---|
| Англия | 0,156 | 0,130 | 0,102 | 65% | 79% |
| Германия | 0,171 | 0,131 | 0,113 | 66 | 86 |
| Франция | 0,154 | 0,147 | 0,132 | 86 | 90 |
| США | 0,246 | 0,209 | 0,175 | 71 | 84 |
| Канада | 0,331 | 0,301 | 0,275 | 83 | 91 |
| Япония | 0,134 | 0,141 | 0,126 | 94 | 89 |
| Норвегия | 0,287 | 0,234 | 0,194 | 68 | 83 |
| Россия | 0,460 | 0,496 | 0,324 | 70 | 65 |
| Китай | 0,549 | 0,288 | 0,274 | 50 | 95 |
| Индия | 0,176 | 0,169 | 0,138 | 78 | 82 |
| Бразилия | 0,115 | 0,133 | 0,125 | 109 | 94 |

Конечно, Россия – северная страна, но показатели скандинавских стран говорят об огромном потенциале экономии энергии в стране. За последнее десятилетие индикатор энергоемкости в России показал позитивную динамику в направлении значительного уменьшения, что позволило переломить тенденцию роста этого показателя в 1990-е годы. Особенно успешными были 2000-е годы, когда энергоемкость сократилась на 35%, что во многом было связано с быстрым ростом ВВП. Это один из лучших показателей в мире. Вместе с тем следует отметить, что в России сняты структурные «сливки» уменьшения энергоемкости, а разрыв по абсолютным ее величинам с развитыми экономиками остается значительным.

С развитием энергетики тесно связаны и другие показатели для задачи ЦРТ. Особую актуальность в связи с проблемой глобального изменения климата приобретают выбросы главного парникового газа – двуокиси углерода (углекислого газа), объемы которого во многом зависят от энергетики. Добыча и сжигание ископаемого топлива являются главными причинами наблюдаемого увеличения выбросов парниковых газов и вызванного ими глобального изменения климата. В России свыше 80% таких выбросов связано с энергетикой.

Можно долго обсуждать, идут ли климатические изменения и вклад антропогенных воздействий в этот процесс, но в ближайшие десятилетия развитые страны будут иметь экономику с новой инновационной и технологической основой, важнейшей характеристикой которой будет минимальное воздействие на окружающую среду. Многие страны уже вложили десятки и сотни миллиардов долларов в переход к новой экономике (особенно это заметно в США, Германии, Японии, Южной Корее, Китае и др.), используя для этого также антикризисные программы. Ключевым определением для передовых экономик мира станет «низкоуглеродная экономика» с ее высокой энергоэффективностью и минимальным воздействием на климатическую систему. А реализация энергетических и климатических приоритетов автоматически означает резкое снижение экологического давления в силу тесной корреляции величин энергопотребления, использования природных ресурсов, выбросов парниковых газов и объемов загрязнений. Кому из развитых стран через два-три десятилетия будут нужны в больших объемах нефть и газ? Ответ на этот вопрос является чрезвычайно важным для России в связи с необходимостью колоссальных инвестиций в новые сложные и малорентабельные месторождения.

Россия в 2009 году приняла Климатическую Доктрину, в которой подчеркивается важность борьбы с глобальным изменением климата. Согласно данным Национального доклада Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов, антропогенная эмиссия парниковых газов в $CO_2$ - эквиваленте составила 2193 млн т. (без учета выбросов и поглощения парниковых газов, связанных с землепользованием и лесным хозяйством). Вклад России в глобальную эмиссию составляет 6%, что существенно меньше лидирующих США (22%) и Китая (16%). На долю Японии и Индии приходится по 5% глобальной эмиссии.

В соответствии с обязательствами Киотского протокола страна должна производить в первый бюджетный период действия протокола (2008–2012 гг.) парниковых газов не больше, чем в 1990 году. Это достаточно мягкие обязательства для России в силу значительного сокращения выбросов из-за кризиса 1990-х годов. Сейчас в стране выбрасывается около 70% углекислого газа от уровня 1990 года. Обязательства других стран гораздо более жесткие – подавляющее большинство развитых стран обязано в условиях экономического роста снизить выбросы парниковых газов на 6–8%. Жесткость и экономические последствия этих обязательств привели, в частности, к отказу США от ратификации Киотского протокола.

Довольно парадоксальная ситуация сложилась с показателем энергоемкости. Этот важнейший для устойчивого развития экономики России индикатор содержится как приоритетный во всех стратегиях и программах развития страны. Тем не менее в официальных публикациях Росстата показателя энергоемкости и динамики его роста нет. Сейчас в стране и мире имеются различные методики расчета этого индикатора. Росстату целесообразно идентифицировать свои методические подходы, ежегодно рассчитывать и публиковать энергоемкость в своих официальных документах.

Связан с энергетикой и предлагаемый для России показатель «Численность населения, проживающего в особо загрязненных городах (млн человек)». Вклад объектов энергетического сектора в загрязнение воздушного бассейна существенен (около половины всех загрязнений от стационарных источников). По данным Росгидромета в России насчитывается 136 городов с высоким уровнем загрязнения с общей численностью населения 56,3 млн человек (55% городского населения страны) в том числе 30 городов – с очень высоким загрязнением.

Задача полного обеспечения людей чистой питьевой водой актуальна для нашей страны, несмотря на большие объемы воды в водных бассейнах страны. Важность этого показателя для человечества очевидна – сейчас в мире почти 2 млрд человек не обеспечены чистой питьевой водой, что приводит к многочисленным болезням и смертям. Еще более катастрофичны прогнозы на будущее. Несмотря на существенный прогресс в обеспечении населения чистой водой в России, ситуация с качеством питьевой воды продолжает оставаться неблагоприятной во многих регионах, в первую очередь вследствие сбросов сточных вод в поверхностные водные объекты. Более 40% населения страны сталкивается с проблемой качества воды. По оценкам в целом по Российской Федерации в 2009 г. государственным санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам не соответствовало 37% поверхностных источников питьевого водоснабжения и 16,9% подземных источников питьевого водоснабжения. Удельный вес поверхностных источников централизованного питьевого водоснабжения, не имеющих зон санитарной охраны, составляет 32,8%.

**Выводы и рекомендации**

Формирование устойчивого развития всей социально-экономической системы России предполагает усиление экологических приоритетов в государственной политике.

Суть модернизации состоит в обеспечении технологического прогресса для экономического развития и поддержания благоприятной окружающей природной среды (экологической безопасности, которая становится определяющей для экономического роста и самого существования человека). Эта задача в мире озвучена как реализация принципа «декаплинга» (удовлетворение растущих потребностей при минимизации обеднения природного капитала), что предполагает снижение энергоемкости и природоемкости при экономическом росте, широкое использование возобновляемых источников энергии, модернизацию производства на основе инноваций. Необходима поддержка модернизации производства по пути так называемого двойного выигрыша, связанного с обеспечением как экономической эффективности, так и сокращения вредных выбросов, неистощительного использования природных ресурсов, малоотходного производства. Для России можно выделить следующие важные направления преобразований, которые прямо или косвенно могут привести к переходу к «зеленому» росту, снижению нагрузки на окружающую среду, повышению эффективности использования природных ресурсов:

- разработка и принятие долгосрочной Стратегии устойчивого развития Российской Федерации;
- формирование в стране экологической обстановки, способствующей развитию человеческого потенциала;
- устранение экологических угроз для здоровья человека;
- формирование экологически сбалансированной модели развития экономики и экологически конкурентоспособных производств, позволяющих обеспечить «зеленый» рост и переход к низкоуглеродной экономике;
- усиление государственного контроля и мониторинга за качеством окружающей среды, прежде всего, за чистотой воздушного бассейна (особенно в крупных городах) и качеством питьевой воды;
- улучшение благоустройства жилищного фонда, в частности, экологических условий проживания в городах и сельской местности;
- разработка и широкое использование показателей (индикаторов) устойчивого развития, в том числе ЦРТ, экологическая корректировка традиционных показателей развития;
- создание экологически благоприятных систем налогов, кредитов, субсидий, торговых тарифов и пошлин;

- радикальное повышение экологической и энергетической эффективности, внедрение ресурсосберегающих наилучших доступных (существующих) технологий на основе имеющихся и новых экономических и правовых инструментов;
- значительное уменьшение затрат природных ресурсов и производимых загрязнений на единицу конечного результата (на макроуровне – на единицу ВВП), выражающееся в уменьшении показателей природоемкости, в том числе энергоемкости;
- принять законы о плате за негативное воздействие на окружающую среду, о зонах экологического неблагополучия;
- реализация программ, направленных на реабилитацию территорий, находящихся в кризисном экологическом состоянии, включая меры по улучшению здоровья проживающего здесь населения. Государственная поддержка проведения работ по ликвидации накопленного на таких территориях экологического ущерба;
- изменение экспортной политики в направлении сокращения удельного веса в экспорте первичных природных ресурсов при увеличении удельного веса высокотехнологичной наукоемкой продукции и товаров с высокой долей добавленной стоимости;
- комплексное совершенствование системы законодательства, связанного с охраной окружающей среды и использованием природных ресурсов, а также со здоровьем человека, определяемого экологическими факторами;
- активное привлечение государством общественности и бизнеса для решения экологических проблем страны и регионов;
- повышение уровня экологического образования и культуры населения на всех ступенях образовательной системы, распространение идей экологически устойчивого развития;
- поддержка потенциала глобальных экосистемных услуг России для обеспечения устойчивости биосферы планеты. Использование экологических аргументов на международном уровне для получения Россией выгод, в том числе экономических;
- поддержка программ международного и регионального сотрудничества в области охраны окружающей среды, а также принятых в мире процедур и протоколов.

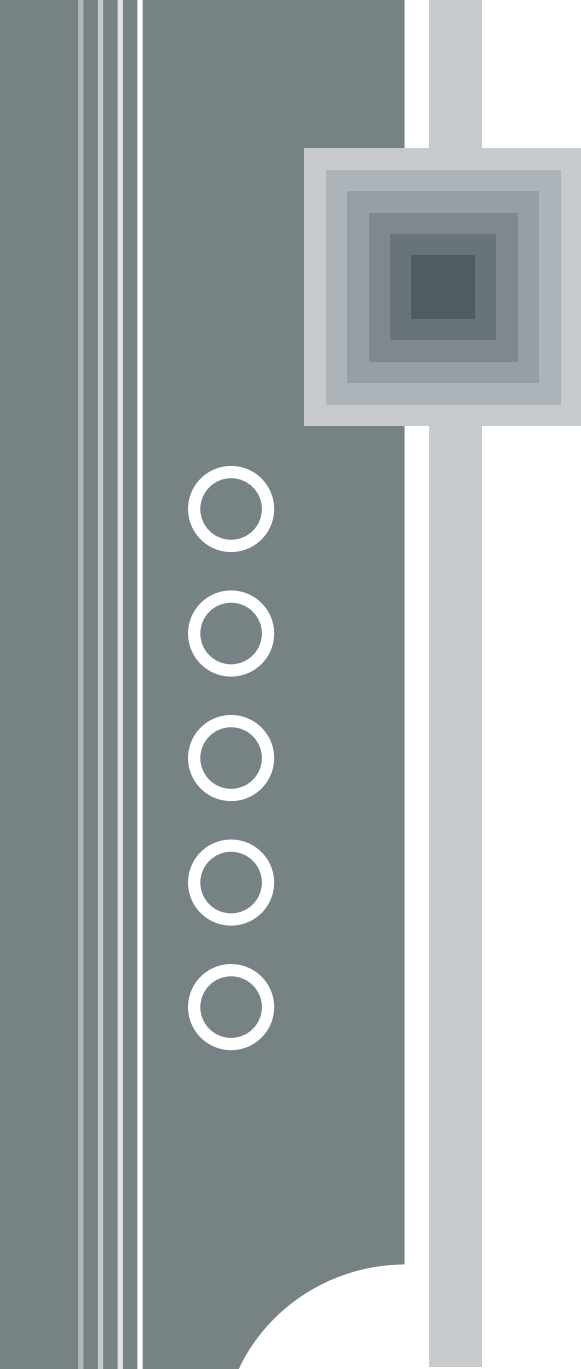
**Список литературы**


[1] http://www.kremlin.ru/transcripts/6914.

[2] Report by the Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress. J.E.Stiglitz, A.Sen and J-P.Fitoussi (www.stiglitzsen-fitoussi.fr).

[3] Меньшиков В.Ф. Энергетика и экология в послекризисный период. Труды XI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» / Под ред.: акад. Е.А.Федосова, акад. Н.А.Кузнецова, проф. В.А.Виттиха. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2009.

[4] Доклад о развитии человеческого потенциала в Российской Федерации 2010. Цели развития тысячелетия в России: взгляд в будущее. http://www.undp.ru.



# Optimal Control of Systems with the Distributed Parameters

# Оптимальное управление системами с распределёнными параметрами

# ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА

**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, параметризация управляющих воздействий, управление в условиях интервальной неопределенности, робастная оптимизация, синтез оптимальных регуляторов, альтернансный метод*

**Abstract**
The problem of optimal control of uncertain distributed parameter systems is considered. Method of solution of problems of the robust optimization and design of feedback systems is suggested.

## Введение

Классические методы построения алгоритмов и систем управления (СУ) динамическими объектами разработаны применительно к соответствующим формальным моделям управляемых процессов с полным объемом необходимой информации об их свойствах.

В связи с этим возникает актуальная задача синтеза управляющих алгоритмов в отличающихся от идеализируемых подобным образом и практически всегда реализуемых условиях неопределенности характеристик объекта, обусловленной, прежде всего, неточным знанием его параметров и действием неконтролируемых внешних возмущений.

В типичных ситуациях речь идет об ограниченной (интервальной) неопределенности неизвестных величин, вся информация о которых исчерпывается заданными границами диапазона изменения их возможных значений.

Указанная проблема является одной из центральных и наиболее сложных в современной теории управления. Способы ее решения интенсивно разрабатываются в настоящее время. К ним относятся методы построения робастных систем управления, минимаксной оптимизации по принципу гарантированного результата, равномерно-частотной оптимизации, дифференциальных игр, оптимального синтеза стратегий управления по данным наблюдения и др. [1-5]. Известные теоретические результаты приводят к весьма сложному с точки зрения технической реализации алгоритмическому обеспечению предлагаемых стратегий управления неопределенными объектами даже для сравнительно простых модельных постановок соответствующих задач.

В соответствии со сказанным самостоятельный интерес приобретает проблема развития прикладной теории управления динамическими объектами в условиях ограниченной неопределенности, позволяющей на основе дополнительной информации о фундаментальных закономерностях конкретной предметной области построить предельно упрощенные в рамках требуемой точности выполнения предъявляемых требований и технически реализуемые структуры СУ.

В настоящей работе предлагаются возможные пути решения этой проблемы для некоторых задач в наименее разработанной области управления объектами с распределенными параметрами (ОРП). Рассматриваются задачи робастной оптимизации ОРП с интервальными неоп-

ределенностями его характеристик и построения оптимальных СУ с обратными связями по неполному измерению состояния ОРП.

## 1 Постановка задачи

Пусть управляемая функция состояния $Q(x,t)$ ОРП описывается в зависимости от пространственной координаты $x \in [x_0, x_1]$ и времени $t \in [0,T]$ бесконечной системой дифференциальных уравнений для коэффициентов $z_n(t)$ разложения $Q(x,t)$ в сходящийся в среднем бесконечный ряд по некоторой полной ортонормированной системе базисных функций $\varphi_n(x)$, $n = 1,2,...$ :

$$(1) \quad \frac{dz_n}{dt} = f_n(z,u,w,t),\ z_n(0) = z_n^0,\ t \in [0,T],\ n = 1,2,...$$

$$(2) \quad Q(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} z_n(t)\varphi_n(x) \quad x \in [x_0, x_1]$$

применительно к типовой модели ОРП в форме стационарного пространственно-одномерного уравнения в частных производных параболического типа с краевыми условиями Дирихле, Неймана или их линейной комбинацией [6, 7].

Здесь $z = (z_n)$ - бесконечномерный вектор фазовых координат; $u(t)$ - сосредоточенное скалярное управляющее воздействие, принадлежащее к классу кусочно-непрерывных функций; $w \in E^q$, $1 \le q < \infty$ - вектор неизменных во времени неопределенных параметров объекта, характеризующих внешние и параметрические возмущения, и заданные функции $f_n$ удовлетворяют обычным требованиям по их гладкости.

Подобное представление моделей ОРП возможно и на основе сходящихся схем дифференциально-разностной аппроксимации исходных дифференциальных уравнений объекта в частных производных [6, 7].

Пусть далее информация о начальном состоянии $z^0 = (z_n^0)$ и значениях $w$ исчерпывается условиями

$$(3) \quad z^0 \in Z^0;\ w \in W$$

их принадлежности заданным компактным множествам $Z^0$ и $W$, а допустимые значения управления стеснены ограничением

$$(4) \quad u(t) \in U,\ \forall t \in [0,T],$$

где $U$ - также заданное компактное множество.

Каждой фиксированной паре $y = (z^0, w) \in Y = Z^0 \times W$ значений неопределенных факторов при любом допустимом управлении $u(t)$ соответствует определяемая решением системы уравнений (1) траектория процесса $z(t,u(\cdot),y)$, оканчивающаяся в точке $z^1(y,T) = z(T,u(\cdot),y)$ в заданный или нефиксируемый заранее конечный момент времени $t = T$, и управляемая функция состояния

$$(5) \quad Q(x,u(\cdot),y,t) = \sum_{n=1}^{\infty} z_n(t,u(\cdot),y)\varphi_n(x)$$

согласно (2), а объединение этих траекторий по всем возможным величинам *y* при одном и том же управляющем воздействии образует ансамбль [1]

(6) $Z(t,u(\cdot)) = Z(t,u(\cdot),z^0,w) = \bigcup\{z(t,u(\cdot),z^0,w) \,|\, z^0 \in Z^0,\ w \in W,\ t \in [0,T]\}$.

При заданных достижимых целевых множествах требования к конечному состоянию системы, которые должны быть выполнены для всех $y \in Y$, в достаточно общем случае предъявляются в виде некоторого условия, гарантирующего «попадание» ансамбля с допустимой погрешностью $\varepsilon_0$ в заданную конечную точку $z^*$ при любой возможной реализации значений $z^0$ и $w$ в предположении управляемости объекта (1) – (6) относительно области фазового пространства, удовлетворяющей этим требованиям. Если при этом целевое множество определяется характерными для приложений чебышевскими оценками допусков отклонения от $z^*$ [8], то такое условие может быть задано в форме допустимой точности $\varepsilon_0 > 0$ равномерного приближения конечного состояния объекта $Q(x,u(\cdot),y,T)$ к заданному распределению $Q^*(x)$ для всех возможных величин $y \in Y$ [7]:

(7) $\max\limits_{y \in Y}\left[\max\limits_{x \in [x_0,x_1]} \left|Q(x,u(\cdot),y,T) - Q^*(x)\right|\right] \le \varepsilon_0$,

где $Q^*(x)$ и $z^*$ связаны соотношением (2).

Пусть качество процесса управления оценивается функционалом

(8) $I_1(u(\cdot),y,T) = \int\limits_0^T f_0(z(t,u(\cdot),y),\, u(t),y,t)\,dt + F_0(z(T,u(\cdot),y),y,T) \to \min\limits_{u(\cdot) \in U}$,

где $f_0$ и $F_0$ - заданные достаточно гладкие функции своих аргументов.

При отсутствии дополнительной информации, снижающей степень неопределенности исходных данных (3), можно теперь сформулировать в соответствии с принципом гарантированного результата [1, 2] следующую минимаксную задачу робастной оптимизации при управлении ансамблем траекторий (6) управляемого процесса.

Требуется найти программное оптимальное управление $u^*(t) \in U$, которое обеспечивает для объекта (1) – (6) выполнение условия (7) при минимальном значении критерия оптимальности:

(9) $I_2(u(\cdot),T) = \max\limits_{y \in Y} I_1(u(\cdot),y,T) \to \min\limits_{u(\cdot) \in U}$.

Если в другой крайней ситуации в СУ 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, то дальнейшая проблема сводится к детерминированной задаче построения замкнутой системы оптимального управления с обратными связями, обеспечивающей перевод объекта (1), (2), (4) в конечное состояние вида (7) с заданной точностью $\tilde{\varepsilon}_0(\tilde{y}) \le \varepsilon_0$

(10) $\max\limits_{x \in [x_0,x_1]} \left|Q(x,u(\cdot),\tilde{y},T) - Q^*(x)\right| \le \tilde{\varepsilon}_0(\tilde{y})$

при минимальном значении функционала (8) для каждой из допустимых величин $y = \tilde{y} = (\tilde{z}^0, \tilde{w}) \in Y$.

В пренебрежении инерционностью и погрешностями процедур наблюдения и идентификации величина $\tilde{y}$ определяется по некоторой заранее фиксируемой детерминированной зави-

симости $F(Q_H(x,t))$ от результатов всегда неполного наблюдения $Q_H(x,t)$ за текущим состоянием $Q(x,t)$ ОРП:

(11) $\tilde{y} = (\tilde{z}^0, \tilde{w}) = F(Q_H(x,t))$,

где $Q_H(x,t)$ и $F(Q_H(x,t))$ должны быть выбраны из условий минимальной сложности технической реализации СУ на множестве возможных вариантов, обеспечивающих требуемую точность вычисления $\tilde{y}$.

Достаточным основанием для подобного идеализированного описания идентификатора, реализуемого в форме (11), является известная теорема разделения [9], согласно которой такое представление становится возможным при надлежащем проектировании наблюдателя состояния с требуемыми динамическими свойствами, эффективно функционирующего в условиях воздействия случайных помех.

В итоге возникает задача проектирования идентификатора (11) и синтеза регулятора $u = u(Q_H(x,t))$, обеспечивающих решение детерминированной краевой задачи (1), (2), (4), (10), (11) с минимальным значением критерия оптимальности (8) при $z^0 = \tilde{z}^0$, $w = \tilde{w}$ в (3).

Ниже предлагаются некоторые практически реализуемые способы решения сформулированных задач управления неполностью определенными моделями ОРП.

## 2 Робастная параметрическая оптимизация динамических систем с распределенными параметрами

В целом ряде случаев известные условия оптимальности допускают предварительную параметризацию управляющих воздействий, позволяя найти $u^*(t)$ в задаче робастной оптимизации (1) – (9) в определенном классе функций с точностью до некоторого вектора параметров $\Delta = (\Delta_i), i = \overline{1,N}$, $\Delta \in G_N \subset E^N$ на заданном подмножестве $G_N$ векторного пространства $E^N$, которые должны быть определены на последующем этапе ее решения.

Имея в виду, что задача управления ансамблем траекторий (6) сводится при некоторой (заранее неизвестной) фиксированной величине $y = \bar{y} = (\bar{z}^0, \bar{w}) \in Y$ к задаче управления «изолированной» траекторией $z(t, u(\cdot), \bar{y})$ [1], можно, используя принцип максимума Понтрягина для бесконечномерной детерминированной модели ОРП вида (1), (2), (4), при $y = \bar{y}$, получить подобное параметрическое представление $u^*(t)$ [7, 10].

Например, применительно к базовому критерию быстродействия (при $f_0(\cdot) \equiv 1, F_0(\cdot) \equiv 0$ в (8) и $G_N = \{\Delta : 0 < \Delta_i < \infty,\ i = \overline{1,N}\}$) $u^*(t)$ следует искать в классе релейных функций $u_0(t)$, попеременно принимающих на промежутке $[0,T]$ только свои предельно допустимые значения $u_{\max}$ и $u_{\min}$ при $U = [u_{\min}, u_{\max}]$ [7, 11].

Тем самым $u^*(t)$ определяется априори с точностью до числа $N$ и длительностей $\Delta_i$ интервалов своего постоянства. Если теперь при известных решениях системы (1), (2) в классе параметризуемых указанным образом управляющих воздействий $u(t)$ функционал качества (8) и $Q(x, u(\cdot), y, T)$ в (7) могут быть определены как явные функции $I_3(\Delta, y, T)$ и $Q_1(\Delta, x, y)$ переменных $\Delta, y$ и $x$, то исходная задача (1) – (9) трансформируется в специальную задачу математического программирования (полубесконечной оптимизации (ЗПО) [10]) на экстремум функции конечного числа $N$ переменных $\Delta_i$

(12) $I(\Delta,T)=\max\limits_{y\in Y} I_3(\Delta,y,T)\to\min\limits_{\Delta\in G_n}$

с континуумом ограничений

(13) $\Phi(\Delta)=\max\limits_{y\in Y}\left[\max\limits_{x\in[x_0,x_1]}\left|Q_1(\Delta,x,y)-Q^*(x)\right|\right]\le\varepsilon_0$.

Полагая $l=(x,y)$, $l\in\Omega=Y\times[x_0,x_1]$, приведем ограничение (13) к виду

(14) $\Phi(\Delta)=\max\limits_{l\in\Omega}\left|Q_1(\Delta,l)-Q^*(x)\right|\le\varepsilon_0$

с функцией максимума $\Phi(\Delta)$, определяемой на расширенном по сравнению с детерминированной задачей множестве $\Omega$ элементов $l=(x,y)$, включающем кроме пространственной переменной $x\in[x_0,x_1]$ все допустимые значения неопределенных факторов $y\in Y$.

Решение достаточно широкого круга ЗПО вида (12), (14) может быть получено в условиях малостеснительных ограничений альтернансным методом [10]. Метод базируется на специальных альтернансных свойствах решения $\Delta^*$ задачи (12), (14) в совокупности с дополнительной информацией о характере зависимости целевой функции $I_3(\Delta^*,y,T)$ от $y\in Y$ и конфигурации распределения результирующего состояния $Q_1(\Delta^*,l)$ на множестве $\Omega$, диктуемой закономерностями предметной области каждой конкретной рассматриваемой задачи.

Согласно этим альтернансным свойствам [10], при $\Delta=\Delta^*$ найдутся $R_y$ точек $y_{0v}^0\in Y$, $v=\overline{1,R_y}$ и $R_x$ точек $l_j^0=(x_j^0,y_j^0)\in\Omega$, $j=\overline{1,R_x}$, на которых достигаются, соответственно, максимальные значения $I_3(\Delta^*,y_{0v}^0)$, равные критерию оптимальности $I(\Delta^*,T)$, и максимально допустимые отклонения $Q_1(\Delta^*,l)$ от $Q^*(x)$, равные $\varepsilon_0$, т.е. выполняются равенства

(15) $I_3(\Delta^*,y_{0v}^0)=I(\Delta^*,T)$, $v=\overline{1,R_y}$;

(16) $\left|Q_1(\Delta^*,l_j^0)-Q^*(x_j^0)\right|=\varepsilon_0$, $j=\overline{1,R_x}$.

Здесь числа $R_x$ и $R_y$ должны быть найдены согласно равенствам

(17) $R_x+R_y=N+1$, если $\varepsilon_{\min}^{(N)}<\varepsilon_0<\bar{\varepsilon}$; $R_x=N+1$, если $\varepsilon_0=\varepsilon_{\min}^{(N)}$; $R_y=N+1$, если $\varepsilon_0\ge\bar{\varepsilon}$,

где значение $\bar{\varepsilon}$ и минимально достижимая в классе управлений, однозначно характеризуемых вектором $\Delta$ с $N$ компонентами $\Delta_1,\Delta_2,...,\Delta_N$, величина $\varepsilon_{\min}^{(N)}$ (минимакс) ошибки равномерного приближения $Q_1(\Delta,l)$ к $Q^*(x)$ на множестве $\Omega$ определяются соотношениями

(18) $\varepsilon_{\min}^{(N)}=\inf\limits_{\Delta\in G_N}\Phi(\Delta)$; $\bar{\varepsilon}=\Phi(\bar{\Delta})$; $\bar{\Delta}=\arg\inf\limits_{\Delta\in G_N} I(\Delta,T)$.

При этом заранее нефиксируемая размерность $N$ искомого вектора параметров $\Delta^*$ определяется в большинстве типичных ситуаций сравнением заданной величины $\varepsilon_0$ в (14) с членами убывающего ряда неравенств, образуемого значениями минимаксов $\varepsilon_{\min}^{(j)}$ при последовательном возрастании $j$ от 1 до $s$, где $\varepsilon_{\min}^{(s)}$ совпадает с точной нижней границей $\varepsilon_{\inf}\ge 0$ достижимых значений $\Phi(\Delta)$:

(19) $\varepsilon_{\min}^{(1)} > \varepsilon_{\min}^{(2)} > \ldots > \varepsilon_{\min}^{(j)} > \varepsilon_{\min}^{(j+1)} > \ldots > \varepsilon_{\min}^{(s)} = \varepsilon_{\inf} \geq 0$,

согласно правилу [10]:

(20) $N = \upsilon \; \forall \varepsilon_0 : \varepsilon_{\min}^{(\upsilon)} \leq \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(\upsilon-1)}, \; \upsilon \in \{\overline{1,s}\}$.

При наличии дополнительной информации о конфигурации распределений $I_3(\Delta^*, y, T)$ и $Q_1(\Delta^*, l) - Q^*(x)$ на $Y$ и $\Omega$, позволяющей идентифицировать точки $y_{0v}^0$, $l_j^0$ и знаки разностей $Q_1(\Delta^*, l_j^0) - Q^*(x_j^0)$, правило (20) и равенства (15), (16) в условиях каждого из вариантов в (17) трансформируются к системе уравнений, замкнутой относительно всех неизвестных, к числу которых относятся значения $\Delta_i^*, \; i = \overline{1,N}$; величина $\varepsilon_{\min}^{(N)}$, если $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(N)}$, и $I(\Delta^*, T)$. Специфическая проблема выявления характера распределений $Q_1(\Delta^*, l)$ и $I_3(\Delta^*, y, T)$ на $\Omega$ может быть решена на основе соответствующих свойств результирующих состояний для изолированных траекторий [7,10] и особенностей конкретных задач. В частности, в наиболее характерных ситуациях все значения $y_j^0, y_{0v}^0$ принадлежат границе $\partial Y$ множества $Y$ и могут быть заведомо определены с привлечением закономерностей предметной области.

Таким образом, равенства (15), (16) могут быть дополнены соотношениями

(21) $$l_j^0 = (x_j^0, y_j^0); \; y_j^0, y_{0v}^0 \in \partial Y; \; x_j^0 \in \{x_{j_p}, x_0, x_1\}, \; j = \overline{1,R_x}; \; v = \overline{1,R_y};$$
$$\frac{\partial}{\partial x}\left[Q_1(\Delta^*, x_{j_p}, y_j^0) - Q^*(x_{j_p})\right] = 0, \; p = \overline{1,R_{1x}}; \; R_{1x} \leq R_x,$$

позволяющими отыскать координаты $x_{j_p}$ точек экстремума разности $Q_1(\Delta^*, x, y_j^0) - Q^*(x)$ на $[x_0, x_1] \ni x$, если $l_j^0 = (x_{j_p}, y_j^0)$ при известных $y_j^0$.

Применительно к базовой задаче быстродействия критерий оптимальности представляет собой сумму длительностей $\Delta_i, \; i = \overline{1,N}$, интервалов постоянства управляющих воздействий $u^*(t)$ релейной формы $u_0(t)$:

(22) $I(\Delta, T) = T = \sum_{i=1}^{N} \Delta_i \rightarrow \min\limits_{\Delta \in G_n}$.

Для соответствующей ЗПО (22), (14) расчетная система уравнений альтернансного метода конструируется при сохранении правила (20) для выбора $N$ на основе равенств (16), (21) в условиях [7, 10]

(23) $R_x = N + 1$, если $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(N)}$; $R_x = N$, если $\varepsilon_{\min}^{(N)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(N-1)}$.

## 3 Задача синтеза систем оптимального управления неполностью определенными моделями ОРП

Пусть далее требуется определить алгоритм оптимального управления с обратными связями, обеспечивающий решение задачи оптимизации (1) – (5), (8), (10), (11) для каждого из допустимых значений $y = \tilde{y} \in Y$ при $U = [u_{\min}, u_{\max}]$ в (4).

### 3.1 Задача оптимального быстродействия

Рассмотрим сначала соответствующую детерминированную задачу синтеза оптимальной по быстродействию СУ с $f_0(\cdot) \equiv 1,\ F_0(\cdot) \equiv 0$ в (8) для любого заранее фиксируемого значения $y = \tilde{y} = (\tilde{z}^0, \tilde{w}) \in Y$.

Синтез оптимального регулятора по общему методу фазового пространства [12] приводит к технически нереализуемому алгоритму релейного управления

$$(24)\quad u^*(z) = \frac{u_{\max} + u_{\min}}{2} \pm \frac{u_{\max} - u_{\min}}{2} sign\, h(z)$$

с обратными связями по всем координатам вектора $z$ и гиперповерхностью переключения $h(z) = 0$ в бесконечномерном пространстве состояний объекта (1), построение которой представляет собой практически неразрешимую задачу.

Переход к реализуемой замкнутой СУ с неполным измерением состояния $\tilde{Q}(x,t) = (Q(\tilde{x}_j, t)) = Q_j(t)),\ j = \overline{1,N},$ в некоторых $N$ точках $\tilde{x}_j \in [x_0, x_1]$ обеспечивается выбором другой, отличной от $h(z)$, функции переключения $h_1(\tilde{Q}, \tilde{y})$ в форме линейной комбинации $N$ сигналов обратной связи по измеряемым величинам $Q_j(t), Q_j(T) = Q_j^T(\tilde{y})$ с коэффициентами передачи $\rho_j(\tilde{y})$:

$$(25)\quad h_1(\tilde{Q}, \tilde{y}) = \sum_{j=1}^{N} \rho_j(\tilde{y})(Q_j^T(\tilde{y}) - Q_j(t)).$$

Если выбрать в качестве $\rho_j(\tilde{y})$ нетривиальные решения однородной системы $N-1$ линейных уравнений с $N$ неизвестными

$$(26)\quad \sum_{j=1}^{N} \rho_j(\tilde{y})(Q_j^T(\tilde{y}) - Q_j(\tilde{t}_m)) = 0,\ m = \overline{1, N-1},$$

где $\tilde{t}_m,\ m = \overline{1, N-1}$ - расчетные моменты переключения оптимального по быстродействию программного управления $u^*(t)$ релейной формы с $N$ интервалами постоянства длительностью $\Delta_i^*,\ i = \overline{1,N}$, определяемые вместе с $Q_j(\tilde{t}_m)$ и $Q_j^T(\tilde{y})$ для заданной величины $\tilde{\varepsilon}_0(\tilde{y})$ при расчете $u^*(t)$ альтернансным методом, то $h_1(\tilde{Q}, \tilde{y})$ в (25) меняет знак при переходе через нуль вместе с $h(z)$ при $t = \tilde{t}_m$, и только в эти моменты времени, в силу чебышевских свойств функции $h_1(\tilde{Q}, \tilde{y})$, которая не может иметь более $N-1$ нулей на $[0,T] \ni t$ [7].

Здесь предполагается, что в соответствии с правилом (20) для $\tilde{\varepsilon}_0(\tilde{y})$ в (10), $N = const\ \forall \tilde{y} \in Y$, например, в характерной ситуации $\tilde{\varepsilon}_0(\tilde{y}) = \varepsilon_{\min}^{(N)}(\tilde{y})$.

Таким образом, получаем уравнение оптимального регулятора в детерминированной задаче быстродействия следующего вида

$$(27)\quad u^*(\tilde{Q}, \tilde{y}) = \frac{u_{\max} + u_{\min}}{2} \pm \frac{u_{\max} - u_{\min}}{2} sign\ h_1(\tilde{Q}, \tilde{y}).$$

Построение замкнутой системы оптимального по быстродействию управления с регулятором (25) – (27) в условиях интервальной неопределенности значений $y \in Y$ требует дополнения ее структуры идентификатором (11) реализуемых величин $\tilde{y}$ по результатам наблюде-

ния текущего состояния $Q_H(x,t)=(Q(\bar{x}_j,t)=(\overline{Q}_j(t))$ в некоторых $r$ точках $\bar{x}_j\in[x_0,x_1]$, $j=\overline{1,r}$, частично или полностью совпадающего с измеряемыми величинами $\widetilde{Q}(x,t)$ в (25) – (27) в зависимости от соотношения между числом $N$ интервалов постоянства $u^*(t)$ и размерностью $r$ вектора $y=(y^{(m)})$, $m=\overline{1,r}$, учитываемого в рассматриваемой конкретной ситуации:

(28) $Q_j(t)=\overline{Q}_j(t)$, $j=\overline{1,\mu}$; $\mu=\min\{N,r\}$.

Для некоторого заданного момента времени $0<t_\Phi<\Delta_1^*$ в пределах первого интервала постоянства оптимального управления $u^*(t)$ интегрирование уравнений (1) модели ОРП позволяет найти в форме (2) зависимости $g_j(\widetilde{y},t_\Phi)$ величин $\overline{Q}_j(t_\Phi)$, $j=\overline{1,r}$, от $\widetilde{y}$.

Соответствующая система равенств

(29) $\overline{Q}_j(t_\Phi)=g_j(\widetilde{y}^{(1)},\widetilde{y}^{(2)},...,\widetilde{y}^{(r)},t_\Phi)$, $j=\overline{1,r}$, $\widetilde{y}\in Y$

определяет реализуемые значения $\widetilde{y}$ в окрестности некоторой номинальной точки $\widetilde{y}=y_H$ как неявно заданные, однозначные, непрерывные и непрерывно дифференцируемые по всем аргументам функции

(30) $\widetilde{y}^{(m)}=F_m(\overline{Q}_1(t_\Phi),\overline{Q}_2(t_\Phi),...,\overline{Q}_r(t_\Phi),)$, $m=\overline{1,r}$

от наблюдаемых переменных $\overline{Q}_j(t_\Phi)$, если якобиан $J$ системы (29)

(31) $$J=\frac{D(g_1,g_2,...,g_r)}{D(\widetilde{y}^{(1)},\widetilde{y}^{(2)},...,\widetilde{y}^{(r)})}=\begin{vmatrix}\frac{\partial g_1}{\partial\widetilde{y}^{(1)}} & \frac{\partial g_1}{\partial\widetilde{y}^{(2)}} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial\widetilde{y}^{(r)}}\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ \frac{\partial g_r}{\partial\widetilde{y}^{(1)}} & \frac{\partial g_r}{\partial\widetilde{y}^{(2)}} & \cdots & \frac{\partial g_r}{\partial\widetilde{y}^{(r)}}\end{vmatrix}$$

отличен от нуля в точке $\widetilde{y}=y_H$ [13].

Последнее условие, как правило, можно считать выполненным для системы $r$ независимых функций $\overline{Q}_j(t)$, $j=\overline{1,r}$.

По известным правилам дифференцирования неявно заданных функций могут быть заранее вычислены при заданных зависимостях $g_j(\widetilde{y},t_\Phi)$ в (29) производные $\frac{\partial^k\widetilde{y}^{(m)}}{\partial\overline{Q}_j^k}$, $k\ge1$, в точке $\widetilde{y}=y_H$, $\overline{Q}_j=\overline{Q}_j(y_H,t_\Phi)$, $j=\overline{1,r}$. В частности, здесь [13]

(32) $$\left(\frac{\partial\widetilde{y}_m}{\partial\overline{Q}_j}\right)_{\widetilde{y}=y_H}=-\left[\frac{1}{J}\cdot\frac{D(g_1,...,g_r)}{D(\widetilde{y}^{(1)},\widetilde{y}^{(2)},...,\widetilde{y}^{(m-1)},\overline{Q}_j,\widetilde{y}^{(m+1)},...,\widetilde{y}^{(r)})}\right]_{\widetilde{y}=y_H}.$$

Функция $F$ в уравнении идентификатора (11) определяется по значениям $\left(\frac{\partial^k\widetilde{y}^{(m)}}{\partial\overline{Q}_j^k}\right)_{\widetilde{y}=y_H}$, $k=\overline{1,s}$, с требуемой точностью, фиксируемой числом $s\ge1$, системой равенств (30), задаваемых суммами $s$ членов разложения каждой из функций $F_m$ в (30) в ряд Тейлора по степеням

$\overline{Q}_j$ в точке $\tilde{y} = y_H$. В линейном приближении с $s = 1$, которым можно ограничиться в типичных ситуациях, эти равенства представляются суммами сигналов линейных обратных связей по наблюдаемым переменным $\overline{Q}_j(t_\Phi)$ с известными, согласно (32), коэффициентами передачи $\alpha_{mj}$:

$$(33)\quad \tilde{y}^{(m)} = \tilde{y}_H^{(m)} + \sum_{j=1}^{r} \alpha_{mj}\left(\overline{Q}_j(t_\Phi) - \overline{Q}_{jH}\right);\ \alpha_{mj} = \left(\frac{\partial \tilde{y}^{(m)}}{\partial \overline{Q}_j}\right)_{\tilde{y}=y_H};\ \overline{Q}_{jH} = g_j(y_H, t_\Phi),\ m = \overline{1,r}.$$

Аналогичным образом по известным зависимостям $\rho_i(\tilde{y}),\ i = \overline{1,N}$, которые определяются предварительным решением систем уравнений (26) для различных значений $\tilde{y} \in Y$, находятся их линейные приближения:

$$(34)\quad \rho_i(\tilde{y}) = \rho_i(y_H) + \sum_{m=1}^{r} \beta_{mi}\left(\tilde{y}^{(m)} - y_H^{(m)}\right);\ \beta_{mi} = \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial \tilde{y}^{(m)}}\right)_{\tilde{y}=y_H},\ i = \overline{1,N}.$$

После подстановки в (34) разностей $\tilde{y}^{(m)} - y_H^{(m)}$ из (33), получим следующий алгоритм вычисления коэффициентов обратных связей в структуре функции переключения (25) по наблюдаемым переменным $\overline{Q}_j(t_\Phi)$:

$$(35)\quad \rho_i(\tilde{y}) = \rho_i(y_H) + \sum_{j=1}^{r} \gamma_{ij}\left(\overline{Q}_j(t_\Phi) - \overline{Q}_{jH}\right);\ \gamma_{ij} = \sum_{m=1}^{r} \alpha_{mj}\beta_{mi},\ i = \overline{1,N}.$$

Подобным способом можно вычислить значения $Q_j^T(\tilde{y}),\ j = \overline{1,N}$ в (25):

$$(36)\quad Q_i^T(\tilde{y}) = Q_i^T(y_H) + \sum_{j=1}^{r} \gamma_{ij}^*\left(\overline{Q}_j(t_\Phi) - \overline{Q}_{jH}\right);\ \gamma_{ij}^* = \sum_{m=1}^{r} \alpha_{mj}\beta_{mi}^*,\ i = \overline{1,N};\ \beta_{mi}^* = \left(\frac{\partial Q_i^T}{\partial \tilde{y}^{(m)}}\right)_{\tilde{y}=y_H}$$

Алгоритм управления (25) – (27), (35), (36) с априори фиксируемыми коэффициентами $\gamma_{ij}, \gamma_{ij}^*$ и значениями $\rho_i(y_H), \overline{Q}_{jH}, Q_i^T(y_H)$ определяет в совокупности процедуру структурно-параметрического синтеза замкнутой системы оптимального по быстродействию управления ОРП с идентификатором (33) при неполном измерении состояния в условиях интервальной неопределенности параметров объекта $y \in Y$.

### 3.2 Общая задача с параметризуемым управляющим воздействием

В достаточно общем случае программное оптимальное управление $u^*(\tilde{y}, t)$ в задаче (1) – (5), (8), (10), (11) с заранее фиксируемой величиной $\tilde{y} \in Y$ однозначно характеризуется совокупностью $N$ точек $\Delta_i^* \in [0, T],\ i = \overline{1,N},\ \Delta_{i-1}^* < \Delta_i^*,\ \Delta_0^* = 0;\ \Delta_N^* = T$, «сшивания» отдельных участков $u_i^*(\tilde{y}, t)$ на протяжении процесса управления с определяемыми известными условиями оптимальности характером непрерывного изменения управляющего воздействия, из которых с разрывами в этих точках компонуется в целом (с привлечением закономерностей предметной области, согласно правилу (20), и в зависимости от величины $\tilde{\varepsilon}_0(\tilde{y})$ в (10)) оптимальная программа $u^*(\tilde{y}, t)$, полный расчет которой может быть выполнен альтернансным методом [10].

В условиях $N = const\ \forall \tilde{y} \in Y$ будем иметь тогда

(37) $u_i^*(\tilde{y},t) \in \left\{u_{\max}, u_{\min}, u_i^0(\tilde{y},t)\right\} \forall t \in (\Delta_{i-1}^*, \Delta_i^*),\ i = \overline{1,N}$,

где $u_i^0(\tilde{y},t) \neq const$; $u_i^0(\tilde{y},t) \in [u_{\min}, u_{\max}]$, и конкретный выбор вида $u_i^*(\tilde{y},t)$ на множестве вариантов в (37) определяется принятым способом компоновки $u^*(\tilde{y},t)$ из участков $u_i^*(\tilde{y},t)$.

При этом, так же, как в (27), $u^*(\tilde{y},t) = u_{\max}\ \forall t \in (0, \Delta_1^*)$, т.е. $u_1^*(\tilde{y},t) = u_{\max}$. В частности, во многих конкретных ситуациях для всех $\tilde{y} \in Y$ при $N = 3$ [7, 10]

(38) $u^*(\tilde{y},t) = \begin{cases} u_{\max},\ 0 < t < \Delta_1^*; \\ u^0(\tilde{y},t) \neq const,\ \Delta_1^* < t < \Delta_2^*; \\ u_{\min},\ \Delta_2^* < t < \Delta_3^* \end{cases}$

с экспоненциальным характером изменения $u^0(\tilde{y},t)$ во времени, и следовательно, здесь $u_1^* = u_{\max}$, $u_2^* = u^0(\tilde{y},t)$ и $u_3^* = u_{\min}$.

Аналогично задаче быстродействия, оптимальный регулятор $u^*(\tilde{Q},\tilde{y})$ в замкнутой системе управления может быть теперь построен в условиях интервальной неопределенности значений $y \in Y$ на основе идентификатора (33) значений $\tilde{y}$ и функции переключения $h_1$ вида (25), которая в данном случае вместо релейного закона управления (27) должна обеспечить в моменты ее прохождения через нуль последовательный переход от первого из сшиваемых участков $u_1^*(\tilde{y},t)$ программы $u^*(\tilde{y},t)$ к последнему $u_N^*(\tilde{y},t)$:

(39) $u^*(\tilde{Q},\tilde{y}) = u_i^*(\tilde{Q},\tilde{y})\ \forall t \in (\Delta_{i-1}^*, \Delta_i^*),\ i = \overline{1,N},\ \Delta_0^* = 0,\ \Delta_N^* = T,\ \Delta_i^* = \underset{t > \Delta_{i-1}^*}{\min \arg} \left\{h_1(\tilde{Q},\tilde{y}) = 0\right\}$.

При этом значения $\tilde{y}$ и величины $\rho_j(\tilde{y}), Q_j^T(\tilde{y})$ в (25) по-прежнему могут быть определены в линейном приближении по значениям наблюдаемых переменных $\overline{Q}_j(t_\Phi), t_\Phi < \Delta_1^*$, согласно алгоритмам (33), (35), (36), базирующимся на использовании результатов расчета программных оптимальных управлений $u^*(\tilde{y},t)$ в заданном диапазоне изменений $\tilde{y} \in Y$.

Регуляторы $u_i^*(\tilde{Q},\tilde{y})$ в (39) реализуют программное воздействие $u_i^*(\tilde{y},t)$ в (37), в том числе, с алгоритмами управления $u_i^0(\tilde{Q},\tilde{y})$, если $u_i^*(\tilde{y},t) = u_i^0(\tilde{y},t)$:

(40) $u_i^*(\tilde{Q},\tilde{y}) \in \left\{u_{\max}, u_{\min}, u_i^0(\tilde{Q},\tilde{y})\right\} \forall t \in (\Delta_{i-1}^*, \Delta_i^*),\ i = \overline{1,N}$.

Известному по результатам расчета $u^*(\tilde{y},t)$ управлению $u_i^0(\tilde{y},t)$ отвечает получаемая в явной форме путем интегрирования уравнений объекта реакция управляемой величины $Q_\sigma^{(i)}(\tilde{y},t)$, $t \in (\Delta_{i-1}^*, \Delta_i^*)$, выбираемой на множестве измеряемых величин $Q_j(t)$ в (25) при $\sigma \in \left\{\overline{1,N}\right\}$.

Если $u_i^0(\tilde{y},t)$ и $Q_\sigma^{(i)}(\tilde{y},t)$ представляют собой монотонно изменяющиеся и непрерывно дифференцируемые функции временного аргумента *t*, что и имеет место в большинстве прикладных задач рассматриваемого класса, то эти зависимости для каждого фиксированного значения $\tilde{y} \in Y$ можно рассматривать в качестве параметрического задания уравнения регулятора $u_i^0(Q_\sigma^{(i)},\tilde{y})$ в виде однозначной непрерывно дифференцируемой функции

$u_i^0 = q_i(Q_\sigma^{(i)}, \tilde{y})$, производные которой по $Q_\sigma^{(i)}$ находятся по правилам параметрического дифференцирования $u_i^0(\tilde{y}, t)$ и $Q_\sigma^{(i)}(\tilde{y}, t)$ [13]. В частности

$$(41)\quad \frac{dq_i}{dQ_\sigma^{(i)}} = \frac{\dfrac{du_i^0}{dt}}{\dfrac{dQ_\sigma^{(i)}}{dt}}; \frac{d^2 q_i}{(dQ_\sigma^{(i)})^2} = \frac{\dfrac{d^2u_i^0}{dt^2}\cdot\dfrac{dQ_\sigma^{(i)}}{dt} - \dfrac{du_i^0}{dt}\cdot\dfrac{d^2Q_\sigma^{(i)}}{dt^2}}{\left(\dfrac{dQ_\sigma^{(i)}}{dt}\right)^3}.$$

Искомое уравнение регулятора устанавливается с требуемой точностью по заранее вычисляемым указанным образом значениям производных $d^k q_i / (dQ_\sigma^{(i)})^k$, $k = \overline{1, M}$, в форме суммы $M$ членов разложения $q_i(Q_\sigma^{(i)}, \tilde{y})$ в ряд Тейлора в начальной точке $Q_\sigma^{(i)}(\tilde{y}, t)$ при $t = \Delta_{i-1}^* + 0$:

$$(42)\quad u_i^0(Q_\sigma^{(i)}\tilde{y}) = u_{i0}^0(\tilde{y}) + \sum_{k=1}^{M} \eta_k(\tilde{y})(Q_\sigma^{(i)} - Q_{\sigma 0}^{(i)}(\tilde{y}))^k,$$

где

$$u_{i0}^0(\tilde{y}) = u_i^0(\tilde{y}, t)\Big|_{t=\Delta_{i-1}^*+0}; \; Q_{\sigma 0}^{(i)}(\tilde{y}) = Q_\sigma^{(i)}(\tilde{y}, t)\Big|_{t=\Delta_{i-1}^*+0};$$

$$(43)\quad \eta_k(\tilde{y}) = \frac{1}{k!}\left[\frac{d^k q_i(Q_\sigma^{(i)}, \tilde{y})}{(dQ_\sigma^{(i)})^k}\right]_{Q_\sigma^{(i)} = Q_{\sigma 0}^{(i)}(\tilde{y})}.$$

Если ограничиться здесь линейными приближениями (33) для идентификации величины $\tilde{y}$ и аналогичным описанием зависимостей $u_{i0}^0(\tilde{y})$, $Q_{\sigma 0}^{(i)}(\tilde{y})$ и $\eta_k(\tilde{y})$ от $\tilde{y}$, так же, как для $\rho_i(\tilde{y})$ в (34), то подобно (35), (36), получим на основании (42), (43) следующее уравнение регулятора $u_i^0(Q_\sigma^{(i)})$ с автоматической идентификацией значений $\tilde{y}$ по результатам наблюдений значений $\overline{Q}_j(t_\Phi)$, $j = \overline{1, r}$:

$$(44)\quad \begin{aligned} u_i^0(Q_\sigma^{(i)}) = {} & u_{i0}^0(y_H) + \sum_{j=1}^{r} \xi_j^{(1)}\left(\overline{Q}_j(t_\Phi) - \overline{Q}_{jH}\right) + \sum_{k=1}^{M}\left[\eta_k(y_H) + \sum_{j=1}^{r}\xi_{kj}^{(3)}\left(\overline{Q}_j(t_\Phi) - \overline{Q}_{jH}\right)\right]\times \\ & \times\left[Q_\sigma^{(i)} - Q_{\sigma 0}^{(i)}(y_H) - \sum_{j=1}^{r}\xi_j^{(2)}\left(\overline{Q}_j(t_\Phi) - \overline{Q}_{jH}\right)\right]^k, \end{aligned}$$

$$(45)\quad \xi_j^{(1)} = \sum_{m=1}^{r}\alpha_{mj}\left(\frac{\partial u_{i0}^0}{\partial \tilde{y}^{(m)}}\right)_{\tilde{y}=y_H}; \quad \xi_j^{(2)} = \sum_{n=1}^{r}\alpha_{nj}\left(\frac{\partial Q_{\sigma 0}^{(i)}}{\partial \tilde{y}^{(n)}}\right)_{\tilde{y}=y_H}; \quad \xi_{kj}^{(3)} = \sum_{v=1}^{r}\alpha_{vj}\left(\frac{\partial \eta_k}{\partial \tilde{y}^{(v)}}\right)_{\tilde{y}=y_H}.$$

Здесь все $\alpha_{ij}$; $i, j = \overline{1, r}$, находятся согласно (33); коэффициенты $\xi_j^{(1)}, \xi_j^{(2)}, \xi_{kj}^{(3)}$ и постоянные $u_{i0}^0(y_H)$, $Q_{\sigma 0}^{(i)}(y_H)$, $\overline{Q}_{jH} = \overline{Q}_j(y_H, t_\Phi)$ предварительно определяются по результатам расчета программных управлений $u^*(\tilde{y}, t)$.

Алгоритм управления (39), (40), (44), (45) определяет в совокупности процедуру структурно-параметрического синтеза замкнутой системы оптимального управления ОРП в рас-

сматриваемых условиях интервальной неопределенности для достаточно общего случая параметризуемых управляющих воздействий.

### Список литературы


[1] Куржанский А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности. М.: Наука, 1977.
[2] Федоров В.В. Численные методы максимина. М.: Наука, 1979.
[3] Поляк Б.Е., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. –М.: Наука, 2002.
[4] Афанасьев В.Н. Управление неопределенными динамическими объектами. – М.: Физматлит, 2008.
[5] Габасов Р., Кириллова Ф.М. Оптимальное управление и наблюдение в реальном времени // Известия РАН. ТиСУ, 2006. №3.
[6] Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2003.
[7] Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2009.
[8] Коллатц Л., Крабс В. Теория приближений. Чебышевские приближения. М.: Наука, 1978.
[9] Дегтярев Г.Л., Сиразетдинов Т.К. Теоретические основы оптимального управления упругими космическими аппаратами. М.: Машиностроение, 1986.
[10] Рапопорт Э.Я. Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации. М.: Наука, 2000.
[11] Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1965.
[12] Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. – М.: Наука, 1966.
[13] Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления, т.1. М.: Физматгиз, 1962.

# СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ НЕПОЛНОМ ИЗМЕРЕНИИ СОСТОЯНИЯ

**Ю.Э. Плешивцева[1], М.Х. Лапицкая[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
postman@samgtu.ru
тел: +7 (846) 278-44-00

***Ключевые слова:*** *объект с распределенными параметрами, критерий оптимальности, конечное интегральное преобразование, температурное поле, удельная мощность внутренних источников тепла, замкнутая система, измеритель состояния*

**Abstract**

This paper considers the problem of searching for optimal control algorithm by internal heat sources in feed-back system for stabilization of temperature field within the volume of heated steel billet. Power of internal heat sources as function of time $t$ is searched, when its spatial distribution along spatial coordinate $x$ is fixed in advance, and only information about billet temperature measured in one point is available.

## Введение

В работе рассматривается проблема синтеза замкнутой системы оптимального управления процессом индукционного нагрева стальной заготовки цилиндрической формы, представляющей собой объект с распределенными параметрами (ОРП). Формулируется и решается задача поиска оптимального алгоритма управления внутренними источниками тепла $F^*(\Theta_u(x,t))$, определяемого как функция наблюдаемой величины $\Theta_u(x,t)$ в процессе неполного измерения управляемой функции состояния, представляющей собой распределение температурного поля $\Theta(x,t)$ по пространственной координате $x$ и во времени $t$. В роли показателя качества выступает взвешенная сумма интегральных квадратичных ошибок приближения температурного поля на всем протяжении процесса управления к заданному распределению и энергетических затрат.

Для поиска алгоритма оптимального управления применяется метод динамического программирования, основное соотношение которого находится с использованием принципа оптимальности Беллмана.

## Постановка задачи синтеза алгоритма

Рассмотрим задачу аналитического конструирования регулятора (АКОР) при управлении распределением температурного поля $\Theta(x,t)$ по радиусу $R$ бесконечного цилиндра в процессе его индукционного нагрева.

Для объекта управления, описываемого в отклонениях от невозмущенного состояния $\Theta(x,t)=0$ уравнением теплопроводности Фурье следующего вида:

(1) $$\frac{\partial\Theta(x,t)}{\partial t} = a\frac{\partial^2\Theta(x,t)}{\partial x^2} + \frac{a}{x}\frac{\partial\Theta(x,t)}{\partial x} + \frac{1}{c\gamma}F(x,t);\ 0 < x < R,\ t > 0;$$

с граничными и начальными условиями:

(2) $$\lambda\frac{\partial\Theta(R,t)}{\partial x} + \alpha\Theta(R,t) = 0$$
$$\frac{\partial\Theta(0,t)}{\partial x} = 0;\ \Theta(x,0) = \Theta_0(x);\ x \in [0,R],$$

требуется найти алгоритм управления с обратной связью $F^*(\Theta_u(x,t))$, обеспечивающий минимум следующего критерия оптимальности:

(3) $$I = \int_0^\infty S\,dt \to \min,$$

где

(4) $$S = \int_0^R\int_0^R \omega_1(x,\xi)\Theta(x,t)\Theta(\xi,t)\,dx d\xi + \int_0^R \omega_2(x)F^2(\Theta(x,t))\,dx.$$

Здесь $F(x,t)$ – управляющее воздействие, в роли которого выступает удельная мощность внутреннего тепловыделения, $\lambda$ - коэффициент теплопроводности, $c$ - удельная теплоемкость, $\gamma$ – плотность, $a$ – коэффициент температуропроводности, $\alpha$ – коэффициент конвективной теплоотдачи, $\omega_1(x,\xi)$ и $\omega_2(x)$ – весовые коэффициенты, $\xi$ – переменная интегрирования по пространственной координате. Отклонения от заданного состояния $\Theta(x,t) = 0$ возникают за счет ненулевых начальных условий.

Подынтегральная функция (4) в критерии оптимальности (3) представляет собой взвешенную сумму интегральных квадратичных ошибок приближения управляемой величинына всем протяжении процесса управления к невозмущенному состоянию $\Theta(x,t) = 0$ и энергетических затрат, оцениваемых величиной интеграла от квадрата управляющего воздействия по области его определения.

В рассматриваемом случае управление представлено в следующем виде:

(5) $$F(x,t) = \varphi_y(x)F(t),$$

где $F(t)$ – сосредоточенное управляющее воздействие, представляющее собой активную мощность, поглощаемую в единице объема нагреваемого тела, а $\varphi_y(x)$ – заранее фиксируемая функция пространственного распределения внутреннего управления, определяемая по следующей формуле [3]:

$$\varphi_y(x) = \hat{\xi}\frac{ber'^2\hat{\xi}\,x/R + bei'^2\hat{\xi}\,x/R}{ber\hat{\xi}\,ber'\hat{\xi} + bei\hat{\xi}\,bei'\hat{\xi}},$$

где $\hat{\xi} = R\sqrt{2\pi f\mu_a\sigma}$, $f = 50$ Гц – частота питающего индуктор тока, $\mu_a$ – абсолютная магнитная проницаемость, $\sigma$ –удельная электропроводность.

**Решение задачи**

Пусть осуществляется непосредственный контроль температурного поля $\Theta(x,t)$ в единственной точке $x^* \in [0,R]$, а процесс измерения является безынерционным. В этом случае сигнал с выхода измерителя можно представить в следующем виде [1]:

$$(6)\quad \Theta_u(\hat{x},t) = \Theta_u(t) = \int_0^R G_u^*(x)\,\Theta(x,t)\,dx\ ,$$

где $G_u^*(x) = \delta(x - x^*)$ – функция Грина измерителя.

Основное уравнение метода динамического программирования, для рассматриваемой задачи синтеза оптимального регулятора имеет следующий вид:

$$(7)\quad \min_{F(x,t)}\left(\frac{dV(\Theta,t),t)}{dt} + S(\Theta,F,t)\right) = \left(\frac{dV(\Theta,t)}{dt} + S(\Theta,F,t)\right)_{F=F^*} = 0,$$

где функционал $S(\Theta,F,t)$ задается в форме (4), а функция Беллмана $V(\Theta,t)$ представляет собой минимальную величину составляющей критерия (3) на участке $(t',t_1)$ оптимального процесса [1]:

$$(8)\quad V(\Theta',t') = \min_{F(x,t),t\in[t',t_1]}\left[\int_{t'}^{t_1} S\,dt\right],$$

где $t'$ – произвольное значение времени, принимаемое в качестве начального момента.

Решение уравнения (7) относительно $V(\Theta',t')$ для рассматриваемого случая будем искать в следующей форме [1]:

$$(9)\quad V = \Theta_u^2(t)\int_0^R\int_0^R \upsilon(x,\xi)\,dx d\xi\,,$$

где $\upsilon(x,\xi)$ – подлежащая определению функция пространственных координат.

Если выполняется условие:

$$(10)\quad \upsilon(x,\xi) = G_u^*(x) Z G_u^*(\xi)\,,$$

где $Z = \int_0^R\int_0^R \upsilon(x,\xi)\ dx\,d\xi = const$, то на основе (7) после преобразований получим уравнение относительно $Z$:

$$(11)\quad Z\,L\left(G_u^*(x)\,G_u^*(\xi)\right) + \omega_1(x,\xi) - \frac{Z^2 G_u^*(x)\,G_u^*(\xi)}{(c\gamma)^2}\int_{x_0}^{x_1}\frac{1}{\omega_2(\eta)}\left(G_u^*(\eta)\right)^2 d\eta = 0\,,$$

с граничными условиями:

$$(12)\quad \begin{aligned} &\frac{\alpha}{\lambda}G_u^*(x_1) + \left[\frac{\partial}{\partial x}G_u^*(x_1)\right]_{x=x_1} - \frac{1}{x_1}G_u^*(x_1) = 0;\\ &\left[\frac{\partial}{\partial x}G_u^*(x_0)\right]_{x=x_0} - \frac{1}{x_0}G_u^*(x_0) = 0,\ x_0 = 0,\ x_1 = R, \end{aligned}$$

где $\eta$ – переменная интегрирования, а оператор $L\left(G_u^*(x)\,G_u^*(\xi)\right)$ имеет следующий вид:

$$L(G_u^*(x)\,G_u^*(\xi)) = \frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[a\,G_u^*(x)\,G_u^*(\xi)\right] - \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{a}{x}\,G_u^*(x)\,G_u^*(\xi)\right] +$$

(13)

$$+\frac{\partial^2}{\partial \xi^2}\left[a\,G_u^*(x)\,G_u^*(\xi)\right] - \frac{\partial}{\partial \xi}\left[\frac{a}{\xi}\,G_u^*(x)\,G_u^*(\xi)\right]$$

при некотором $Z = const \neq 0$.

Если для заданной функции Грина измерителя выполняются равенства (12), (13), и удается получить не зависящее от пространственных координат решение $Z$ уравнения (12), то представляя функцию $\upsilon(x,\xi)$ в виде (10), на основании (7) получим искомый алгоритм оптимального управления для рассматриваемо процесса с линейными обратными связями по наблюдаемым сигналам $\Theta_u(t)$ [1]:

$$(14)\quad F^*(\Theta_u, t) = -\frac{Z}{c\gamma \int\limits_{x_0}^{x_1} \omega_2(x)\,\varphi_y^2(x)\,dx}\left(\int\limits_0^R \varphi_y(x)\,G_u^*(x)\,dx\right)\Theta_u(t).$$

Равенство (10) возможно обеспечить не для всех измерителей состояния и весовых множителей $\omega_1(x,\xi)$ и $\omega_2(x)$. При заданной функции Грина измерителя, отвечающей требованиям (11) - (12), можно найти весовую функцию $\omega_1(x,\xi)$, применяя метод конечных интегральных преобразований и представляя в форме ее разложения в ряд по ортонормированному семейству функций $\tilde{\varphi}_n(\tilde{\mu}_n, x)$ следующего вида [1],[2]

$$(15)\quad \omega_1(x,\xi) = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} \overline{\overline{\omega}}_{1nm}\,\tilde{\varphi}_n(\tilde{\mu}_n, x)\,\tilde{\varphi}_m(\tilde{\mu}_m, \xi)\ ,$$

где $\overline{\overline{\omega}}_{1nm} = \int\limits_0^R\int\limits_0^R \omega_1\,\tilde{\varphi}_n(\tilde{\mu}_n, x)\,\tilde{\varphi}_m(\tilde{\mu}_m, \xi)\,\tilde{r}(x)\,\tilde{r}(\xi)\,dx\,d\xi$, а $\tilde{\mu}_n$ –собственные числа, $\tilde{r}(x) = \frac{x}{a}$ весовой коэффициент, $\varphi(\tilde{\mu}_n, x) = \frac{x}{\tilde{E}_n} J_0(x\tilde{\mu}_n/\sqrt{a})$ – собственные функции задачи следующего вида [1]:

$$(16)\quad L(\upsilon) + \omega_1(x,\xi) - \frac{1}{4(c\gamma)^2}\int\limits_{x_0}^{x_1}\frac{1}{\omega_2(\eta)}\left[\upsilon(\eta, x) + \upsilon(x,\eta)\right]\left[\upsilon(\eta,\xi) + \upsilon(\xi,\eta)\right]d\eta$$

где $L(\upsilon)$ – оператор вида (13), $\tilde{E}_n = \sqrt{\tilde{r}(x)\left(xJ_0(x\tilde{\mu}_n/\sqrt{a})\right)^2}$ .

Далее представив функций $\upsilon(x,\xi)$, $G_u^*(x)$ и $G_u^*(\xi)$ разложениями в бесконечный ряд подобно (15)

$$(17)\quad \upsilon(x,\xi) = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\overline{\overline{\upsilon}}_{nm}\tilde{\varphi}_n(\tilde{\mu}_n, x)\,\tilde{\varphi}_n(\tilde{\mu}_m, \xi)$$

$$(18)\quad \overline{G}_{un}^* = \int\limits_{x_0}^{x_1} G_u^*(x)\,\tilde{\varphi}_n(\tilde{\mu}_n, x)\,\tilde{r}(x)\,dx,\ \overline{G}_{um}^* = \int\limits_{x_0}^{x_1} G_u^*(\xi)\,\tilde{\varphi}_n(\tilde{\mu}_n, \xi)\,\tilde{r}(\xi)\,dx,$$

получим вместо (10):

$$(19)\quad \overline{\overline{\upsilon}}_{nm} = Z\overline{G}_{un}^*\,\overline{G}_{um}^*;\ m, n = 1,2,\ldots\ .$$

По найденным величинам $\overline{\overline{\upsilon}}_{nm}$, находятся моды $\overline{\overline{\omega}}_{1nm}$ из уравнений:

(20) $\overline{\overline{\omega}}_{1nm} = \left(\widetilde{\mu}_n^2 + \widetilde{\mu}_m^2\right)\overline{\overline{\upsilon}}_{nm} + \sum_{n_1,m_1=1}^{\infty} I_{n_1m_1}\,\overline{\overline{\upsilon}}_{nn_1}\,\overline{\overline{\upsilon}}_{mm_1};\ n,m = 1,2,\ldots,$

где $I_{n_1m_1} = \dfrac{1}{(c\gamma)^2 \int\limits_{x_0}^{x_1} \omega_2(x)\,\varphi_y^2(x)dx} \int\limits_{x_0}^{x_1} \varphi_y(\eta)\,\widetilde{\varphi}_{n_1}(\widetilde{\mu}_{n_1},\eta)\,d\eta \int\limits_{x_0}^{x_1} \varphi_y(\eta)\,\widetilde{\varphi}_{m_1}(\widetilde{\mu}_{m_1},\eta)\,d\eta.$

Ограничиваясь первыми $N$ членами разложения в ряд (15), можно однозначно определить весовую функцию $\omega_1(x,\xi)$, с точностью до постоянной $Z$ в форме суммы $N^2$ слагаемых для которой оказывается возможным синтез оптимального регулятора с выбранным измерителем состояния.

Для расчета оптимального процесса найдем температурное поле в оптимальном процессе, воспользовавшись методом конечных интегральных преобразований. Согласно [2], функция состояния $\Theta(x,t)$ рассматриваемого объекта может быть представлена ее разложением в сходящийся в среднем ряд по ортонормированной с весом $r(x)$ системе собственных функций:

(21) $\Theta(x,t) = \sum_{n=1}^{N} \overline{\Theta}_n(\mu_n,t)\ \varphi(\mu_n,x),\ \overline{n=1,N}$,

где $\varphi(\mu_n,x) = \dfrac{1}{E_n} J_0(x\mu_n/\sqrt{a})$ – собственные функции краевой задачи (1), (2), $\mu_n$ – собственные числа, $r(x) = \widetilde{r}(x)$, $E_n = \sqrt{r(x)\left(J_0(x\mu_n/\sqrt{a})\right)^2}$, $\overline{\Theta}_n(\mu_n,t)$ – моды разложения, определяемые системой уравнений следующего вида [1],[2].

(22) $\dfrac{d\overline{\Theta}_k^*}{dt} + \mu_k^2\overline{\Theta}_k^* + \sum_{v=1}^{N} P_{kv}\overline{\Theta}_v^* = 0,\ \overline{\Theta}_k(\mu_k,0) = \overline{\Theta}_0^{(0)}(\mu_k),\ k = \overline{1,N}$ ,

где $P_{kv}$ определяются следующим выражением:

(23) $P_{kv} = Z\dfrac{(c\gamma)^2 \int\limits_0^R \varphi_y(x)\,G_u^*(x)\,dx}{\int\limits_0^R \omega_2(x)\varphi_y^2(x)\,dx} \int\limits_0^R \varphi_y(\xi)\,\varphi_k(\mu_k,\xi)\,r(\xi)\,d\xi \int\limits_0^R G_u^*(\eta)\,\varphi_v(\mu_v,\eta)\,dx$ .

На рисунках 1, 2 приведены некоторые результаты вычислений для равномерного начального распределения температурного поля $\Theta_0(x) = -470^\circ C$, в процессе нагрева стального цилиндра радиусом $R = 0.075$м, $x^* = 0.8R$, для значений $N = 10$, при следующих теплофизических параметрах процесса критерий Био $Bi = 0.1$, $\lambda = 30.5$ Вт/м·°С, $a = 0.055\cdot10^{-}$ м$^2$/с, $\mu_a = 1.26\cdot10^{-6}$ Гн/м, $\sigma = 8.2\cdot10^5$ См/м, весовой коэффициент $\omega_2(x) = const = 3\cdot10^{11}$ м$^4$/Вт$^2$ .

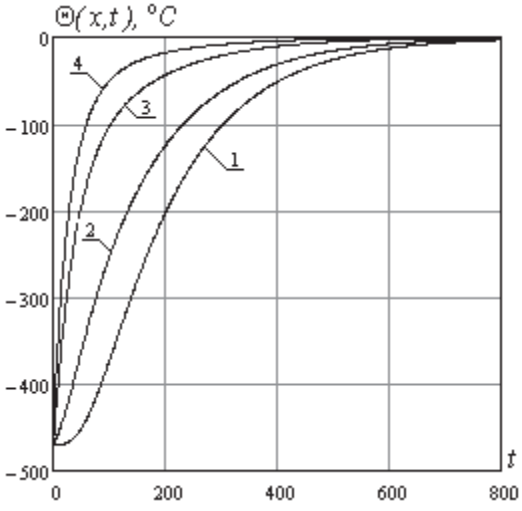



Рисунок 1 – Изменение во времени температуры в различных точках:
1 – $x = 0$, 2 – $x = R/2$, 3 – $x = 0.8R$,
4 – $x = R$ в оптимальном процессе нагрева

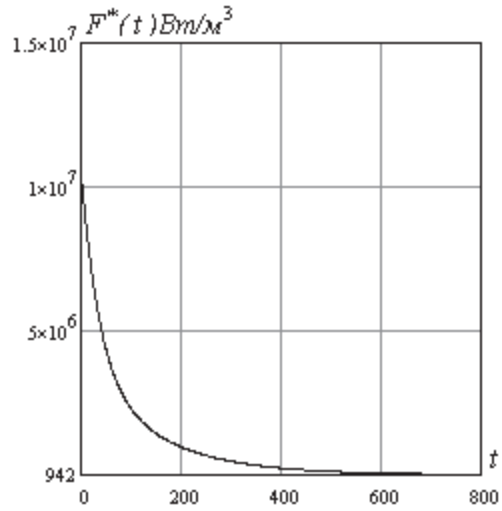



Рисунок 2 – Зависимость управляющего воздействия от времени
в оптимальном процессе нагрева

**Заключение**

В результате работы получен оптимальный по критерию (3) алгоритм пространственно-временного управления внутренними источниками тепла в процессе индукционного нагрева алюминиевой заготовки цилиндрической формы. Полученный алгоритм оптимального управления обеспечивает асимптотическую сходимость температурного поля к заданному состоянию. Разница между действительной и заданной температурой $\Delta\Theta_u(x,t)$ при времени нагрева $t = 800\text{с}$ составляет менее $4^\circ C$.

**Список литературы**

[1] Рапопорт, Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами.– М.: Высш. шк., 2008.
[2] Рапопорт, Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высш. шк., 2003.
[3] Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла.– М.:Металлургия, 1993.

# УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ С ХОЛОДНЫМ ТИГЛЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

**И.В. Позняк[1], А.Н. Шатунов[2]**

[1]Research Centre Rez Ltd.
25068, Husinec-Rez 130, Czech Republic
ivp@cvrez.cz
тел: +7 (911) 976-51-88

[2]Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, Россия
pattern@gu.ru
тел: +7 (812) 346-47-78

***Ключевые слова:*** *индукционная система, холодный тигель, обратная задача*

**Abstract**
Inverse techniques for analyzing and controlling of cold crucible induction melting are suggested. The approach is based on parameters of induction system together with using mathematical model of the process. Some electromagnetic mathematical models of induction system with slitted crucible are presented too. The approach allows to create adaptive control systems of technological processes. Resistance of empty inductor is analyzed on the base of suggested method.

## Введение

Индукционная плавка в холодном тигле (ИПХТ) представляет собой комплексный процесс, основанный на электромагнитном, температурном и магнитогидродинамическом явлениях. Сложная геометрия индукционной системы требует трехмерной математической постановки полевых задач. Индукционная плавка оксидов в холодном тигле, как правило, осуществляется на высокой частоте [1]. Разница в удельных сопротивлениях материалов элементов индукционной системы, которая может достигать четырех порядков, определяет сочетание сквозного и поверхностного нагрева. Это приводит к увеличению числа элементов дискретизации при использовании сеточных методов анализа этой системы, либо использованию комбинированных интегро-дифференциальных математических постановок [2]. Градиенты температур в расплаве требуют введения нелинейных коэффициентов в уравнениях для анализа процессов ИПХТ оксидов.

Сложность управления процессами ИПХТ, связанная с множеством возмущающих воздействий, ограничений и функциональных нелинейностей между управляющими и управляемыми параметрами, требует использования адаптивных управляющих систем. Отсутствие достоверных данных по электро- и теплофизическим свойствам расплавов оксидов при высоких температурах определяет построение систем анализа и управления процессами ИПХТ на основе решения обратных задач. Для повышения точности анализа и решения задач управления требуется переопределение системы уравнений.

Управление ИПХТ, как правило, сводится к поддержанию заданного уровня температуры расплава. При этом управляемым параметром может быть мощность в расплаве или его удельное сопротивление. Однако, мощность в оксидном расплаве невозможно определить экспериментальным путем, а его удельное сопротивление, в большинстве случаев, неизвестно. Эти параметры могут быть определены только с помощью математического моделирования.

Несмотря на то, что существует множество математических моделей электромагнитного поля ИПХТ [3-9], их использование в системах управления или для решения обратных задач либо затруднено, либо требует их адаптации к конкретным технологическим условиям. Поэтому разработка новых математических моделей ИПХТ является актуальной.

## 1 Математические модели электромагнитного поля ИПХТ

**2D интегро-дифференциальный метод**

Математическая модель электромагнитного поля основана на комбинации конечно-элементного и интегрального подхода [10]. Внутренняя задача расчета электромагнитного поля в расплаве (сквозной нагрев) решается методом конечных элементов (МКЭ). Внешняя задача, учитывающая элементы конструкции индукционной системы (поверхностный нагрев), решается методом интегральных уравнений (МИУ). Такой подход позволяет получить распределенные параметры в исследуемой системе с большим числом элементов за малое время счета.

Проводящий разрезной тигель представляет собой серьезную трудность при математическом анализе. В модели разрезной тигель описывается парами одновитковых соленоидов, токи в которых находятся в противофазе. Это дает возможность свести трехмерную задачу к двумерной. Использование МКЭ для решения внутренней задачи определяется необходимостью учета формы ванны расплава.

Внешняя задача расчета ЭМП описывается уравнением Фредгольма второго рода, а внутренняя – двумерным дифференциальным уравнением относительно векторного магнитного потенциала:

$$(1)\quad \begin{cases} 2\pi R_i \dot{E}_i + j\omega \int\limits_{S_1} \sigma_j \dot{E}_j M_{ij} dS + j\omega \int\limits_{S_2} \sigma_k \dot{E}_k \left(M_{ik} - M_{il}\right) dS = \dot{U}_i \\ \dfrac{1}{\mu}\left(\dfrac{\partial^2 \dot{A}}{\partial R^2} + \dfrac{1}{R}\dfrac{\partial \dot{A}}{\partial R} + \dfrac{\partial^2 \dot{A}}{\partial z^2} - \dfrac{\dot{A}}{R^2}\right) = j\omega\sigma \dot{A} \end{cases}$$

Интеграл по площади $S_1$ учитывает влияние проводящих частей индукционной системы за исключением разрезного тигля, влияние которого учитывается интегралом по площади $S_2$. Решение системы уравнений (1) реализуется блочно-итерационным методом. Результатом расчета являются все распределенные и интегральные параметры индукционной системы.

Недостатком данной постановки являются вычислительные трудности, возникающие при анализе системы с двумя и более областями, в которых необходимо решать задачу электромагнитного поля МКЭ.

**2D дифференциальный метод**

Учет разрезного тигля в двумерной дифференциальной постановке основан на том же принципе, что и в комбинированном методе. Система уравнений для областей $S_1$ и $S_2$ имеет следующий вид:

$$(2)\quad \begin{cases} \dfrac{1}{\mu_0}\left(\dfrac{\partial^2 \dot{A}}{\partial R^2} + \dfrac{1}{R}\dfrac{\partial \dot{A}}{\partial R} + \dfrac{\partial^2 \dot{A}}{\partial z^2} - \dfrac{\dot{A}}{R^2}\right) - j\omega\sigma\dot{A} = \dot{J}_{s_1} \\ \begin{cases} \dot{J}_{s_2} = -j\omega\sigma\dot{A} \\ div\left(\dot{J}_{s_2}\right) = 0 \end{cases} \\ \dfrac{1}{\mu_0}\left(\dfrac{\partial^2 \dot{A}}{\partial R^2} + \dfrac{1}{R}\dfrac{\partial \dot{A}}{\partial R} + \dfrac{\partial^2 \dot{A}}{\partial z^2} - \dfrac{\dot{A}}{R^2}\right) - j\omega\sigma\dot{A} = \dot{J}_{s_2} \end{cases}$$

Решение системы уравнений (2) реализуется также блочно-итерационным методом. Преимуществом этой постановки является возможность анализа индукционной системы с любым количеством областей, в которых осуществляется сквозной нагрев. Недостаток метода – большое время счета (десятки минут), которое неприемлемо для работы системы управления.

**3D дифференциальный метод**

Трехмерная модель ИПХТ описывается уравнениями относительно векторного магнитного потенциала [11]:

$$(3)\quad \begin{cases} \nabla^2 \dot{\vec{A}} - j\omega\sigma\mu\mu_0 \dot{\vec{A}} = \dot{\vec{J}}_{s_1} \\ div_{s_2}\left( j\omega\sigma\mu\mu_0 \dot{\vec{A}} \right) = 0 \end{cases}.$$

Математическая модель в данной постановке позволяет исследовать распределение электромагнитного поля во всех элементах индукционной системы. Недостаток метода – большое время счета (часы) и повышенные требования к вычислительной мощности, используемой компьютерной техники.

## 2 Постановка обратной задачи и решение переопределенной системы

Как правило, параметры ИПХТ оксидов ограничиваются измеренными, путем калориметрирования, потерями в элементах индукционной системы и частотой источника питания. Для анализа электромагнитной системы этого достаточно при условии, что известно удельное сопротивление расплава. Однако, в большинстве случаев, удельное сопротивление оксидного расплава является неизвестной величиной. Поэтому анализ параметров ИПХТ на основе решения прямой электромагнитной задачи невозможен. В этом случае необходимо решать коэффициентную обратную задачу с использованием одного из дополнительных данных об ИПХТ, например, тока индуктора, напряжения на индукторе или коэффициента мощности индуктора.

С другой стороны, избыточность исходных данных позволяет решать переопределенную систему уравнений, что повышает точность решения и позволяет избавиться от дуальности решения [1].

Установки ИПХТ оксидов, работающие на частотах выше 1.6 МГц, характеризуются напряжением на индукторе до 10 кВ, током индуктора до 350 А и коэффициентом мощности индуктора от 0.001 до 0.12. Напряжение и ток индуктора представляют собой амплитудно-модулированные сигналы с нелинейным законом изменения глубины модуляции. Измерить эти высокочастотные сигналы возможно только с помощью датчиков, реализующих аппаратное или программное выделение среднеквадратичного значения величины сигнала. Анализ существующих приборов для измерения сдвига фаз между высокочастотными сигналами позволяет сделать вывод о том, что современное развитие уровня техники не гарантирует прямого измерения этой величины с необходимым уровнем точности в установках ИПХТ на частотах выше 1.6 МГц. Поэтому достоверными данными являются только калориметрируемые потери в элементах индукционной системы, ток индуктора, напряжение на индукторе и частота источника питания. В этом случае, система уравнений для решения обратной электромагнитной задачи относительно электропроводности расплава с учетом переопределенности имеет следующий вид:

(4)
$$
\begin{cases}
\begin{cases}
r_i \dot{I}_i + j\omega \sum\limits_{S_1} \dot{I}_j M_{ij} + j\omega \sum\limits_{S_2} \dot{I}_k \left(M_{ik} - M_{il}\right) = \dot{U}_{ind} \\
\dfrac{1}{\mu_0}\left(\dfrac{\partial^2 \dot{A}}{\partial R^2} + \dfrac{1}{R}\dfrac{\partial \dot{A}}{\partial R} + \dfrac{\partial^2 \dot{A}}{\partial z^2} - \dfrac{\dot{A}}{R^2}\right) = j\omega\left(\overline{\sigma}_{me}\right)_1 \dot{A} \\
\sum\limits_{me} \omega^2 \left(\overline{\sigma}_{me}\right)_1 \dot{A}_k^2 V_k = P_{me}^e
\end{cases} \\
\begin{cases}
j\omega \sum\limits_{S_1} \dot{I}_j M_{ij} + j\omega \sum\limits_{S_2} \dot{I}_k \left(M_{ik} - M_{il}\right) - \dot{U}_{ind} = Z_1 \dot{I}_1 \\
\dfrac{1}{\mu_0}\left(\dfrac{\partial^2 \dot{A}}{\partial R^2} + \dfrac{1}{R}\dfrac{\partial \dot{A}}{\partial R} + \dfrac{\partial^2 \dot{A}}{\partial z^2} - \dfrac{\dot{A}}{R^2}\right) = j\omega\left(\overline{\sigma}_{me}\right)_2 \dot{A} \\
\sum\limits_{me} \omega^2 \left(\overline{\sigma}_{me}\right)_2 \dot{A}_k^2 V_k = P_{me}^e
\end{cases} \\
\begin{cases}
r_i \dot{I}_i + j\omega \sum\limits_{S_1} \dot{I}_j M_{ij} + j\omega \sum\limits_{S_2} \dot{I}_k \left(M_{ik} - M_{il}\right) - \dot{U}_{ind} = 0 \\
\dfrac{1}{\mu_0}\left(\dfrac{\partial^2 \dot{A}}{\partial R^2} + \dfrac{1}{R}\dfrac{\partial \dot{A}}{\partial R} + \dfrac{\partial^2 \dot{A}}{\partial z^2} - \dfrac{\dot{A}}{R^2}\right) = j\omega\left(\overline{\sigma}_{me}\right)_3 \dot{A} \\
\sum\limits_{ind} \omega^2 \overline{\sigma}_{ind} \dot{A}_l^2 V_l = P_{ind} \\
\sum\limits_{me} \omega^2 \left(\overline{\sigma}_{me}\right)_3 \dot{A}_k^2 V_k = P_{me}^e
\end{cases} \\
\sum\limits_{i=1}^{3} \left(\left(\overline{\sigma}_{me}\right)_0 - \left(\overline{\sigma}_{me}\right)_i\right)^2 \to \mathbf{min}
\end{cases},
$$

где: $\left|\vec{U}_{ind}\right|$ – напряжение на индукторе; $\left|\vec{I}_1\right|$ – ток индуктора; $P_{ind}$ – потери в индукторе. $P_{me}^e$ – мощность в расплаве.

В качестве математической модели в системе уравнений (4) можно использовать одну из перечисленных выше постановок, в зависимости от целей решаемых задач.

### 3 Система управление ИПХТ

Предложенная методика может быть использована в системе управления ИПХТ на основе мониторинга мощности в расплаве, либо его удельного сопротивления, как было отмечено выше. Система управления базируется на сборе и обработке информации о плавке. Вместе с этим, на основе экспериментальных данных с использованием математической модели производится расчет мощности в расплаве, либо его удельного сопротивления. Численная обработка процесса производится в реальном масштабе времени. Это позволяет не только управлять процессом, но и прогнозировать его развитие. Преимуществом предлагаемой системы управления является ее многофункциональность и гибкость в настройке [12, 13]. Структурная схема системы управления ИПХТ представлена на рисунке 1.

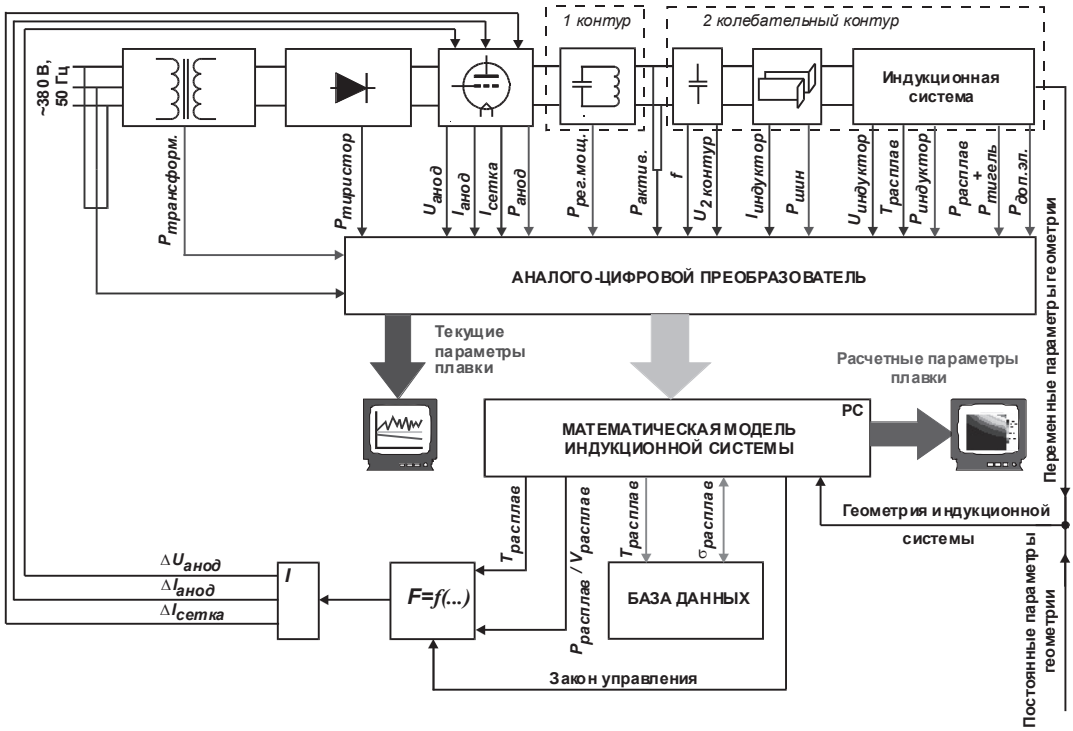



Рисунок 1 – Структура системы управления

Отличительной чертой предлагаемой системы управления является использование максимально доступной информации об объекте управления. При этом, общее число параметров, поступающих в систему от аналого-цифрового преобразователя и кажущееся на первый взгляд избыточным, не является таковым, поскольку все параметры тестируются, и для дальнейшей обработки выбирается только часть из них. С другой стороны, они используются для повышения точности работы системы управления за счет решения переопределенной системы уравнений.

## 4 Результаты и их обсуждение

В качестве примера было исследовано активное сопротивление пустого трехвиткового индуктора, используемого для ИПХТ на частоте 1.76 МГц, величину которого не удалось измерить прямым методом при использовании моста переменного тока QuadTech 7600 Precision LCR Meter [14]. Внутренний диаметр индуктора – 210 мм, высота – 90 мм и высота индуктирующего провода 21 мм.

Поскольку предложенная методика позволяет решать систему уравнений относительно любого интегрального параметра индукционной системы, она была применена для нахождения величины активного сопротивления этого индуктора.

Для решения полевой задачи использовалась модель электромагнитного поля в 3D постановке. Конечно-элементная модель индуктора представлена на рисунке 2. На рисунке. 3 представлено распределение векторов плотности тока в индукторе. Результатом работы 3D модели явилось активное сопротивление индуктора $r_{ind3}$ .

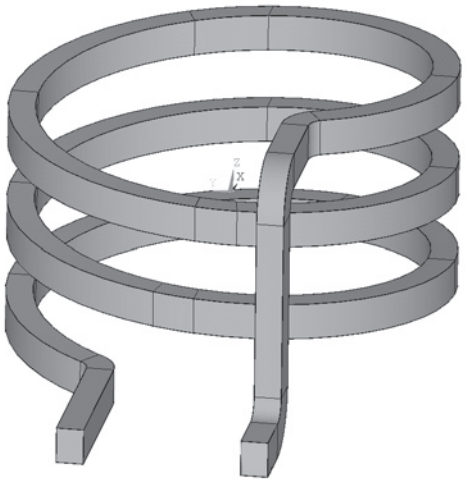


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель индуктора

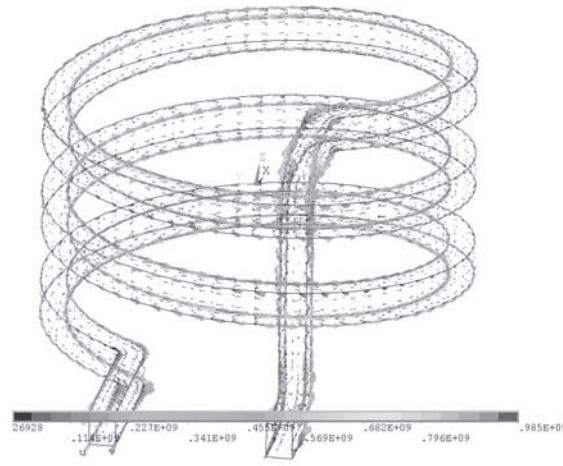


Рисунок 3 – Распределение векторов плотности тока

Для повышения точности решалась переопределенная система уравнений с использованием дополнительных исходных данных:

$$(5)\quad \begin{cases} r_{ind\,1} = \sqrt{\dfrac{\left|\vec{U}_{ind}\right|^2}{\left|\vec{I}_{ind}\right|^2} - X_{ind}^2} \\ r_{ind\,2} = \dfrac{P_{ind}}{\vec{I}_{ind}^2} \\ r_{ind\,3} \\ \sum\limits_{i=1}^{3}\left(r_{ind\,0} - r_{ind\,i}\right)^2 \to \mathbf{min} \end{cases},$$

где: $r_{ind\,1}$ – активное сопротивление индуктора, полученное с использованием тока $\left|\vec{I}_{ind}\right|$, напряжения $\left|\vec{U}_{ind}\right|$ и реактивного сопротивления индуктора $X_{ind}$; $r_{ind\,2}$ – активное сопротивление индуктора, полученное с использованием тока и электрических потерь в индукторе $P_{ind}$; $r_{ind\,0}$ – полученное математическое ожидание величины активного сопротивления индуктора.

Результаты работы представленной методики сведены в таблицу. Там же приведена величина активного сопротивления $r_{ind\,4}$, рассчитанная по широко используемой методике [15]:

$$(6)\quad r_{ind\,4} = \frac{\pi D_{ind} W \sqrt{f}}{503 \cdot h \sqrt{\sigma_{ind}}},$$

где, $D_{ind}$ – внутренний диаметр индуктора; $W$ – число витков индуктора; $h$ – высота индуктирующего провода; $\sigma_{ind}$ – электропроводность меди индуктора; $f$ – частота тока источника питания.

Таблица – Результаты определения активного сопротивления индуктора

| | $r_{ind1}$, Ом | $r_{ind2}$, Ом | $r_{ind3}$, Ом | $r_{ind0}$, Ом | $r_{ind4}$, Ом |
|---|---|---|---|---|---|
| Величина | $18.66 \cdot 10^{-3}$ | $20.07 \cdot 10^{-3}$ | $21.97 \cdot 10^{-3}$ | $20.23 \cdot 10^{-3}$ | $34.48 \cdot 10^{-3}$ |
| Отклонение по отношению к $r_{ind0}$, % | 7.78 | 0.81 | 8.58 | - | 70.41 |

Анализ полученных результатов показывает, что величина сопротивления, полученная по (6) имеет отклонение от математического ожидания более 70%.

**Благодарности**

Работа частично поддержана проектом SUSEN (CZ.1.05/2.1.00/03.0108), финансируемым Европейским региональным фондом развития (European Regional Development Fund).

**Список литературы**

[1] Петров Ю. Б. Индукционная плавка окислов. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 104 с.
[2] Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат, 1988.
[3] C. Gross, W. Assmus, A. Muiznieks et al. Power Consumption of skull Melting, Part II: Numerical Calculation of the Shape of the Molten Zone and Comparizon with Experiment // J. Cryst. Res. Technol., 1999. Vol. 34, pp. 329-338.
[4] V. Cingoski, H. Yamashita. Analysis of Induction Skull Melting Furnace by Edge Finite Element Method Excited from Voltage Source.// IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. VOL 30. NO. 5. SEPTEMBER 1994, pp.3459-3462
[5] Ch.P. Riley, J. Simkin. Effective Modeling of Eddy Currents within Segmented Components.// IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 30, NO. 5, SEPTEMBER 1994, pp.3008-3011.
[6] B.T. Min, S.W. Hong, J.H. Kim, S.H. Chung, J.H. Song. A Computational Analysis of the Cold Crucible Melting of Corium.// Proceedings of ICAAP '04, Pitsburg, PA USA, June 13-17, 2004.
[7] F. Z. Louai, D. Benzerga, M. Feliochi, G. Oeveley.2D and 3D Finite Element Modeling of an RF Plasma Device with Cold Crucible.// VDE BerICHtE NR 1160, 1995, pp.57-64.
[8] K. Iwai, Sh. Asai. The effect of design parameters on the magnetic field distribution around a cold crucible and the heat generation rate in it.// Modelling Simul. Maier. Sei. Eng. 3 (1995) 473-484. Printed in the UK.
[9] Ф.Р. Блок, К. Гайлитис, К. Хоффер. Расчет вихревых токов в сегментированном холодном тигле.// магнитная гиродинамика. – 1997. – Т. 33, № 2. – С. 147 – 155.
[10] Demidovitch V., Pozniak I. Combined method of electromagnetic field calculation in induction crucible furnaces. Proceedings of 40 International wissenschaftliches kolloquium, ILMENAU (Germany), 18.–21.09.1995, p.37-41.
[11] Chari M.V.K. Finite Element Solution of Eddy Current Problems in Magnetic Structures.// IEEE Trans. Power App.&Syst., Vol. Pas-93, Jan/Feb.,1974, pp.62-72
[12] Pozniak I., Petchenkov A. Special Tool for Investigation and Controlling of Induction Skull Melting Processes. Proceedings of the International Colloquium, Modelling for Saving Resources, Latvia, Riga, May 17-18, 2001.
[13] Позняк И.В., Печенков А.Ю., Логинов И.А. Адаптивная система управления электротехнологическими процессами в индукционных гарнисажных печах. Труды научно-технической конференции «Сварка и родственные технологии в современном мире», С.Петербург, 29-31.05.2003, с.129-135.
[14] 7600 Precision LCR Meter. Model B. Instruction Manual. QuadTech, Inc., 1997.
[15] А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов и др. Установки индукционного нагрева– Л.: Энергоиздат, 1981.

# УПРАВЛЕНИЕ ФРОНТОМ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РАСПЛАВА ПРИ ЗОННОЙ ПЛАВКЕ В ИДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ С ХОЛОДНЫМ ТИГЛЕМ

**М.Ю. Максименко, И.В. Позняк, А.Н. Шатунов, А.Ю. Печенков, В.В. Кичигин, А.И. Максимов**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, Россия
olin24@yandex.ru
тел: +7 (812) 346-47-78

***Ключевые слова:*** *индукционная система, холодный тигель, кристаллизация, высокотемпературный расплав*

**Abstract**

Mathematical model of crystallization melt at induction furnace with cold crucible is considered at the article. Process of crystallization provides cleaning of the melt from impurity, and also control of the front crystallization form allows to receive multicrystal structure of ingot with the set parameters. Some analyses results of suggested crystallization model are presented too.

## Введение

В настоящее время проблема обращения с обработанным ядерным топливом (ОЯТ) атомных станций является актуальной, поэтому постоянно ведутся исследовательские работы по развитию технологий переработки отработанного ядерного топлива. Существующие технологии обращения с отработанным ядерным топливом, основанные на химическом способе, имеют существенные недостатки, в первую очередь, связанные с экономическими, технологическими, экологическими и др. критериями [1]. К основным технологическим недостаткам относятся коррозия конструкционных материалов реакторов, что требует специальных мер защиты.

Способы обращения с жидкими радиоактивными отходами включают их концентрирование методами ионного обмена, сорбции и выпаривания. В различной стадии разработки находятся мембранные методы. Недостатком этих способов является высокая энергоемкость и необходимость проведения сложных подготовительных операций (реагентное умягчение, коагуляция). По сравнению с методами химической очистки, неводные способы переработки ОЯТ, позволяют увеличить коэффициент очистки и уменьшить размеры установки, используемой для его осуществления. Многие неводные способы переработки отработанного ядерного топлива проводятся при высоких температурах. При пирохимической переработке отработавшего ядерного топлива применяют его индукционный нагрев в тигле и охлаждение подводом хладагента к тиглю.

Кроме химических способов много разработок используют плавление радиоактивных материалов для их очистки. В связи с различной природой этих материалов и широкой номенклатурой составов для их плавления используют и различные методы. Широко применяется способ зонной плавки для очистки различных материалов [2]. Участки зонной плавки образуют нагревом материала загрузки выше температуры плавления вихревыми токами, индуктируемыми магнитным полем [1]. Степень очистки зависит от количества нагревателей и охладителей, что позволяет достигать высокой производительности процесса и высокой степени очистки. Так же при зонной плавке могут применяться кристаллизаторы. Способ позволяет получать кристаллический продукт высокой степени чистоты, осуществлять непрерывную работу аппарата, не требующую периодической остановки для удаления примеси, а также

возможность проведения непрерывного процесса разделения с получением двух выходных потоков: очищенного вещества и смеси, обогащенной примесными компонентами.

Поэтому наиболее актуальным методом очистки ОЯТ является метод зонной плавки. Преимущество зонной очистки состоит в значительном сокращении операций повторной кристаллизации.

## 1 Технологическая схема зонной плавки в индукционной печи с холодным тиглем

Основное назначение установки для зонной очистки — перемещение расплавленной зоны по слитку. Для этого характерно медленное перемещение узкой расплавленной зоны через сравнительно длинный образец, в процессе которого происходит перераспределение примесей в образце (рисунок 1). При перемещении расплавленной зоны по слитку образуются две поверхности раздела между жидкой и твердой фазами. Вторым важным назначением ее является обеспечение требуемого выхода материала определенной чистоты в минимальное время и с минимальными расходами.

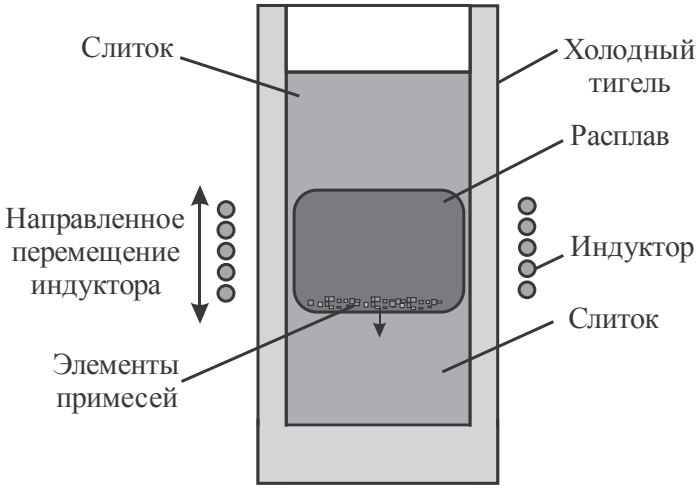



Рисунок 1 – Технологическая схема зонной плавки ОЯТ в индукционной печи с холодным тиглем

Основные процессы и физические явления, происходящие при зонной плавке и очистке вещества от примесей на основе использования индукционной плавки в холодном тигле, представлены на рисунке 2.

Помимо очистки ОЯТ, технология направленной кристаллизации используется для получения мультикристаллического кремния. Технология позволяет получать слитки кремния солнечного качества, используя незагрязняющий метод индукционной плавки поликристаллического кремния в гарнисаже с последующей направленной кристаллизацией расплава в слиток мультикристаллической структуры. Таким методом возможно получать слитки мультикристаллического кремния размером до 34 см в поперечном сечении и 7 метров в длину [3, 4].

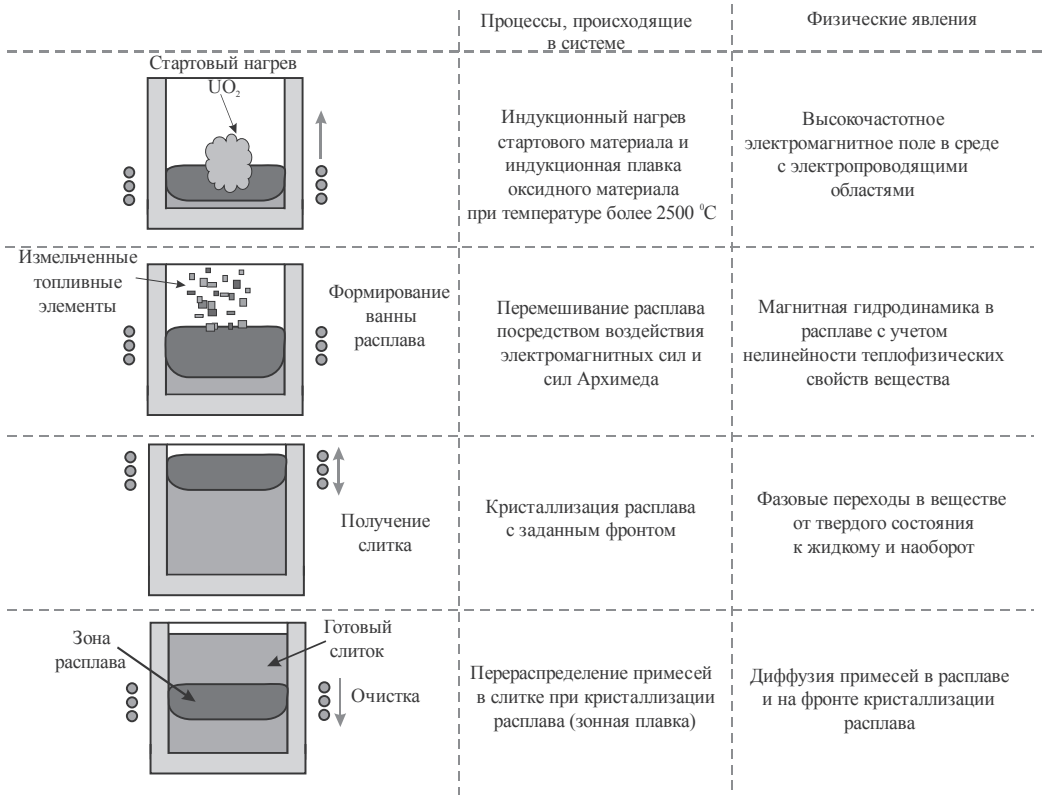



Рисунок 2 – Основные явления и процессы при зонной плавке в индукционной системе

## 2 Математическая модель кристаллизации при ИПХТ

Для исследования кристаллизации расплава необходимо решать следующие задачи – электромагнитного поля, кристаллизации и диффузии примесей.

В данной работе рассматриваются особенности построения задачи кристаллизации расплава, алгоритм работы которой представлен на рисунке.3. Решение этой задачи осуществляется в программной среде Ansys [5].

Распределение температуры в загрузке определяется за счёт конвекции и теплопроводности. Все эти компоненты учтены в уравнении теплового поля:

(1) $\gamma c_{\text{P}} \left(\vec{v}\text{grad}T\right) = \text{div}\left(\lambda\text{grad}T\right)$

где γ – плотность, г/см$^3$; $c_{\text{P}}$ – теплоёмкость, Дж/г·К; $T$ – температура, К; $\vec{v}$ – скорость тепломассопереноса, м/с; $\vec{q}$ – вектор теплового потока, Вт/м. Рассматривается стационарный процесс, поэтому $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$.

Из закона теплопроводности Фурье:

(2) $\vec{q} = -\lambda\text{grad}T$ ,

где λ – теплопроводность, Вт/м·К.

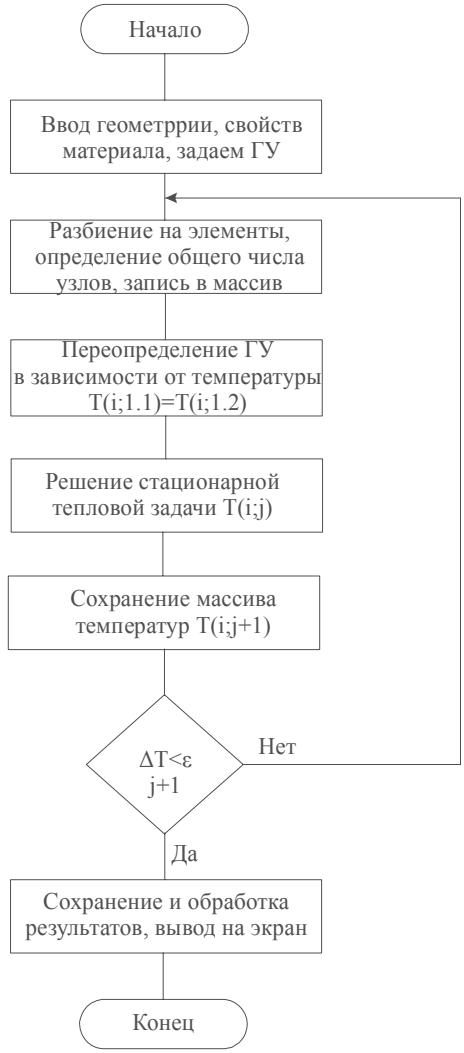



Рисунок 3 – Алгоритм решения тепловой задачи в программной среде ANSYS

Таким образом, запишем систему уравнений для нашей системы:

$$(3)\quad \begin{cases} \gamma c_P\left(\vec{v}\,\mathrm{grad}T\right) = \mathrm{div}\left(\lambda\,\mathrm{grad}T\right) \\ \lambda\dfrac{\partial T}{\partial y} = -q, \lambda\dfrac{\partial T}{\partial x} = q_2, \lambda\dfrac{\partial T}{\partial y} = q_3, \lambda\dfrac{\partial T}{\partial x} = -q_4\ , \\ q = \varepsilon\sigma\left(T^4 - T_c^4\right) + \alpha\left(T - T_c\right) + P(T) \end{cases}$$

где ε – коэффициент черноты, σ – постоянная Стефана-Больцмана, α – коэффициент теплообмена, $T_C$ – температура окружающей среды(здесь T и $T_C$ – в градусах Цельсия), P(T) – излучение от стенок нагревателя.

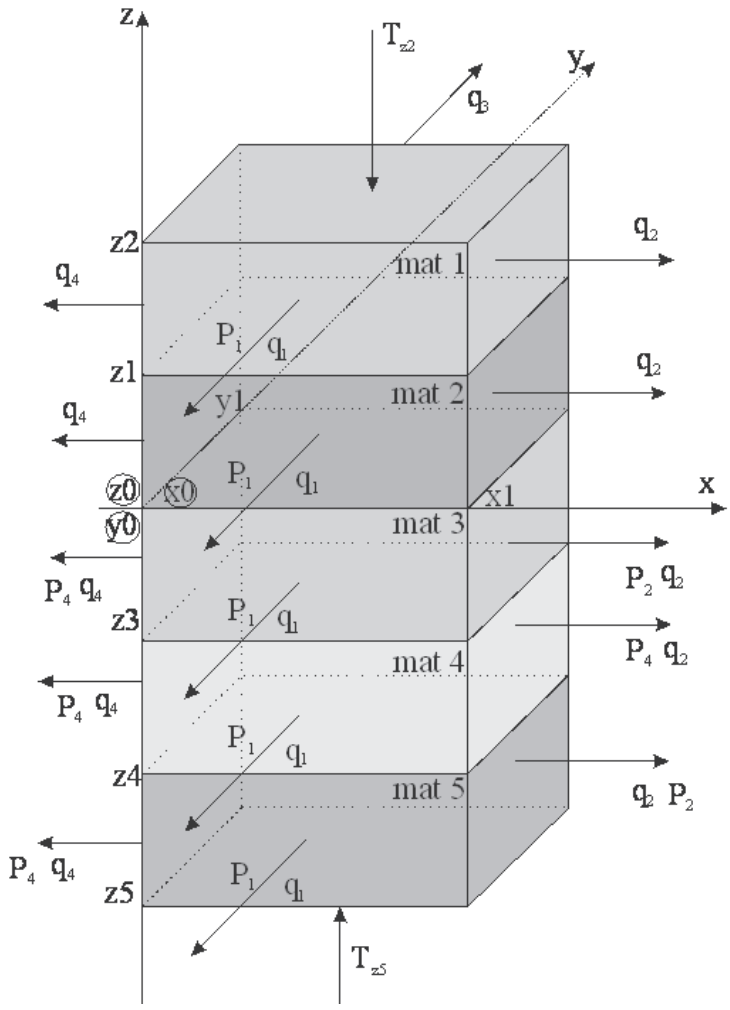



Рисунок 4 –Граничных условия

В плоскостях YZ и XZ соответственно:

$$(4)\quad \begin{cases} \dfrac{\partial T_X}{dx} = 0 \\ \dfrac{\partial T_Z}{dz} = 0 \end{cases} \text{ и } \begin{cases} \dfrac{\partial T_Y}{dy} = 0 \\ \dfrac{\partial T_Z}{dz} = 0 \end{cases}.$$

Таким образом, граничные условия задаются для каждой стенки загрузки (рисунок 4) и для каждого участка материала.

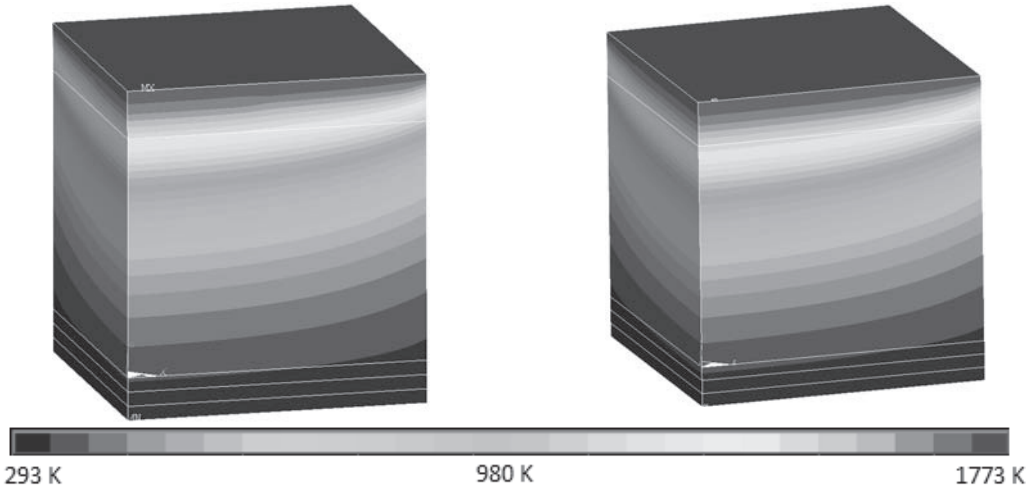
В общем случае определение температурного поля производится при задании теплофизических свойств загрузки как функции от температуры.

В задаче используются температурозависимые теплофизические свойства материалов, такие как – теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность, электропроводность, коэффициент теплового расширения, графики которых представлены выше [6-8].

## 3 Анализ результатов

На основе построенной математической модели была исследована форма фронта кристаллизации расплава при ИПХТ.

На рисунке 5. представлены распределение температуры в расплаве и слитке кремния при скоростях перемещения расплава относительно индуктора 1 мм/мин (а) и 5 мм/мин (б). Анализ полученных результатов показывает, что изменение скорости перемещения слитка с 1 до 5 мм/мин не оказывает большого влияния на изменение формы фронта кристаллизации расплава.




а б

Рисунок 5 – Температурное поле в расплаве и слитке

**Благодарности**

Работа выполнялась в рамках государственного контракта №16.740.11.0247 на выполнение НИР “Очистка отработанного ядерного топлива от продуктов деления зонной плавкой в холодном тигле”.

**Список литературы**

[1] Забаровский В.Х. Способ зонной плавки и устройство для его осуществления : пат. 2244048 Рос. Федерация : МПК C30B13/16; заявитель - № 2000116804/02; заявл. 23.06.2000; опубл. 10.01.2005.
[2] Пфанн, В. Зонная плавка – М., 1960.
[3] Шкульков, А.В., Черпак Ю.В. и др. Солнечная энергетика и возможности индукционной гарнисажной плавки в холодном тигля для получения солнечного кремния (обзор) // 2009. С.16-19.
[4] Sumco Co [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.sumcosi.com.
[5] Чигарёв, А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров – М.: Машиностроение-1, 2004.
[6] Кржижановский Р.Е., Штерн З.Ю. – Теплофизические свойства неметаллических материалов – Л., «Энергия», 1973.
[7] Самсонов Г.В. – Физико-химические свойства окислов – М.: «Металлургия», 1978.
[8] Мюллер Г. Выращивание кристаллов из расплава – М.: Мир, 1991.

# Situational Management and Systems for Communicative Actions Support

# Ситуационное управление и системы поддержки коммуникативных действий

# СЕМИОТИКА УПРАВЛЕНИЯ: ПРОБЛЕМЫ ПРАГМАТИКИ В ПРОЕКТИВНОМ СЕМИОЗИСЕ

**А.Ю. Нестеров**

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)
443086, Самара, Московское шоссе, 34, Россия
phil@ssau.ru
тел: +7 (846) 267-45-65

***Ключевые слова:*** *семиозис, управление, прагматика, проекция*

**Abstract**
The paper considers the notions of control and pragmatics in projective and receptive semiosis, the role of pragmatic rules.

## Введение

«Управление – процесс воздействия субъекта на объект, направленный на упорядочение, сохранение, разрушение или изменение системы объекта в соответствии с поставленной целью» [1]. Под системой понимается «единство многообразных знаний, объединённых одной идеей» [2], «комплекс взаимодействующих элементов, к которому применимы определённые «системные» законы» [Л.ф.Берталанфи, цит. по 3], или «система представляет собой определенное множество взаимосвязанных элементов, образующее устойчивое единство и целостность, обладающее интегральными свойствами и закономерностями» [4]. Более узким по отношению к понятию системы является понятие структуры, которое определяется как «результат обобщения отношения, описывающего систему»[5] или как «строение системы» [6].

Возможность воздействовать на систему в плане изменения или сохранения способа отношений элементов в системе, количества элементов системы, соотношения структуры и функции системы определяется типом системы. Тип системы как способ её организации или структуры может носить иерархический (вертикально упорядоченный) или холонический (термин В.А. Виттиха), сетевой (горизонтально упорядоченный) характер.

Если воздействие на систему определяется как постановка цели (где под целью понимается инобытие системы в целом или какого-то из её слоёв или уровней), то идея как способ упорядочивания многого к единому определяется как структурирование системы. Отношение цели воздействия на систему и идеи системы в идеальном случае стремится к тождеству цели и идеи, выраженному в структуре системы.

В рамках анализа философских проблем теории управления наряду с кибернетической теорией управления и индуктивными моделями практики управления практически не уделяется внимания семиотике управления. Семиотика – это общая теория знаковых процессов. Система в абстрактном виде, или абстрактная система – это «множество правильных высказываний (формул)», то есть таких, «что свободные переменные в них образуют формальные объекты» [5]. В общем виде, независимо от типа систем, управление представимо в терминах семиотики как воздействие на процессы, в которых нечто выступает в качестве знака, так что управление подразумевает какие-либо трансформации прагматического, синтаксического или семантического уровня.

Традиционно семиотика используется для представления рецептивных процессов, то есть процессов познания и понимания. Управление носит проективный характер, то есть использу-

ет прагматические и синтаксические правила не только для индексации имеющихся объектов и процессов, но и для создания новых (или для поддержания во времени имеющихся) объектов и процессов. Деятельность управления нуждается в единообразии способов осуществления рецепции как фиксации некоторого состояния системы и проекции как способе адекватного воздействия на зафиксированное состояние системы. С помощью семиотического моделирования такого единообразия можно добиться. Проективный семиозис, если рассматривать его на фоне традиционного представления о трансцендентальной модели познания, представляет собой обращение иерархического соотношения семиотических систем: прагматические предпосылки разума являются основанием для прагматических предпосылок рассудка и соответственно задают прагматику (границы содержательной стратегии интерпретации) реализации семантического правила.

Представление процедур познания в терминах семиотики (в виде семиотической интерпретации традиционной иерархии чувственного восприятия, рассудка и разума) является традиционным способом применения семиотики для фиксации рецептивных процессов [7]. Если понять отношение проекции как обратное отношению рецепции, то возникает возможность семиотического определения понятия техники (с учётом множественности различных техник): техника – в том числе и техника управления – оказывается проективной реализацией рассудка, так что составляющее рассудок множество синтаксических систем оказывается множеством синтаксических правил технической проективной деятельности. Возможное возражение, связанное с экзосоматическим характером техники, её объективностью, снимается указанием на экзосоматичность, объективность и независимость от эмпирического опыта синтаксиса любого из языков, используемых человечеством.

Подобное применение семиотики для фиксации проективных процессов открывает широкие перспективы. Например, в рамках поднятого В.А.Виттихом вопроса о конвергенции наук об искусственном и естественном [8] заслуживают обсуждения вопросы о соответствии рассудочных структур в рецептивных процессах и в проективных (какова мера редукции техники по отношению к языкам рассудка?), о роли рефлексии, о субъективности акторов – участников сложноорганизованных социальных систем.

В рамках представляемых тезисов нет возможности ни очертить границы семиотики управления, ни даже перечислить и выразить проблемы, с которыми сталкивается применение аппарата общей теории знаков для многообразных явлений управления. Подчеркнём лишь один момент, представляющийся наиболее общим и наиболее значимым, а именно проблему прагматики. В исследованиях искусственного интеллекта, основанных на гипотезе А.Тьюринга, согласно которой мышление есть вычисление, проделана колоссальная работа по машинному представлению синтаксиса естественных языков. Однако и по настоящий момент вопрос о том, каким образом одно слово обладает различными значениями в зависимости от контекста, не нашёл какого-либо удовлетворительного решения, кроме индексации всех представимых контекстов за счёт увеличения вычислительных мощностей. Аналогичный вопрос: почему человек не испытывает проблем с употреблением автореферентного отрицания, а для логики это является поводом для введения запрета на автореферентность? Осмысленная постановка этих проблем связана не только с областью синтаксиса и логической семантики, но и с областью прагматики, отношения между знаком и человеком, регулируемого набором интерпретант или презумпций.

Интерпретанта в рецептивном семиозисе впервые позволяет зафиксировать некоторый объект как значение, интерпретанта в проективном семиозисе – это навык, позволяющий создать некоторый объект. Чтобы понять, в каком направлении возможно исследование оппозиции интерпретанта/значение, необходимо ответить на вопрос, как функционирует «навык обозначения», каковы его предпосылки. В бихевиористской семиотике Ч.У.Морриса [9] интерпретанта – это навык, то есть условный или безусловный рефлекс; в аналитической модели О.Шольца – это презумция [10], в семиотике Ю.М.Лотмана условием возможности типологии

языка является диалектика знака и фона [11], В.Изер в сходном случае указывает на диалектику переднего и заднего плана [12], метафора растворения горизонтов Г.-Г.Гадамера [13] предполагает наличие как минимум двух растворяющихся горизонтов. Понятно, что в общем виде функция интерпретанты в самых разных традициях описания реализуется как процесс соотнесения некоторых систем. Для гносеологического знака это две системы: в чувственном восприятие интерпретанта осуществляет соотнесение реальности и нейродинамических кодов, в рассудке – явлений и синтаксических правил, в разуме – синтаксических правил и врождённых идей. Для коммуникативного знака это три и более системы: для определения смысла знака в минимальном случае необходимо соотнести синтаксические правила текста, языка и субъекта интерпретации.

Прагматика как измерение семиозиса отвечает на вопрос об условии возможности семиозиса, о том, что позволяет знаку быть знаком. Прагматика актуальна для понятия системы в той же мере, в какой и для отдельного знака, являющегося элементом системы. Успешность какого-либо воздействия на систему определяется прагматикой как минимум в двояком смысле, на стадии определения условий возможности системы (хотя бы в смысле нахождения пределов её структурной устойчивости) и на стадии перекодировки целей воздействия в структуру системы.

Представленные рассуждения носят постановочный характер, цель заключается в том, чтобы обратить внимание специалистов в области естественных и инженерных наук на наличие прагматического (и семантического) измерений сложности в управляемых системах, не переводимых без существенных потерь в синтаксические модели математики и кибернетики.

**Список литературы**


[1] Диев В.С. Управление риском: методологические и ценностные аспекты // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Философия. Том 5, выпуск 2. Новосибирск, 2007. С.92-97.

[2] Кант И. Критика чистого разума // Кант. И. Собрание сочинений в восьми томах. М.: Издательство «Чоро», 1994. Т.3. 741 с.

[3] Акоф Р. Общая теория систем и исследование систем как противоположные концепции науки о системах // Общая теория систем. М.: Издательство «Мир», 1966. С.66-80.

[4] Кузьмин В.П. Принцип системности в теории и методологии К.Маркса. М.: Политиздат, 1986. 399 с.

[5] Месарович М. Основания общей теории систем // Общая теория систем. М.: Издательство «Мир», 1966. С.15-48.

[6] Аверьянов А.Н. Системное познание мира. М.: Политиздат, 1985. 263 с.

[7] Нестеров А.Ю. Семиотическая схема познания и коммуникации. Самара: Самар. гуманит. акад., 2008, 193 с.

[8] Виттих В.А. Конвергенция наук об искусственном и гуманитарных наук: препринт. Самара: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук, 2012. 13 с.

[9] Моррис Ч.У. Основания теории знаков // Степанов Ю.С. (Сост.) Семиотика: Антология. М.: Академический проект, Екатеринбург: Деловая книга, 2001. С.45-97.

[10] Scholz O.R. Verstehen und Rationalität. Untersuchungen zu den Grundlagen von Hermeneutik und Sprachphilosophie. F.a.M., 2001.

[11] Лотман Ю.М. Анализ поэтического текста. Л.: Издательство «Просвещение», 1972. 271 с.

[12] Iser W. Der Akt des Lesens: Theorie ästhetischer Wirkung. München, 1994.

[13] Gadamer H.-G. Wahrheit und Methode. Tübingen, 1990.

# К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОНЯТИЯ «СИТУАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ»

**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**: ситуационное управление, проблемная ситуация, актор, коммуникация, герменевтическая логика, интерсубъективная система, интерсубъективная теория*

**Abstract**
Problem situation requires to be considered not as “objective” world phenomenon that doesn’t depend on human knowledge, but as a value-oriented subjective perception and recognition of the situation by each actor being inside it, and as a formation of its “intersubjective vision” by attaining a mutual understanding between the actors during communication activities. An answer to the question how to create a constructive theory of situational management, which can be based on the concepts of intersubjective system and intersubjective theory, is necessary to be sought for in the convergence of artificial sciences (economics, technics, etc.) and humanities.

## Введение

Управление ситуацией в [1] предполагает её *осознание неоднородными акторами и разработку интерсубъективной теории* – своеобразной «интеграционной платформы», на основе которой акторы вырабатывают и реализуют решения, направленные на урегулирование ситуации. В отличие от классической научной теории, имеющей дело с универсальным идеализированным объектом, интерсубъективная теория является *ad hoc-теорией, относящейся к уникальному идеализированному объекту – ситуации, сложившейся и развивающейся в сложной системе*, субъективные образы которой формируются в сознаниях людей-акторов. А интерсубъективная структура индивидуального сознания, отвечающая факту существования других индивидов, побуждает акторов *коммуницировать* между собой для того, чтобы *совместно, согласованно осмыслить и понять ситуацию*. Иными словами, интерсубъективная теория должна разрабатываться самими акторами в реальном масштабе времени, т.е. в темпе, соответствующем скорости развития ситуации, а научные работники должны заниматься созданием необходимых для достижения этой цели методов и программных средств. Поэтому разговор о том, что такое «ситуационное управление», необходимо начинать с акторов, осознающих ситуацию и выполняющих познавательно-деятельностные функции по её урегулированию.

## 1 Акторы

Как уже отмечалось в [1], человеческое бытие есть всегда бытие в некоторых ситуациях. И если в классических теоретических построениях человек, рассматриваемый как «вырванный из ситуации, унифицированный» субъект, выносится «за скобки» теории, то в постнеклассической науке он предстаёт как личность, включённая в теорию и имеющая свои собственные жизненные ценности, приоритеты и мотивацию поведения, а также обладающая персональными знаниями, к которым относятся, в том числе, и объективные (в пределах допустимых идеализаций) научные знания [2]. Актор, в этом случае, выступает как живой человек, исследователь, который, коммуницируя с другими акторами, вырабатывает

интерсубъективные ad hoc-знания о ситуации для её последующего урегулирования. Акторы, таким образом, должны придерживаться коммуникативной рациональности, в основе которой лежит понятие коммуникативного действия - такого взаимодействия индивидов, которое упорядочивается согласно обязательным нормам и ориентировано на достижение взаимопонимания действующих индивидов, их консенсус [3].

## 2 Проблемные (нештатные) и штатные ситуации

Ситуационное управление предусматривает регулирование проблемных (нештатных) и «непроблемных» (штатных) ситуаций, возникающих в сложной системе. *Проблемная ситуация должна осознаваться* людьми, оказавшимися в ней, именно как проблемная, когда *имеющихся знаний и средств недостаточно* для нахождения выхода из сложившейся ситуации, и требуется найти и использовать новые для себя средства и способы деятельности [4]. Осознание проблемности ситуации является важным по той причине, что зачастую человек, «погружённый» в ситуацию, относится к ней индифферентно, исходя из убеждения в возможности «самопроизвольного» (без его участия) урегулирования ситуации. Тем самым он самоустраняется из процессов принятия решений, а это означает, что его нельзя относить к акторам, выполняющим познавательно-деятельностные функции [1].

В отличие от проблемных ситуаций *штатные ситуации характеризуются тем, что механизмы их урегулирования априори известны*, например, на основе прецедентов, имевших место ранее, которые можно использовать для оправдания принимаемых решений в настоящем. Однако такие ситуации подчас неоправданно причисляют к проблемным, поскольку в процессах реализации известной системы правил, стандартов и нормативов происходят сбои, временные задержки, отклонения от установленных норм, несогласованные действия исполнителей отдельных заданий и т.п. И вместо того, чтобы просто устранить эти мешающие факторы, переводят штатные ситуации в разряд проблемных (а иногда и чрезвычайных), тем самым расширяя круг вопросов, требующих коллегиального рассмотрения и проведения множества дополнительных согласительных совещаний.

## 3 Ситуация и коммуникация

Ситуация, согласно К Ясперсу, - характеризует способ бытия человека в мире [3], и трактуется им как уникальная и невоспроизводимая совокупность событий в каждый отдельно взятый момент реального исторического времени [5]. При этом ключевая роль отводится коммуникации, рассматриваемой К. Яспером как процесс, в котором *«Я» действительно становится самим собой благодаря тому, что он обнаруживает себя в «Другом»* [6]. «Я» помогает «Другому» в актах коммуникации достичь в его понимании соответствующее внутреннее отношение к положению дел. *Именно наталкивание «Другого» словом на мысль, а не угадывание некоего «объективного содержания» является пониманием*. Только в обсуждении, когда один «настраивается» на другого, может выясниться общезначимость какого-либо воззрения. Человек запрашивает при этом собеседника в ответ на высказанную им мысль, т.е. встречает «Другого» в его ситуации [7]. Таким образом, «ситуация» и «коммуникация» становятся неразделимыми понятиями.

Причём понимание ситуации прошлого, по М. Хайдеггеру, возможно вполне только тогда, когда мы понимаем себя и свою ситуацию в настоящем, т.е. усвоение прошлого, истории всегда определяется тем, в какой мере «понимающим образом» освоено «живое настоящее», которое только и может «раскрыть» прошлое [3].

Иными словами, в ситуационном управлении, т.е. при регулировании проблемных ситуаций, мы должны рассматривать ситуацию не как явление «объективного» мира, не зависящее от человеческого сознания (например, обильный снегопад), а как *ценностно-ориентированное субъективное восприятие, осознание ситуации каждым актором и*

*формирование её «интерсубъективного видения» путём достижения взаимопонимания* между ними в коммуникативных действиях [1, 2] (например, осознание транспортных проблем, связанных со снегопадом, и необходимости поиска способов их решения).

Важную роль в ситуационном управлении играет разработка и применение *систем поддержки коммуникативных действий*, повышающих эффективность процессов достижения взаимопонимания неоднородных акторов [8].

## 4 Ситуация и выражение

С ситуацией всегда связано *выражение*, представляющее собой внешнее проявление или обнаружение чего-нибудь. Каждое (не только языковое) выражение имеет, по Г. Мишу, субъективную сторону (некто выражает себя), так и объективную (всегда выражается нечто). Выражение не ограничено языком, ему могут быть присущи также жесты, мимика, которые мы понимаем или интерпретируем.

По мнению Г. Липпса *слово* перестаёт быть нейтральным выражением внутреннего движения мысли или положения вещей, оно *активно взаимодействует с ситуацией* [3]. Понимать что-либо буквально ( или «дословно») чаще всего означает цепляться за слова, тем самым перевирая сказанное. В результате при попытке найти «значение» слова, вырывание его *из контекста ситуации, может придавать слову совершенно чуждые ему значения* [9]. Созвучным является высказывание Г. Шпета о том, что «оторванное понятие – мертво; живое понятие есть понимание» [9, 10].

*Стереотип восприятия слова как отражения определённого «объективного» содержания связан с формальной логикой*. Именно этот шаблон накрепко связывает слово с вещью, состоянием, но не с ситуацией, жизнью. Для «развязывания этого узла» Г. Липпс на основе анализа форм речевого и мыслящего поведения человека в повседневной жизни, в непосредственном обращении с вещами, создаёт так называемую *«герменевтическую логику», рассматривающую связь логических форм с жизнью и выполняющую по отношению к ним функцию истолкования* [3, 7].

## 5 Герменевтическая логика Г. Липпса

В противоположность последовательности «понятие-суждение-умозаключение», выстраиваемой традиционной логикой, Г. Липпс предлагает другой порядок. *Основным становится умозаключение: оно, так же, как и слово, изменяет и проясняет ситуацию. Но не только. Умозаключение – это попытка разобраться с ситуацией. Умозаключение возникает* не в пустом пространстве абстрактного познания, а *в реальной жизни, когда неопределённость ситуации, в которой обнаруживает себя человек, требует незамедлительного решения.* Устранение (или уменьшение) неопределённости становится главной задачей, а умозаключение, соответственно, играет основную роль [9].

Г. Липпс пишет: «Человек заключает о чём-то, когда вещи недостаточно ясно говорят сами за себя, когда не хватает обычной констатации того, что имеешь перед глазами… Умозаключение необходимо и тогда, когда требуется найти новые резервы понимания, выяснить, что было пропущено в старых расчётах. Не обойтись без него и при изменении ситуации по сравнению со временем первого соприкосновения с ней [11].

Называя умозаключение «принципом познания» [11], Г. Липпс уточняет, что не предполагает, тем самым, будто оно есть нечто элементарное и не желает вступать в противоречие с классической логикой. Подразумевается следующее: *заключают на основании обстоятельств, фактов, а не на основании* посылок [9]. Посылки в логическом смысле следует отличать от предположений, «предпосылок», на основании которых человек верит, что имеет основание делать заключение [11].

В герменевтической логике *вместо «истинности» анализируется «правильность» и «соответствие»,* а также происходит обращение к таким формам речи, которым традиционная логика, по мнению Г. Липпса, уделяла недостаточное внимание: *просьба, вопрос, ответ, обещание.*

**Заключение**

После опубликования работы Р. Моклера [12] – первой статьи, посвящённой проблематике ситуационного управления, прошло более сорока лет. Однако необходимо признать, что за это время методы ситуационного управления так и не нашли должного применения на практике, поскольку, с одной стороны, они разрабатывались и развивались на принципах классической научной рациональности (так, например, в монографии [13] ситуационное управление рассматривается как метод управления сложными техническими и организационными системами, основанный на идеях и формальных процедурах теории искусственного интеллекта), а с другой стороны, существует точка зрения, что управление ситуациями является скорее искусством, чем наукой [14]. Ответ на вопрос о том, каким же образом необходимо создавать конструктивную теорию ситуационного управления, использующую интеллектуальные и волевые ресурсы людей, следует искать в *конвергенции наук об искусственном* (экономики, техники, социологии и т.п.) *и гуманитарных наук* [15].

**Список литературы**


[1] Виттих В.А. Управление ситуациями в сложных развивающихся системах с применением интерсубъективных теорий// Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. №12. С. 2-6

[2] Виттих В.А. Интерсубъективные системы как объекты постнеклассической науки // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. №1, С. 53-55.

[3] Новая философская энциклопедия (в четырех томах). – М.: Мысль, 2010.

[4] Краткий психологический словарь. – М.: Политиздат, 1985.

[5] Всемирная энциклопедия. Философия. – М.: АСТ; Мн.: Харвест, Современный литератор, 2001.

[6] Философский энциклопедический словарь. – М.: ИНФРА-М, 1997.

[7] Михайлов И.А. «Герменевтическая логика» Ганса Липпса // Точки. 2002. № 3-4. С. 125-145.

[8] Виттих В.А., Игнатьев М.В., Смирнов С.В. Системы поддержки коммуникативных действий // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIII международной конференции. – Самара, Самарский научный центр РАН, 2011. С. 369-371.

[9] Михайлов И.А. Герменевтическая логика Г. Шпета и Г. Липпса. – В сб. «Творческое наследие Густава Густавовича Шпета в контексте философской проблемы формирования историко-культурного сознания (междисциплинарный аспект)». – Томск: Издательство Томского университета, 2003. С. 114-123.

[10] Шпет Г.Г. Язык и смысл. III часть. Архивная публикация И.М. Чубарова // Логос, №1, 1998.

[11] Lipps H. Untersuchugen zu einer hermeneutischen Logik, 1938.

[12] Mockler R.I. Situational Theory of Management // Harvard Business Review. 1971. V. 49. №3.

[13] Поспелов Д.А. Ситуационное управление. Теория и практика. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1986.

[14] Савченко А.Б. Искусство управления ситуацией: опыт Востока и Запада. – М.: Маркет ДС, 2006.

[15] Виттих В.А. Конвергенция наук об искусственном и гуманитарных наук. – См. настоящий сборник трудов.

# ТРЕБОВАНИЯ К КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СОСТОЯНИЯМИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Н.П. Кириллов**

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39, Россия
knp@mail.ru
тел: +7 (812) 328-03-01

***Ключевые слова:*** *технические системы, ситуационное управление, ситуационные модели*

**Abstract**
In article are considered of problems of engineering of knowledge which arise at modelling of processes of situational control by states of technical systems. is offered for decision these problems to use conceptual model of these processes. Requirements to properties of such model are proved.

## Введение

Решение задач ситуационного управления основано на предварительном моделировании возможных ситуаций, в которых необходимо принимать соответствующие им решения, с последующим сопоставлении этим ситуациям заранее подготовленных решений. Совокупность таких ситуаций и решений представляет собой ситуационную модель (СМ) предметной области. В процессе ситуационного управления состояниями ТС определяется текущая ситуация процессов управления и функционирования системы, которая потом сопоставляется с имеющимися в модели ситуациями. Если эта ситуация интерпретируется в модели и для нее предусмотрено решение, то оно выбирается для реализации. В противном случае ситуационное управление становиться невозможным. То есть возможности ситуационного управления напрямую зависят от количества ситуаций и решений, учитываемых в СМ (степени полноты содержания модели).

Основное достоинство метода ситуационного управления состоит в возможности принятия решений в реальном масштабе времени. Сдерживающим фактором для применения этого метода является сложность решения проблем формирования ситуационных моделей с заданной степенью полноты их содержания.

Проблемы решения задач ситуационного управления состояниями ТС в первую очередь, обусловлены наличием противоречия между потребностями в необходимых для этого ситуационных моделях предметной области, с одной стороны, а с другой — сложностью, трудоемкостью и высокой стоимостью их создания при отсутствии уверенности в гарантированном получении требуемого результата в заданные сроки. Она имеет фундаментальный характер, который обусловлен сложностью задач структуризации и формализации предметной области, отсутствием слабо зависящих от субъективных факторов методов их решения и объективными трудностями в поиске компромиссов между универсальностью разрабатываемых методов моделирования и их результативностью. Для ее решения необходима разработка специальных методов и инженерных методик формирования, систематизации, структуризации и оценки знаний о правилах управления состояниями и процессах функционирования ТС, применение которых позволит перевести процедуры построения моделей принятия ситуационных решений из категории «искусство» в категорию «технология».

Основная сложность в практике построении СМ для решения задач управления функциональными состояниями технических систем (ТС) заключается в отсутствии методологии, инженерных методик и информационных технологий решения этих задач, составляющих предмет исследований в области инженерии знаний. Вследствие этого указанные задачи решаются эмпирическими и эвристическими методами, а функциональные возможности систем, основанных на использовании полученных при этом моделей, оказываются в негативной зависимости от множества субъективных факторов.

В когнитивной психологии наиболее результативным методом снижения трудоемкости решения творческих задач считается метод использования аналогий и прототипов [1, 2]. Он положен в основу интенсивно разрабатываемой методологии моделе-ориентированной системной инженерии (MBSE - Model Based Systems Engineering) [3]. В MBSE для решения указанных проблем моделирования сначала предусматривается разработка метамоделей (модели моделей) предметной области, свойства которой затем интерпретируются в свойствах создаваемых моделей конкретных объектов.

Эти положения предлагается использовать для разработки методологии решения проблем инженерии знаний в области ситуационного управления состояниями ТС. В качестве метамодели здесь можно рассматривать концептуальную модель процессов ситуационного управления состояниями ТС (КМ ТС), которую необходимо сначала для этого построить, что представляет собой самостоятельную проблему. Она обусловлена отсутствием инженерных методик и сложностью выявления общесистемных закономерностей в рассматриваемой предметной области, которая характеризуется большим разнообразием ТС, методов и систем управления их состояниями, а также отсутствием общепринятых дефиниций семантических понятий, используемых в их исходных описаниях.

В соответствии с базовым стандартом в области проектирования систем [4] построение систем и моделей, должно начинаться с разработки требований. Формирование требований к КМ ТС должно выполняться в рамках специально предложенной для этого концепции, отвечающей на вопрос: каким свойствам должна удовлетворять модель, чтобы представленная в ней информация позволила повысить результативность решении проблем инженерии знаний в ходе построения моделей для ситуационного управления состояниями конкретных систем..

## 1 Понятие «техническая система»

Требования могут выражаться в форме потребностей, пожеланий, ожиданий и ограничений. В результате формирования требований к КМ ТС должны быть определены ограничения, которые будут или могут быть использованы в модели, ожидаемые свойства и концепция ее построения.

Для разработки и описания требований необходимо иметь первоначальные знания о предметной области моделирования и некоторый набор характеризующих ее общепринятых понятий. Однако оказывается, что уже на этом, начальном этапе разработки требований существуют методологические трудности. В частности, нет общепринятых дефиниций понятия «техническая система» и составляющих его свойств. При этом имеется достаточно много вариантов определений этого понятия [5, 6], но их содержание не полностью раскрывает свойства ТС, существенные для решения рассматриваемой проблемы.

Применительно к рассматриваемым здесь целям, оно должно быть основано на перечислении только тех общих свойств ТС, знание которых необходимо для понимания и концептуального описания процессов ситуационного управления функциональными состояниями таких систем.

С этой точки зрения предлагается рассматривать понятие «ТС», как совокупность следующих свойств соответствующих ему объектов.

1) ТС — это конечное множество предопределенным образом взаимосвязанных и взаимодействующих между собой вещественных объектов (элементов или частей системы), объединенных в одной конструкции (локальном пространстве, корпусе), разработанной для удовлетворения заданных потребностей пользователей. Применительно к ТС всегда существуют возможности:
   - выделения границ — входов и выходов системы в окружающей среде;
   - определения и параметрического описания целей функционирования, объектов входов (управляющих и перерабатываемых) и выходов системы.
2) ТС имеет штатные условия эксплуатации (целевого использования), которые могут быть выражены в виде параметрических описаний оказываемых на систему внешних воздействий, энергетического (ресурсного) обеспечения и границ интервала времени жизненного цикла системы. Продолжительность срока эксплуатации ТС по целевому назначению конечна.
3) ТС в штатных условиях эксплуатации может находиться хотя бы в одной устойчивой и равновесной фазе функционирования (функциональном состоянии), в которой она выполняет определенную ее конструкцией полезную работу для пользователей в течение заданного времени. В процессе выполнения такой работы, ТС потребляет необходимые для этого энергетические ресурсы.
4) ТС имеет начальную фазу существования (начальное состояние), в которой она находится в состоянии готовности для использования по целевому назначению (работоспособна), но не выполняет никакой работы и не потребляет ресурсов.
5) Изменение функциональных состояний ТС осуществляется путем целенаправленных управляющих воздействий (УВ) материальной природы на функциональные элементы (части) ее конструкции, специально предназначенные для их восприятия и отработки. УВ могут формироваться вовне и/или внутри системы. Конструктором технических систем всегда предусматриваются возможности семантического и/или параметрического описания реакций ее функциональных элементов (частей) на УВ в штатных условиях эксплуатации в виде детерминированных последовательностей причинно-следственных изменений состояний элементов со степенью детализации, достаточной для принятия однозначных решений по управлению функциональными состояниями ТС.

В качестве элементов ТС могут рассматриваться подсистемы, устройства и/или детали.

Техническая подсистема (ТПС) — это часть системы, имеющая все перечисленные выше свойства ТС. ТПС может быть частью системы, не относящейся к категории «ТС».

Техническое устройство — это совокупность предопределенным образом взаимосвязанных и взаимодействующих между собой вещественных объектов, которая имеет не менее двух функциональных состояний, изменяемых путем внешних материальных воздействий, и является функциональным элементом ТС.

Деталь — это специально созданный, неразделимый на части вещественный объект, имеющий одно функциональное состояние — «исправен», которое характеризует возможность его использования в качестве элемента конструкции технических устройств и систем.

ТС можно рассматривать так же, как взаимосвязанную совокупность ее функциональных частей — подсистем, устройств, деталей или их различных сочетаний друг с другом, если ей можно взаимно однозначно сопоставить какую-то задачу (функцию), выполняемую в системе.

Функциональные части (ФЧ) в ТС определяют двумя способами:

- выделением в составе ТС совокупности элементов, выполняющих функцию, предусмотренную конструкцией этой части системы;
- путем выделения задачи (функции), выполняемой в системе, с последующим сопоставлением ей совокупности элементов ТС, участвующих в ее решении (реализации).

Типичным примером использования понятия «функциональная часть» является функциональные блоки, отображаемые в блок-схемах конструкторской документации ТС. В таких

схемах рассматриваются функции блоков в преобразовании объектов их входов в объекты выходов, а сами блоки представляются в виде черных ящиков, то есть их конструкция не раскрывается. При необходимости, состав каждого блока может быть детализирован на уровне описания входящих в него субблоков и связей между ними, или на уровне описания элементов его конструкции.

Для последующих рассуждений важно отметить, что в общем случае технические системы можно представлять в различных базисах их функциональных частей — уровнях детализации описания конструкции: на уровне ее элементов, на различных, в том числе вложенных, уровнях представления функциональных блоков, на уровне системы в целом.

## 2 Анализ проблем моделирования процессов управления состояниями ТС

Исходная информация о конструкции, процессах функционирования и правилах управления состояниями ТС содержится в конструкторской документации и в знаниях экспертов.

Проблема инженерии знаний при описании причинно-следственных процессов управляемого функционирования ТС проявляется в тех случаях, когда количество возможных состояний – сочетаний значений параметров, характеризующих фазы происходящих в системе процессов, превышает пороговый уровень возможностей людей в их восприятии и описании причинно-следственных изменений. Экспериментально установлено, что этот порог ограничен интервалом 7±2 (число Миллера) [7].

В моделировании многопараметрических предметных областей используют два метода решения этой проблемы. Первый метод заключается в разделении предметной области на части, описание которых не вызывает указанных затруднений. Второй – состоит в осуществлении перехода от параметрического представления моделируемых процессов, которые применяются, например, в математических моделях систем автоматического управления и регулирования, используемых в технической кибернетике, к структурированным семантическим (смысловым) описаниям, формируемых путем смысловой агрегации параметрических описаний предметной области.

При описании многопараметрических ТС возникает необходимость в решении задач:

- определения границ (входов и выходов) объекта моделирования в ТС. Эта задача становится нетривиальной при описании управляющих входов для ТС, в составе которых имеются автоматические (автоматизированные) системы (устройства) управления и/или регулирования процессами функционирования ТС;
- выбора уровня детализации (базиса) представления ТС в виде взаимодействующих между собой функциональных частей (блоков), при котором для каждого блока существуют возможности установления детерминированных причинно-следственных отношений между объектами его входов и выходов;
- смысловой агрегации (обобщения) параметрических описаний рассматриваемых процессов и представления их в виде формализованных семантических понятий и отношений между ними – задачи разработки предметно-ориентированной онтологии;
- выбора степени смысловой агрегации (детализации) параметрических описаний процессов функционирования каждого блока, при которой в них будет содержаться необходимая и достаточная информация для детерминированного представления существующих возможностей управления состояниями ТС в целом в выбранном базисе ее функциональных частей;
- установления формальных отношений между атрибутами описаний функциональных частей ТС, которые будут использоваться для представления процессов их совместного функционирования;
- выбора степени детализации описаний последовательностей причинно-следственных событий, характеризующих процессы управления и функционирования ТС в используемом

базисе ее функциональных частей. Для этого требуется определить, какие события необходимо учитывать в описаниях этих процессов, а какие являются избыточными для решения задач управления состояниями ТС;

- формализации и структуризации описаний причинно-следственных процессов управления и совместного функционирования функциональных частей в ТС.

Принципиальным фактором, обусловливающим сложность проблемы разработки методического обеспечения для решения этих задач и, является то обстоятельство, что процессы и результаты решения каждой из них существенно зависят и одновременно влияют на возможности и результаты решения других задач из приведенного перечня. То есть все эти задачи логически и семантически взаимосвязаны друг с другом. Кроме того, существует большое разнообразие вариантов смысловой агрегации параметрических описаний, семантического представления и детализации причинно-следственных процессов функционирования ТС на разных слоях, стратах и эшелонах, что существенно усложняет решение перечисленных задач и разработку их методического обеспечения. Эти обстоятельства проявляется, в частности, в необходимости выполнения многочисленных итераций в практике построения моделей процессов управления состояниями и функционирования ТС.

Разработка методического обеспечения дополнительно усложняется в случаях, когда:

- одни и те же элементы или части конструкции ТС выполняют разные функции в зависимости от изменения целей управления и управляющих воздействий;
- целям управления состояниями ТС требуется сопоставлять индивидуальные последовательности причинно-следственных событий, происходящих в системе процессе управления;
- по мере старения ТС изменяются параметрические характеристики и/или структуры причинно-следственных последовательностей управления ее состояниями;
- между причинно-следственными процессами управляемого функционирования частей системы в выбранном для ее описания базисе проявляются различного рода взаимозависимости;
- в составе ТС имеются функциональные части, выполняющие задачи принятия решений по управлению состояниями частей системы;
- требуется учитывать нештатные ситуации, потенциально возможные в процессе функционировании системы, и формировать правила принятия решений по управлению ТС в таких ситуациях.

В настоящее время, из-за отсутствия методического обеспечения обсуждаемых задач, возникают естественные проблемы с их решением, в том числе, при составлении конструкторской документации ТС – основного источника исходной информации для построения СМ. В результате, исходная информация предоставляется пользователям в виде не структурированного множества вербальных описаний отдельных фрагментов последовательностей причинно-следственных процессов управляемого функционирования частей ТС, выбранных из разных базисов представления системы ее функциональными частями. При создании и восприятии таких описаний достаточно легко допустить различного рода ошибки и неточности, но весьма затруднительно их выявлять. В результате, в подавляющем большинстве случаев, без предварительного решения перечисленных выше задач инженерии знаний, по таким описаниям невозможно построить формализованные структурированные ситуационные модели для управления состояниями ТС, оценить степень полноты содержащейся в них информации, ее достаточность для решения задач ситуационного управления, и проверить ее на отсутствие ошибок.

## 3 Выбор объекта моделирования

В соответствии с поставленными целями, КМ ТС должна рассматриваться в качестве метамодели процессов ситуационного управления состояниями реальных ТС. Для ее построения необходимо определить свойства гипотетической ТС (ГТС), применительно к которой будут рассматриваться указанные процессы. Для этого требуется решить две задачи: во-первых, установить функциональные границы ГТС, во-вторых, определить состав функциональных частей ГТС и структуру их взаимосвязей.

Задача выбора функциональных границ заключается в определении состава, смыслового и параметрического содержания объектов входов и выходов ГТС. Свойства этих объектов должны отражать общие закономерности, характеризующие функциональные границы реальных ТС для всех вариантов возможного их разнообразия.

Вторая задача состоит в определении состава и структуры связей функциональных частей ГТС, свойства которых можно будет рассматривать в качестве классификационных признаков всего разнообразия технических систем.

Для решения задачи формирования требований, предъявляемых к КМ ТС, предлагается использовать методологический подход, основанный на следующих положениях.

1) В качестве ГТС выбирается мыслимая автономная техническая система, которая самостоятельно решает все задачи управления своим функционированием и располагает необходимыми для этого ресурсами: формирует и реализует цели управления, выполняет заданную работу, оценивает ее результаты и результаты управления. В соответствии с существующей терминологией [8] ГТС – это автономная автоматическая система с интеллектуальным управлением, которая имеет внешние связи только со средой своего существования. Предложенный выбор свойств ГТС позволяет локализовать причины инициации процессов управления ее состояниями в границах самой системы, то есть уйти от необходимости решать эту задачу с учетом большого разнообразия возможных причин их инициации применительно к реальным ТС.
2) Для реализации перечисленных свойств автономности, в состав ГТС должны входить следующие функциональные части: обеспечивающая часть (ОЧ), преобразуемая часть (ПЧ), исполнительная часть (ИЧ), сенсорная часть (СЧ), управляющая часть (УЧ) и коммуникационная часть (КЧ).

   Состав частей ГТС и структура их взаимодействия показана на рис. 1.

   Назначение функциональных частей ГТС.

ОЧ – это совокупность энергетических и других видов ресурсов, которые требуется учитывать в качестве необходимого условия для обеспечения возможности функционирования ИЧ, СЧ и УЧ, как ресурсозависимых вещественных объектов.

ПЧ – это совокупность объектов, которые рассматриваются в качестве предмета последующих преобразований, осуществляемых системой в соответствии с формируемыми в ней целями.

ИЧ – осуществляет преобразования этих объектов в соответствии с состояниями объектов выхода СЧ, которые рассматриваются в качестве условий, задающих характеристики функции преобразования;

УЧ – выполняет функции анализа состояний воздействий среды и состояний других частей системы, формирует цели управления, анализирует ситуации процесса управления состояниями СЧ и ИЧ, принимает ситуационные решения и преобразует их в управляющие воздействия, оказываемые на СЧ.

СЧ – воспринимает УВ и преобразует их в состояния объектов своего выхода, которые рассматриваются в ГТС как условия, задающие характеристики функции, выполняемой ИЧ.

КЧ – это совокупность связей между функциональными частями ГТС. В модели использованы шесть видов таких связей, различимых по их целевому назначению.

УЧ в предложенной модели ГТС выполняет функции субъекта управления (СУ). В качестве объекта управления (ОУ) в ГТС рассматриваются СЧ и ИЧ. СЧ – это совокупность объектов, которые непосредственно воспринимают УВ, формируемые УЧ, а ИЧ – это объекты апосредственного управления – процессы их функционирования зависят от состояний объектов СЧ и их изменений, следовательно, и от управляющих воздействий, то есть от результатов функционирования УЧ. Наличие в составе ТС последовательно взаимодействующих сенсорной и исполнительной функциональных частей (объекта управления) рассматривается как системообразующее свойство объектов таксона «технические системы» [5].

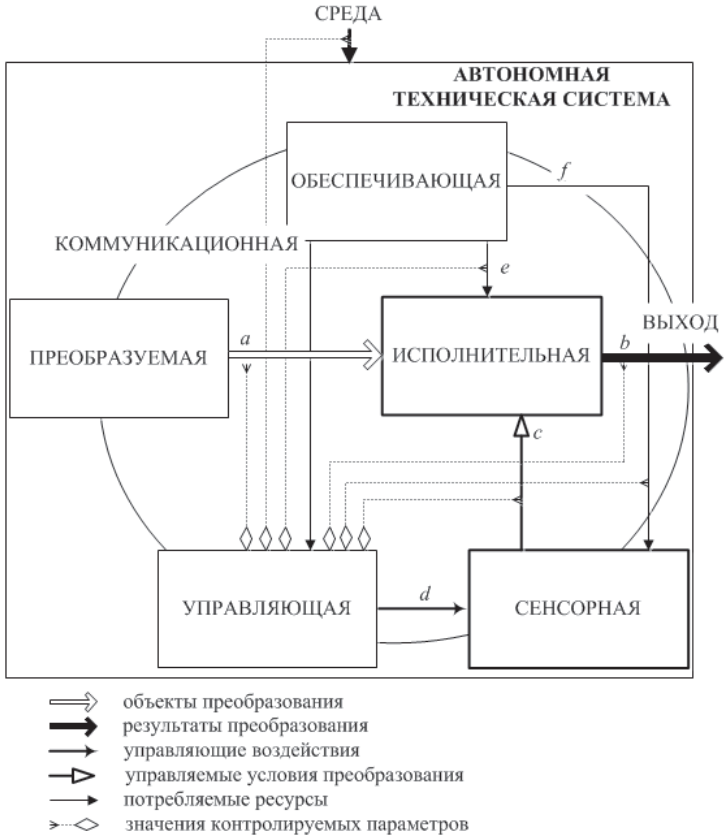



Рисунок 1 – Состав и структура взаимодействия функциональных частей автономной технической системы

С помощью этой модели стало возможным:

- конкретизировать функциональный состав и входно-выходные связи субъекта и объекта ситуационного управления состояниями ГТС;
- выявлять в реальных ТС функциональные части и виды связей между ними путем сопоставления функциональной роли элементов в конструкции этих систем со свойствами частей и связей, представленных в модели ГТС;
- анализировать и сравнивать свойства разных ТС безотносительно к специфическим особенностям их конструкции и целевого назначения в понятийном базисе описания свойств функциональных частей и связей модели ГТС;

- осуществлять предварительную классификацию ТС путем выявления присущих им совокупностей классификационных признаков – образов функциональных частей ГТС и связей между ними.

Часть модели ГТС, которая образована субъектом и объектом управления (УЧ, СЧ, ИЧ и связями между ними), предлагается рассматривать в качестве упрощенного образа метамодели процессов ситуационного управления состояниями и функционирования ОУ в ТС. Это позволяет конкретизировать общее представление о свойствах КМ ТС, предназначенной для решения проблем инженерии знаний.

## 4 Требования к концептуальной модели ТС

Назначение КМ ТС состоит в том, чтобы упростить решение проблем инженерии знаний при построении моделей, предназначенных для принятия ситуационных решений по управлению состояниями ТС в штатных и нештатных ситуациях. Этого можно добиться, если, не выходя за рамки общесистемного рассмотрения свойств предметной области, определить требуемые базисы представления этих процессов и систем в составляющих их частях, выявить и описать свойства и структуры взаимодействия этих частей и отразить эту информацию в КМ ТС в удобном для восприятия виде. Это позволит решать задачи инженерии знаний применительно к каждой части (объекту) этого базиса в отдельности, а не к предмету моделирования в целом. Чем больше будет представлено таких частей в КМ ТС и получено информации об их свойствах, тем проще станет решать задачи целенаправленного поиска, отбора, систематизации и структуризации знаний, необходимых для построения ситуационных моделей. Следовательно, основное требование к КМ ТС состоит в представлении общесистемных свойств состава, содержания и структуры логических взаимосвязей задач, решаемых в процессе функционирования СУ, с максимально возможной степенью их декомпозиции и детализации. Решение этой задачи позволит конкретизировать свойства атрибутов ситуационных моделей, используемых на различных этапах процесса управления состояниями ОУ – целей, ситуаций, состояний, решений, их структуры и семантических отношений между ними.

Состав свойств ситуационных моделей, используемых в СУ, отражает свойства функциональных частей и структуры объекта управления. Для описания свойств процессов принятия ситуационных решений необходимо выявить и описать свойства общесистемных закономерностей причинно-следственных процессов управляемого функционирования ОУ. При этом должны быть определены правила представления атрибутов СМ во множестве значений параметров, отражающих материальные процессы, происходящие при функционировании ОУ, и существующие отношения между используемыми семантическими понятиями. Для этого в КМ ТС должны быть в явном виде отражены взаимосвязи между ситуационными моделями и моделями процессов управляемого функционирования ОУ в ТС.

В КМ ТС должны быть представлены модели причинно-следственных процессов ситуационного управления состояниями ТС как в штатных, так и в потенциально возможных нештатных ситуациях.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ, гранты №№ 11-08-00641а, 11-08-01016а.

### Список литературы

[1] Гаврилова Т.А., Червинская К.Р. Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем. - М.: Радио и связь, 1982. - 200с.
[2] Солсо Р. Когнитивная психология. СПб.: Питер, 2006. – 589с.
[3] SYSTEMS ENGINEERING VISION 2020. Technical Operations International Council on Systems Engineering (INCOSE) (http://www.incose.org/ProductsPubs/pdf/SEVision2020_20071003_v2_03.pdf).
[4] ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем.
[5] Кириллов Н.П., Признаки класса и определение понятия «технические системы» // Авиакосмическое приборостроение. №8, 2009. С.32-38.

[6] Кириллов Н.П., Концептуальные модели технических систем с управляемыми состояниями // Искусственный интеллект и принятие решений. М.: РАН, 2011,№4.
[7] Miller G.A., The Magical Number Seven, Plus or Minus Two. // The Psychological Review, 1956, vol. 63, pp. 81-97.
[8] Макаров И. М., Лохин В. М., Интеллектуальные системы автоматического управления. – М.: Физико-математическая литература, 2001. – 287 с.

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ КОММУНИКАТИВНЫХ ДЕЙСТВИЙ

**В.А. Виттих[1], М.В. Игнатьев[2], С.В. Смирнов[1]**

[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]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» – Нижний Новгород
603155, Нижний Новгород, ул. Б. Печерская, 25/12, Россия
mikhail.ignatyev@gmail.com

***Ключевые слова:*** *системы поддержки коммуникативных действий, коммуникативные барьеры, аргументированный диалог, онтологии, интерсубъективность, интерсубъективные системы, онтологические модели, веб-ориентированная визуализация онтологий*

**Abstract**
This paper presents an ontology-based approach to development of communication action support system (CASS).The main idea is using five types of intersubjectivity to construct five ontologies. We present a method for visualization of intersubjectivities and argumented dialog as parts of CASS. Visualization should be web-oriented and selected framework WiGis can be a good tool for it.

## Введение

Разумеется, всякая *проблемная ситуация* характеризуется неопределенностью, а, зачастую, неизвестностью методов и средств её урегулирования. Это служит катализатором потребностей в *коммуникативных действиях* акторов. Во время коммуникативных действий возможно возникновение барьеров, препятствующих таким действиям.

Актуальность данной работы обусловлена развитием интерсубъективной теории [1] в приложениях к управлению социально-экономическими системами [2]. В структуру интерсубъективной теории, в отличие от классической научной включаются субъекты управления, и, следовательно, процесс урегулирования проблемной ситуации определяется возможностью взаимопонимания акторов. Это выражается в феномене интерсубъективности, наблюдаемом у взаимодействующих субъектов [3]. Поэтому в структуру теории необходимо включить спецификации различных типов интерсубъективности, а построение систем поддержки коммуникативных действий (СПКД) [4] вести с использованием онтологического подхода к представлению интерсубъективностей [5].

Традиционный способ коммуникационного взаимодействия - диалог – нуждается в расширенной поддержке. Из-за неэффективности диалога время, предназначенное для трансформации проблемной ситуации в необходимом направлении, тратится акторами на действия, которые отнюдь не способствуют быстрому решению проблемы. К тому же проблемная ситуация характеризуется изменчивостью, поэтому нерациональное расходование времени может стать причиной бессмысленности предпринимаемых акторами действий.

Поэтому актуальна разработка средств представления различных типов интерсубъективности в СПКД. От того, насколько наглядно и доступно представлена имеющаяся информация зависит персональное понимание актора. При этом на возможность вовлечения актора в процесс урегулирования не должна влиять его физическая пространственно-временная разъединенность с проблемной ситуацией. Отсюда следует, что такие средства должны быть web-

ориентированными, и разработка СПКД должна предусматривать функционирование подобных систем в сети интернет.

## 1 Коммуникативные барьеры в процессах регулирования ситуаций

Авторитетное международное консалтинговое агентство «McKinsey & Company» опубликовало исследование [6] об оптимизации работы сотрудников и определили в ней барьеры и препятствия, с которыми сталкиваются сотрудники в повседневной деятельности. Эти исследования показывают, что первостепенно необходимо изучить причины, которые препятствуют этим взаимодействиям. Вооруженные пониманием таких проблем, акторы смогут получить преимущества для своей деятельности, определив, какие усилия приведут к повышению эффективности и результативности взаимодействия между сотрудниками. Во многих компаниях, большая часть взаимодействий затрудняется следующими барьерами: физическим, техническим, социальным или культурным, контекстным и временным. Для рассмотрения выделим те барьеры, которые имеют коммуникативную природу.

*Социальные* барьеры (связанные, к примеру, с различным положением людей на иерархической лестнице) существуют между людьми, имеющими разные социальные статусы. Зачастую акторы, имеющие более высокий социальный статус, в процессах управления сознательно игнорируют аргументы акторов с социальным статусом ниже своего. Такие аргументы могут содержать очень важные сведения о проблемной ситуации. Акторы, которые сознательно лишают себя возможности использовать большее число источников знаний, утрачивают возможность скорейшей выработки адекватного решения.

*Культурные барьеры* возникают между акторами разных культурных уровней. Различия в культурных уровнях, обусловленные неоднородностью акторов, ни каким образом не указывают на некомпетентность того или иного субъекта. Наоборот, при коллегиальном управлении полезно знать точку зрения актора из другой культурной среды для того, чтобы принимать наиболее сбалансированные решения.

*Контекстные барьеры* сопутствуют коммуникативным действиям акторов из различных отделов и подразделений, затрудняя определение экспертного уровня другого актора или применение полученных от них сведений. Контекстные барьеры затрудняют согласованную деятельность, внося неясность в смысловое значение тех или иных понятий.

Несмотря на возникающие коммуникативные барьеры, акторам следует самостоятельно стремиться к достижению консенсуса, используя диалоговое взаимодействие, направленное на сближение их точек зрения.

При построении СПКД следует учитывать возможность возникновения вышеперечисленных барьеров путем включения соответствующих интерактивных инструментов для обеспечения взаимодействия неоднородных акторов. Так, к примеру, использование СПКД поможет преодолеть социальный барьер таким образом, что актор, имеющий социальный статус ниже, чем тот к которому он хочет обратиться, будет иметь возможность обработать информацию так, чтобы факт отправки был зафиксирован и доступен остальным акторам. Таким образом, исключается сознательное игнорирование, а вслед за ним и социальный барьер. Для обеспечения качества взаимодействия СПКД должны быть опорой для механизмов социального партнерства [7].

## 2 Аргументированный диалог

Традиционным видом коммуникативного взаимодействия, среди акторов является диалог. При возникновении проблемной ситуации, акторы инициируют коммуникативный процесс, направленный на достижение взаимопонимания относительно методов и средств, используемых при урегулировании проблемной ситуации. Очевидно, что в социально-экономических системах количество акторов, вовлеченных в процесс регулирования, ответст-

венных за тот или иной участок выполнения работ может быть достаточно велико. Время, которое тратиться акторами на различные диалоговые реплики (письма, звонки, переданные и принятые документы), трансформирует проблемную ситуацию, и достигнутые соглашения могут оказаться бессмысленными.

Простое использование диалога, как инструмента направленного на достижение взаимопонимания, не приведет к успеху, так как акторы могут обмениваться абсолютно любыми, порой противоречащими репликами. Такое положение дел не способно облегчить коммуникативное действие и ускорить выработку адекватного решения, а также может привести к бессистемным дебатам среди акторов.

В качестве базового инструмента в СПКД предлагается использовать особое проявление *дискурса – аргументированный диалог*. Выражение своей точки зрения актором в таком случае должно быть подкреплено аргументом - признанным и проверенным фактом. Аргументом может являться также информация о текущем ресурсном положении актора.

Такой диалог будет направлен на поиск адекватного решения, соответствующего проблемной ситуации. Использование аргументированного диалога позволит сократить количество актов коммуникативного взаимодействия, что приведет к ускорению урегулирования проблемной ситуации.

Для реализации взаимодействия акторов посредствам аргументированного диалога не требуется каких-либо специфических средств организации этого метода коммуникативного взаимодействия. Достаточно будет провести разъяснительную беседу с возможными участниками таких процессов и выработать соответствующую политику их проведения.

## 3 Построение онтологических моделей

Разработка онтологических моделей, соответствующих предметной области, достаточно трудоемкий процесс. Существует достаточно обширный набор программных средств, позволяющих вести построение онтологий [8]. Самым распространенным редактором онтологий на персональных компьютерах считается редактор Protégé [9]. Этот редактор не является web-ориентированным, что делает его на первый взгляд не пригодным для использования в системах поддержки коммуникативных действий.

Однако реализация Protégé на языке Java позволила использовать основную функциональность этого редактора для развития инструмента Web-protégé [10] (рисунок 1), который является полноценным редактором онтологий, но уступает по функциональности настольной версии Protégé. Следует отметить, что Web-protégé является программным продуктом с открытым исходным кодом. Это позволяет не только локализовать его под любого пользователя, но и в необходимом объеме расширить функциональность этого продукта. Несомненным достоинством редактора Web-protégé является то, что он разработан на языке Java. Тем самым клиент-серверное приложение позволяет использовать «родные» методы языка программирования для разработки пользовательского интерфейса. Трансляция в методы, приемлемые для использования в браузерах, возможна с использованием продукта от компании Google – Google Web Toolkit (GWT) [11]. GWT представляет собой фреймворк, который позволяет создавать AJAX приложения на языке Java. Серверной частью в этом случае являются методы, предоставляемые настольной версией редактора Protégé.

Таким образом, в СПКД для построения онтологических моделей можно использовать редактор Web-protégé, который может быть локализован и использован для совместного и согласованного построения онтологической модели ситуации. Предлагаемый редактор является web-ориентированными, что позволит оперативно строить модели, соответствующие проблемной ситуации.

Более того, с наступление эры Semantic Web, использование в СПКД именно web-ориентированных инструментов для построения онтологических моделей оправдано вызовами

будущего для информационных систем и позволит переиспользовать накопленный опыт при разработке и модернизации методов средств составляющих СПКД.

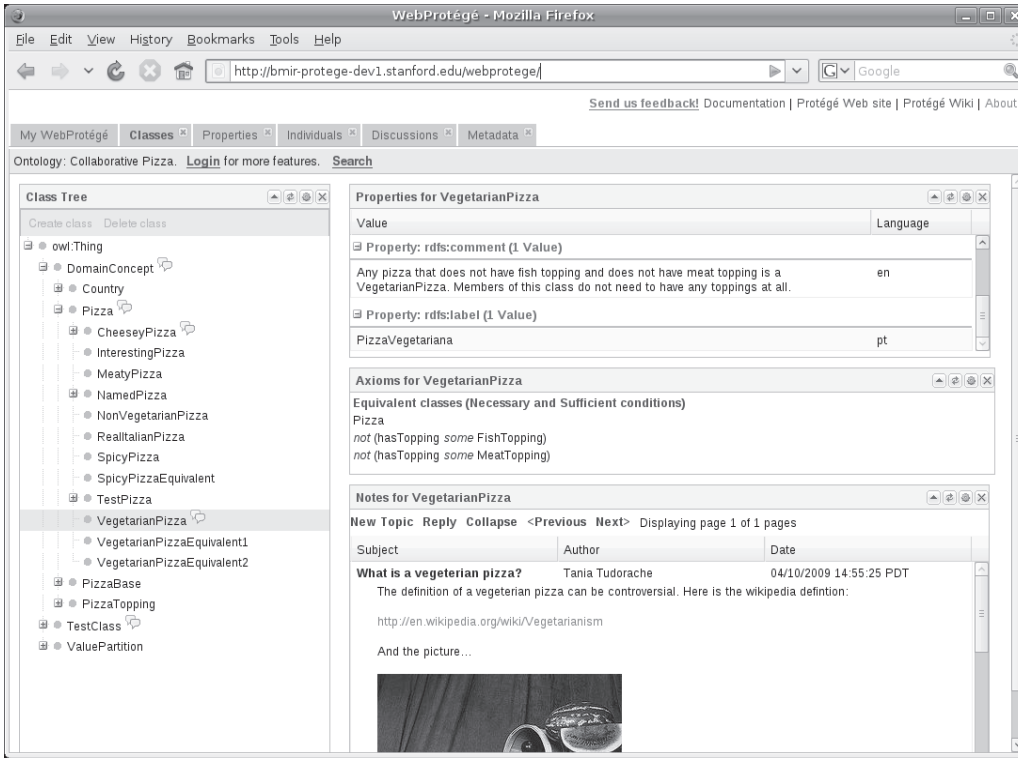



Рисунок 1 – Web- интерфейс редактора Web-protégé

## 4 Визуализация онтологических моделей

Интерактивная визуализация в целом является самостоятельной практической задачей, которая не имеет соответствующего стандартизированного решения. Существует множество подходов к решению задачи интерактивной визуализации данных применимых к использованию на персональных компьютерах. Такие подходы реализованы в различных одноплатформенных (например, Microsoft .Net) и кроссплатформенных (например, Qt) средствах разработки графического пользовательского интерфейса.

Для СПКД необходимо использовать web-ориентированные, а, следовательно, не зависящие от программных возможностей конечного пользователя, средства интерактивной визуализации. Наиболее распространенной технологией для разработки таких средств является технология Adobe Flash, но использование этой технологии в разработках СПКД не является приемлемым из-за проприетарности и закрытость программного кода. Эти ограничения не способствуют качественной интеграции приложений, реализованных с использованием этой технологии, с элементами СПКД, которые, архитектурно, не имеют явных связей с данной технологией. Для интерактивной визуализации онтологических моделей предлагается использовать WiGis [12] (рисунки 2 и 3).

Wigis – web-ориентированный инструментарий для работы с графами, включая возможности для анализа графов. Для построения СПКД это фреймворк располагает функциональностью для интерактивной визуализации графов. Для отображения графа, содержащего 10000 узлов и 20000 ребер, требуется около 3 секунд, а при использовании интерактивных функций,

частота обновления картинки составляет 10 кадров в секунду. Wigis позволяет решать задачи визуализации, используя только web-браузер. Отметим также, что Wigis - инструмент с открытым исходным кодом, что позволяет его не только модифицировать под собственные требования, но и произвести его локализацию, сделав тем самым его доступным для любой группы пользователей.

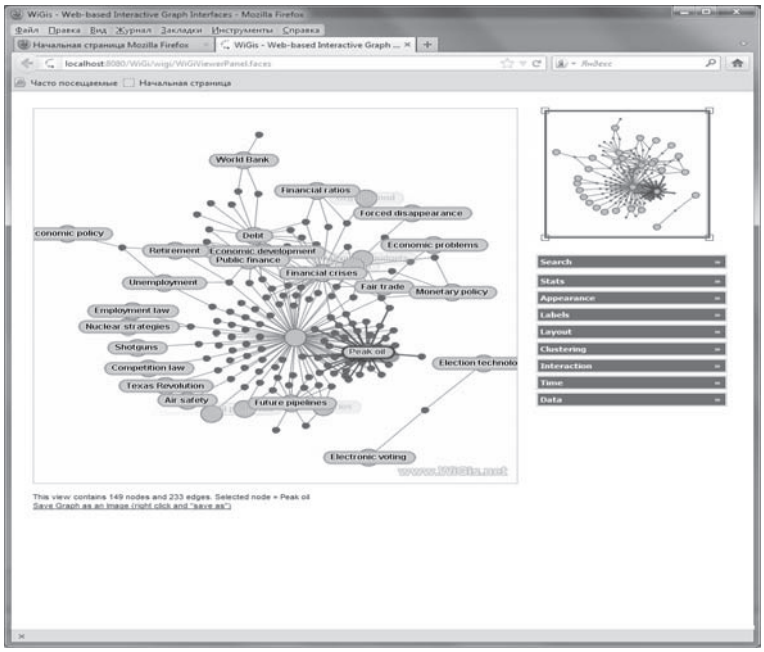



Рисунок 2 – Интерфейс Wigis

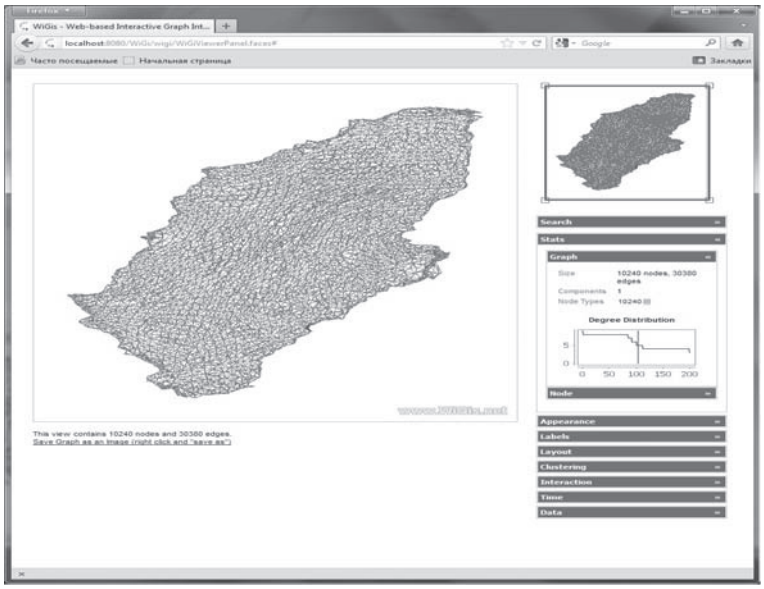



Рисунок 3 – Пример отображения более 10000 узлов и 30000 ребер на графе в Wigis

## Заключение

В работе были выделены барьеры на пути регулирования проблемных ситуаций, имеющие коммуникативную природу; СПКД должны предоставлять адекватные средства преодоления таких барьеров.

Основой для СПКД могут служить web-ориентированные средства, построенные на одной базовой платформе. Построение и интерактивная визуализация онтологических моделей являются основными средствами СПКД. Применение сочетания web-ориентированной версии хорошо себя зарекомендовавшего редактора Protégé с достаточно производительными инструментами интерактивной визуализации позволяет решать поставленные задачи по обеспечению информационной поддержки коммуникативных действий.

Использование в качестве базовых инструментов программных продуктов с открытым исходным кодом (например, коды Web-protégé и WiGis открыты) позволяет развивать существующие разработки по сопряжению имеющихся инструментов в будущем.

## Список литературы


[1] Виттих В.А. Интерсубъективные системы как объекты постнеклассической науки // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. №1. С. 53-55.

[2] Виттих В.А. Управление ситуациями в сложных развивающихся системах с применением интерсубъективных теорий. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. №12. С. 2-6.

[3] Хюбнер К. Истина мифа. - М.: Республика, 1996.

[4] Виттих В.А., Игнатьев М.В., Смирнов С.В. Системы поддержки коммуникативных действий. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIII международной конф. (15-17 июня 2011 г., Самара, Россия). - Самара: СамНЦ РАН, 2011. С. 369-371.

[5] Виттих В.А., Игнатьев М.В., Смирнов С.В. Онтологии в интерсубъективных теориях // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. №5.

[6] http://www.mckinseyquarterly.com/Organization/Strategic_Organization/Boosting_the_productivity_of_knowledge_workers_2671. Режим доступа свободный. Последнее обращение 12.02.2012.

[7] Виттих В.А. Социальное партнерство как основа организации процессов управления в информационном обществе // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIII международной конф. (15-17 июня 2011 г., Самара, Россия). - Самара, СамНЦ РАН, 2011. С. 10-17.

[8] Гаврилова Т.А., Муромцев Д.И. Интеллектуальные технологии в менеджменте: инструменты и системы // СПб.: Изд-во «Высшая школа менеджмента»; Издат. дом С.-Петерб. гос. ун-та, 2008.

[9] http://protege.stanford.edu Режим доступа: свободный. Последнее обращение 13.02.2012.

[10] http://protegewiki.stanford.edu/wiki/WebProtege Режим доступа: свободный. Последнее обращение 13.02.2012.

[11] https://developers.google.com/web-toolkit/ Режим доступа: Для зарегистрированных разработчиков. Регистрация свободная. Последнее обращение 27.02.2012.

[12] http://wigis.net/ Режим доступа: свободный. Последнее обращение 13.02.2012.

# МЕХАНИЗМЫ РЕДУКЦИИ В САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ МИРАХ ЦИКЛИЧЕСКИХ КОММУНИКАЦИЙ

**С.Ф. Сергеев[1], Ю.Ю. Заплаткин[1], М.А. Захаревич[2]**

[1]ОАО «Корпорация «Аэрокосмическое оборудование»»
197101, Санкт-Петербург, ул. Б. Монетная, 16, Россия
corporation@aequipment.com
тел: +7 (812) 313-82-33, факс: +7 (846) 333-82-94

[2]ОАО «Московский институт электромеханики и автоматики»
125319, Москва, Авиационный переулок, 5, Россия
aomiea@aviapribor.ru
тел: +7 (499) 152-48-74, факс: +7 (499) 152-26-31

***Ключевые слова:*** *редукция, искусственный мир, коммуникация, принципы самоорганизации сложных систем, самоорганизующиеся среды*

**Abstract**
The present article contains a brief description of the cyclic “reduced-complexity” principle. The above-mentioned principle is viewed as one of the basic construction and functioning principles of self-organizing systems of diverse physical nature. The authors analyze the peculiarities of the realization of this principle in systems with organized complexity, including human consciousness, biological and social systems. The article contains a number of possible approaches to the realization of this principle in self-organizing complex technical environments and systems implementing a purposeful and intelligent behavior.

## Введение

Последние полвека в создании сложных технических и эргатических систем прошли под сильным влиянием классического системного, кибернетического и информационного подходов, современный междисциплинарный вариант которых представлен в когнитивных науках (*cognitive science*) [1,2] и в дискурсе классических наук об управлении. Именно данная методология инженерной деятельности позволила создать существующие технические системы, техногенную среду человечества. Человек в таких системах является алгоритмическим компонентом, элементом системы «человек-машина», решающим задачу целеполагания и управления. Он в известной мере отделен средствами интерфейса от функционирования технической части системы, представляющей собой локально функционирующее физическое устройство.

Вместе с тем первое десятилетие XXI века прошло под знаком чрезвычайного ускорения роста научно-технологической мощи человеческой цивилизации. Наблюдается тотальное развитие методов мобильного и распределенного хранения и обработки информации. Развиваются глобальные системы связи и коммуникации (сотовые телефоны, сеть интернет), включаемые в искусственные техногенные среды, использующие технологии искусственного интеллекта и тотальной виртуализации.

Идут процессы интенсивного формирования искусственных физических и виртуальных сред, их сращивания с естественными средами человеческой жизнедеятельности. Технические системы становятся элементами сложных социотехнических композиций, включающих человека и профессиональные социальные группы в сложные формы коммуникативных взаимодействий определяющих их эффективность.

В последнее десятилетие возникла и интенсивно развивается технология *дополненной реальности* (*Augmented Reality*), которая является развитием глобальных иммерсивных техноло-

гий обработки информации [3]. В ней виртуальное содержание информационно-коммуникативных сред смешивается в восприятии пользователя с информацией действительного мира. Активно развиваются и геоинформационные системы, использующие данные *GPS*-навигации. Наблюдается интенсивное внедрение технологии дополненной и виртуальной реальности во все сферы человеческой деятельности, связанные с информированием пользователей в реальном времени в процессе осуществления социальных управляющих коммуникаций. Это вопросы контроля сложных технических объектов, создания систем помощи и сопровождения, справочные и оперативно-советующие системы, системы информирования и принятия решений.

Можно говорить о возникновении за очень короткий исторический период *глобальной техногенной среды* сохранения, передачи, обработки и порождения информации, которая приобретает свойства *социальной коммуникационной и информационно-управляющей среды*, вовлекающей в сферу своей эволюции и влияния практически все человечество во всех сферах и формах его жизнедеятельности. Мы уже вышли за рамки информационной цивилизации, живем в *сетевом столетии искусственных информационных сред,* и эта реальность должна быть должным образом осознана и отрефлексирована нашим научным и инженерным сообществом.

Человечество незаметно перешло в мир самоорганизующейся сложности, по-прежнему используя для его конструирования и познания технологии простого механического мира. Это представляет серьезную опасность в силу возникающих негативных для человека кооперативных эффектов, появление которых носит непредсказуемый, хотя и не случайный характер. Возможности человека-оператора по обработке и оценке информации, принятию решений практически исчерпаны, что требует создания систем замещающих, дополняющих и расширяющих интеллектуальную компоненту технических сред. Проблема «умной» техногенной среды не решается методами классической методологии проектирования сложных систем. В силу этого возникает задача поиска новых подходов и форм проектирования систем организованной и самоорганизующейся сложности. Одним из подходов для поиска вариантов решения возникающих проблем является обращение к принципам функционирования биологических и социальных систем.

**Проблема редукции в проектировании систем организованной сложности**

Практически все исследователи сложных систем активно используют информационную парадигму, не особенно задумываясь над фактом странной живучести данного феномена.

Вместе с тем нужно заметить, что в информационном подходе скрыт глубокий смысл, заложенный в этимологии слова «информация». Термины «информация» и ее «передача» иллюстрируют возможности передачи и работы с *иными формами* (*ин-форма-ция*). Таким образом, принимая информационные представления, мы в неявном виде постулируем в качестве исходных положений о работе сложной системы ее возможности по оперированию с формами и их преобразованиями. Понятие «информация» дает возможность абстрагироваться от свойств ее носителя и рассматривать в едином плане широкий класс биологических и социальных систем, обладающих высокой сложностью, действующих на одинаковых принципах. Вместе с тем информационный подход не обращается к качественному многообразию возникающих системных образований, что ведет к его ограничениям и использованию однокачественных моделей при проектировании систем. Такой подход не позволяет рассматривать системы, включающие в свое функционирование элементы, отличающиеся от предметных физических моделей, используемых в инженерном проектировании.

Основополагающие исследования в философском осмыслении и создании понятийного базиса систем, включающих категорию «качество» на примере человеческого сознания, проведены Д.И. Дубровским и отражены в его известном информационном подходе к сознанию [4,5]. В отличие от других исследователей информационной парадигмы Д.И. Дубровский

не ограничивает проблему функционирования человека как сложной системы только решением вопросов количественных оценок и созданием информационных и структурно-логических моделей, отражающих работу механизмов психики. Он заявляет о сущности проблемы сознания в его «*квалиа*», – особых качествах субъективной реальности, несводимых к известным формам и свойствам объективного (наблюдаемого) мира. Введением постулата, что именно «*сознание обладает* специфическим и неотъемлемым качеством *субъективной реальности»* [5] Давид Израилевич отделяет доминирующие в когнитивной науке крайние формы физического редукционизма от собственно информационного подхода как формы научной методологии сложных систем.

Возникающий новый понятийный аппарат информационного подхода требует поиска базовых категорий, которые позволяют подойти к решению проблемы *сознания как информационной системы, порождающей и поддерживающей организованную сложность организованного качества.* Такой подход, на наш взгляд, может быть продуктивен для решения задач создания сложных технических и эрготехнических систем.

Одним из универсальных понятий, отражающих специфику работы механизмов, действующих на всех уровнях организации любой сложной системы, является понятие «редукция» (от английского *reduction*; немецкого *die Reduktion,* по-латыни *reductio* – возвращение). Оно широко используется практически во всех сферах знания для обозначения процессов и механизмов, ведущих к упрощению сложного, многокачественного произвольного процесса, сведению его к более простому, более доступному для анализа и решения, виду. Это и логико-методологический прием, заключающийся в замене одного явления другим, одной задачи (или проблемы) на другую с целью упрощения.

Вместе с тем *роль редукции как методологического принципа информационного подхода* недостаточно освещена в сфере анализа и проектирования сложных систем. Этому вопросу в приложении к системам циклической самоорганизации и посвящена настоящая статья. В качестве модели для наших рассуждений рассмотрим особенности работы механизмов редукции в человеческом сознании, так как аналогичных технических систем еще не создано.

**Истоки проблемы редукции в сознании**

Наше сознание способно непротиворечиво совмещать в себе миры психической и физической реальностей, придавать им свойства, обеспечивающие существование нашего «Я» и нашего тела. Механизм сознания неизвестным нам образом склеивает воедино фрагменты поступающей от органов чувств информации: случайной, фрагментарной, несвязанной, запутавшейся в потоке времени и событий, и создает новый мир субъективной реальности. Это мир, в котором развертывается история нашей жизни.

Редуцированный механизмами мозга и отраженный в сознании субъекта мир является полимодальным, непрерывным, синхронным, единым, причинно-следственным, аналоговым, имеющим временную координату вмещающую прошлое, настоящее и будущее человека. В то же время все известные нам психофизиологические механизмы его формирования дискретны. Целостность и возможность дифференциации и упорядочивания компонентов субъективной реальности в процессе познания обеспечиваются синхронной деятельностью всех когнитивных систем организма. Они порождают в человеке осознаваемое единство мира, его феноменальные свойства. Мир субъекта состоит не только из объектов, отражающих различные модальности по числу сенсорных систем. Он един и целостен. Происходящие в нем события наполнены для субъекта индивидуальными смыслами и намеками на бесконечную сложность мира и одновременно его простоту, доступность и понятность. Стрела времени из прошлого в будущее – это тоже результат редукции потока сознания, придание ему исторической логичности и осмысленности. В действительности субъективное время появляется только как результат логической обработки последовательностей различаемых субъектом событий.

Механизм редукции работает при минимальном контроле со стороны нашего «Я» (а иногда и при его активном участии), он создает иллюзию раздельности существования человека и мира, представленного для рефлексирующего субъекта в виде независимой, объективной реальности. В то же время возможна функциональная дезинтеграция сознания, во время которой мир и время рассыпаются на несвязанные фрагменты опыта, обрывки мыслей, восприятий и впечатлений. Она возникает как особое состояние субъекта, проявляющееся в его неспособности охватить единство и простоту мира, сопровождаясь субъективными ощущениями потери погруженности и вовлеченности в мир. Функциональная психическая дезинтеграция сопровождает большинство экстремальных состояний в жизни человека, а в норме при ясном сознании и «своем уме» мир субъекта предельно организован.

Редуцированный мир сознания прост, комплементарен, константен, естественен для погруженного в него субъекта. Время субъекта может произвольно меняться и не зависеть от физического времени. Субъективная реальность представлена субъекту в определенном интервале значений субъективного времени динамически целостной.

Вместе с тем редукция не есть просто упрощение мира, создание его понятной модели. Речь идет о конструировании модели, максимально сохраняющей жизненно важные для субъекта свойства отображаемого явления, воспринимаемого как реальность. Функцию редукции физической реальности в объективную реальность осуществляет механизм сознания, формирующий «цензора» в виде человеческого «Я», непрерывно строящего свои отношения с реальностью, будучи в известной мере независимым от окружения, что дает возможность говорить о свободе воли.

Простота и доступность редуцированного мира создают иллюзию его понятности и естественности, что сопровождается эффективными поведением и деятельностью в нем субъекта. Понимание создает человеку горизонт прогноза будущего и возможность использования знания о будущем в своих целях.

Однако редукция ведет и к ряду психологически неприятных следствий. Простой и понятный мир способствует сохранению ложного опыта, маскирует сложность реального мира, создает в сознании иллюзию знания.

Вторая проблема связана с динамическим шумом, сопровождающим процесс редукции. Система отбрасывает все микро изменения и варианты реальности, которые ставят под сомнение целостность и определенность результата редукции, воспринимая их как помеху. Иногда отбрасывается и релевантная, но непонятая и своевременно не оцененная информация.

Редуцируя физическую реальность и создавая собственный субъективный мир, сознание ведет себя как портной, непрерывно примеривающий одежды и перекраивающий их в зависимости от моды и фигуры клиента. Логико-методологический прием редукции, сводящий в процессе исследования одно явление к другому, одной задачи к другой, лежит в основе всех ассоциативных методов обучения и науки в целом. Проблема редукции заключается в попытке природы вместить бесконечный мир физической реальности через ограниченную структуру мозга в бесконечность психической реальности. Это ей вполне удается.

**Мозг как редуцирующая система**

В сущности, мозг является измерительной системой, создающей наблюдателя оценивающего состояния наблюдаемых систем. Результатом данной оценки является возникновение психической реальности. Психическая реальность – редуцированная форма физической реальности, результат редукции, осуществляемой мозгом как физической системой. Результат редукции зависит от наблюдателя, как и в физической квантовой системе, но в данном случае наблюдатель помещен в мир психической реальности, и возникает психическая редукция. Акт редукции необратим. Мы не можем, после того как совершены процессы наблюдения и измерения, ничего сказать о состоянии мира, существовавшем до того момента, когда он измерял-

ся. Редукция представляет субъекту мир в виде напоминающего киносъемку последовательного процесса сменяющих друг друга результатов измерений, фиксируемых в памяти. Каждый кадр – это результат редукции, а весь фильм – его редуцированная копия в хранилищах памяти человека.

Парадоксальность редукции в том, что она может порождать свойства измеряемой системы, реально у нее не существующие. В квантовой механике «появление» при измерении у квантовой системы свойств, которые не существовали до измерения, описывается как явление редукции состояния системы (коллапс волновой функции). Состояние, которое возникает после измерения (редуцированное) – это один из векторов-слагаемых, соответствующих результату, полученному в данном измерении. Все остальные слагаемые исчезают, и именно в этом состоит редукция. Редукция состояния перестраивает это состояние таким образом, чтобы оно полностью соответствовало результату измерения.

**Циклы редукции и усложнения в механизме сознании**

Согласно теории В. М. Аллахвердова, роль механизма сознания заключается в выдвижении догадок о реальном мире и проверке их. Сознание создает воображаемый мир как догадку о реальном мире и упрощает наблюдаемый мир посредством создания защитного пояса непротиворечивых осознаваемых гипотез. Работа сознания направлена на подтверждение своих ожиданий и снятие возможных противоречий [6]. Выдвинута гипотеза *гносеологической редукции*, в соответствии с которой психическая деятельность по упрощению, редукции содержания сознания есть неизбежное следствие процесса познания, осуществляемого когнитивной системой человека.

Однако рассматриваемый Аллахвердовым механизм – это только одна из сторон сознания, его редуцирующая компонента. Для эффективной работы сознания в целом необходимо постоянное поддержание *разнообразия* и *сложности* среды субъективного, из которой редуцируются осознаваемые гипотезы.

Мы постоянно усложняем мир и, пытаясь затем его упростить, находим точки компромиссов между сложностью реального мира и моделью, достаточной для существования в этом мире. Таким образом, сознание работает как механизм, непрерывно *циклически усложняющий и упрощающий мир*. Это вызывает *волновой пульсирующий процесс* порождения и опровержения гипотез. Идет смена уровней обобщения моделей и то, что было сложным на одном уровне представлений, становится тривиальным на другом. Отметим, что редукция в сознании возникает в процессе осознания. Именно в этот момент исчезают все другие возможные состояния сознания по отношению к его актуальному состоянию.

Пульсирующая сложность отражает процесс самоорганизации когнитивной системы человека, которая при недостатке ресурсов сложного контента создает их сама. Порождение сложности не равнозначно выдвижению гипотез, которые являются продуктом деятельности сознания, его материалом и могут быть даже при их многообразии достаточно простыми для сознания.

Поиск нового, необычного, загадочного присущ механизмам восприятия человека, что подчеркивается известным в психологии феноменом снижения значимости стимула при его многократном предъявлении. Видимо стимул, постоянно действующий на когнитивную систему, теряет свои возможности по генерации сложности и становится ей неинтересным. Этого нельзя сказать о новых стимулах. Тяга к новому может быть интерпретирована в данном контексте как попытка когнитивной системы скомпенсировать недостаток неопределенной информации и сложности, необходимые для поддержания работы когнитивной системы и сознания. Отсюда различие между людьми с высокой и низкой когнитивной сложностью можно интерпретировать как различия в работе их механизмов редукции.

Следует заметить, что механизмы «редукции-усложнения», (или «модуляции-трансформации») не связаны с механизмами анализа и синтеза, которые являются вторичными, работающими с возникшей в результате процедуры «редукции-усложнения» информацией. Это механизмы организации уже полученного субъективного опыта. Механизм пульсирующей «редукции-усложнения» работает автоматически и не связан с другими когнитивными качествами человека. Об этом свидетельствуют данные психологов, показавших отсутствие связи между когнитивной сложностью и интеллектом [7].

Появление нового знания в сознании не представляет собой последовательного движения от незнания к знанию. Это исторический процесс порождения знания из преобразований посредством редукции одной формы чувственной ткани в другую.

**Редукция комплексности в конструктивизме**

В теории систем У. Матураны, Ф. Варелы [8,9] и Никласа Лумана [10] биологические, психические и социальные системы представляют собой самоорганизующиеся единства аутопоэтического типа. Они осуществляют различение внутреннего и внешнего посредством механизма «редукции комплексности». Комплексность не есть некое состояние мира, отражаемое системой. Перепад комплексности означает отношение между системой и миром. Реальность всегда сложнее мира системы, поэтому она не может быть только редуцированной проекцией собственной организации, обладая бесконечным разнообразием, а содержит в себе также и другие системы. Большая чем у системы сложность реального мира вызывает необходимость, тем или иным способом, снижать ее. Это и есть редукция комплексности, относительно которой устанавливается функциональная эквивалентность.

Однако сложность – это не просто заранее данное свойство мира. Сама система в ходе функционирования вносит вклад в повышение сложности. Мир не детерминирует ее действий. У нее есть возможность выбора. Выбирая то или иное действие, она упрощает ситуацию, но упрощение оборачивается усложнением: каждое действие влечет за собой множество следствий, которые не поддаются учету. Редукция комплексности означает повышение комплексности.

Чтобы реагировать на усложнившийся мир, система умножает число состояний, совместимых с ее структурой, и таким образом усложняется, что еще более усложняет результаты ее функционирования. Ей становится все сложнее реагировать даже на себя самое. Таким образом, образуются внутренний и внешний горизонты как области, в пределах которых могут совершаться отбор информации и выбор способов совершения действий. В особенности это относится к системам, конституирующим смысл: психическим и социальным. Смысл постоянно отсылает к иным возможностям переживания и действия и контролирует доступ к этим иным возможностям. При смысловой форме редукции комплексности нет необратимого выбора: отвергнутые возможности сохраняются именно как возможности. Редукция возникает после роста сложности (комплексности) и создает в памяти человека миры реализованного и возможного.

**Механизм «редукции-усложнения» в искусственных сложных системах**

Редукция-усложнение, будучи универсальным принципом самоорганизации, формой селекции сложности окружающей среды и самоорганизации опыта должна присутствовать и в технических системах и средах организованной сложности, так как в противном случае объемы вовлекаемой в систему информации не могут быть обработаны в силу их бесконечного многообразия и многозначности.

Решение задач построения организованной сложности требует новых методологических решений, что проявляется в попытках создания постклассических моделей сложных систем, включающих понятия динамического хаоса и интерсубъективных отношений [11]. Одним из

элементов упорядочивания в данных моделях может служить рассматриваемый нами механизм «редукции-усложнения». Введение в управляющую среду системы контуров осуществляющих непрерывную циклическую редукцию окружающей среды во внутренний мир системы позволяет системе освобождаться от накапливаемого опыта, сохраняя только актуальные конфигурации, позволяющие формировать условия, ведущие к достижению цели.

Следует заметить, что механизмы редукции работают во всех формах коммуникации и их учет в социальных элементах техногенных сред необходим в силу конституирующего вид и структуру системы характера. Коммуникация не есть простая передача информации, а служит формой существования социальной самоорганизации, включение которой в искусственные среды может изменить их целевые и смысловые характеристики [10].

## Заключение

Одним из механизмов самоорганизации систем и сред организованной сложности является механизм «редукции-усложнения», позволяющий оптимизировать ресурсные возможности самоорганизующейся системы в процессе ее жизнедеятельности.

Данный механизм предполагает наличие в рамках искусственной системы:

- искусственного внутреннего мира, формируемого и поддерживаемого системой редукции сложности окружающей среды;
- функционирование циклов «редукции-усложнения» в рамках замкнутых описаний поддерживающих аутопоэтическую целостность внутреннего мира системы;
- систему принятия решений в рамках внутреннего мира системы;
- реализацию принятых решений и включение их в циклы «редукции-усложнения».

Авторы надеются, что настоящая статья послужит началом к обсуждению проблемы механизмов и технологий снятия избыточной сложности в искусственных системах в процессе их самоорганизации и функционирования (существования).

## Благодарности

Авторы выражают благодарность и признательность организаторам конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». В их числе сотрудникам Института проблем управления сложными системами РАН. Особую благодарность приносим лично научному советнику института, доктору технических наук, профессору Виттиху Владимиру Андреевичу за предоставленную возможность высказаться по настоящей проблеме.

## Список литературы

[1] Величковский Б.М. Современная когнитивная психология. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982.
[2] Величковский Б.М. Когнитивная наука: Основы психологии познания: в 2 т. – Т. 1. – М.: Смысл: Издательский центр Академия, 2006.
[3] Сергеев С.Ф. Присутствие и иммерсивность в обучающих средах. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2011.
[4] Дубровский Д.И. Психические явления и мозг. Философский анализ проблемы в связи с некоторыми актуальными задачами нейрофизиологии, психологии и кибернетики. – М.: Наука, 1971.
[5] Дубровский Д.И. Сознание, мозг, искусственный интеллект. – М.: Стратегия-Центр, 2007.
[6] Аллахвердов В.М. Сознание как парадокс. (Экспериментальная психологика. Т. 1). – СПб.: Изд-во ДНК, 2000.
[7] Шкуратова И.П. Когнитивный стиль и общение. – Ростов-на-Дону: Изд-во РГПУ, 1994.
[8] Матурана У. Биология познания // Язык и интеллект. Сб. / Пер с англ. и нем. / Сост. и вступ. ст. В.В. Петрова. М: Издательская группа Прогресс, 1995. – С. 95–142.
[9] Матурана. У. Древо познания / У. Матурана, Ф. Варела. – М.: Прогресс-Традиция, 2001.
[10] Луман Н. Введение в системную теорию. – М.: Логос, 2007.
[11] Виттих В.А. Когнитология развивающихся систем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 10. – С. 45–50.

# КЛАСТЕРИЗАЦИЯ НЕРАВНОВЕСНЫХ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ КАРТ

**Б.Г. Ильясов, Е.А. Макарова, Э.Р. Габдуллина, А.Н. Павлова**

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия
ea-makarova@mail.ru, palova.ugatu@gmail.com
тел: +7 (347) 273-78-35, факс: +7 (347) 273-78-35

***Ключевые слова:*** *макроэкономическая система, кругооборот финансовых потоков, динамическая модель, самоорганизующиеся карты Кохонена, неравновесные макроэкономические ситуации, кластеризация, принятие решений*

**Abstract**

The method of intellectual algorithms forming of decision making at macroeconomic system situational control in instability market conditions is proposed. Self-organizating Kohonen maps for dynamical non-equilibrium macroeconomic situation on the basis of simulation experiments results are constructed. Multiparametric analysis of constructed clusters of macroeconomic situations is made; decision making rules are formed considering economic sector stocks.

## Введение

Актуальность проблемы проведения исследований в области прогнозирования и стратегического планирования развития национальной экономики обусловлена особенностями современных условий мирового экономического развития, характеризующихся высокой степенью динамизма, нелинейностью протекающих процессов, а также наличием ресурсных ограничений. Одним из направлений исследований в решении этой проблемы является разработка модельных комплексов и программных инструментариев, предназначенных для поддержки принятия решений на макроэкономическом уровне и основанных на интеллектуальных технологиях и имитационном моделировании.

С целью обеспечения поддержки процедур анализа процессов управления макроэкономической системой (МЭС) ведется разработка системы имитационного моделирования и интеллектуального управления (СИМИУ) воспроизводственным процессом МЭС в неравновесных рыночных условиях. В составе СИМИУ выделены три взаимосвязанных компонента: система имитационного моделирования, система аналитической поддержки и система интеллектуальной поддержки принятия решений при ситуационном управлении воспроизводственным процессом МЭС. В статье рассматриваются вопросы построения третьего компонента СИМИУ.

## 1 Структура модели системы управления воспроизводственным процессом МЭС в рыночных условиях

Модель системы управления воспроизводственным процессом МЭС разработана в классе иерархических систем и содержит три уровня управления.

*Нижний уровень управления* включает контуры управления (рисунок 1), построенные на основе *принципа обратной связи* и предназначенные для регулирования процессов расхода финансовых ресурсов четырьмя макроэкономическими агентами (реальным сектором; сектором домашних хозяйств; секторами финансовых и государственных учреждений) в соответствии с

плановыми темпами по выделенным функциональным направлениям путем формирования управляющих воздействий $U_1(t)=\{U_{11}(t), U_{12}(t), U_{13}(t), U_{14}(t)\}$.

*Второй уровень управления* построении на основе *принципа адаптации* и предназначен для формирования управляющих воздействий $U_2(t)$, корректирующих плановые темпы расхода ресурсов на основе информации $X(t)$ о состоянии всех подсистем МЭС. Адаптация планов осуществляется в зависимости от текущих значений рыночных индикаторов (уровня цен, процентной ставки, цен на ресурсы), а также объема накопленных запасов секторов.

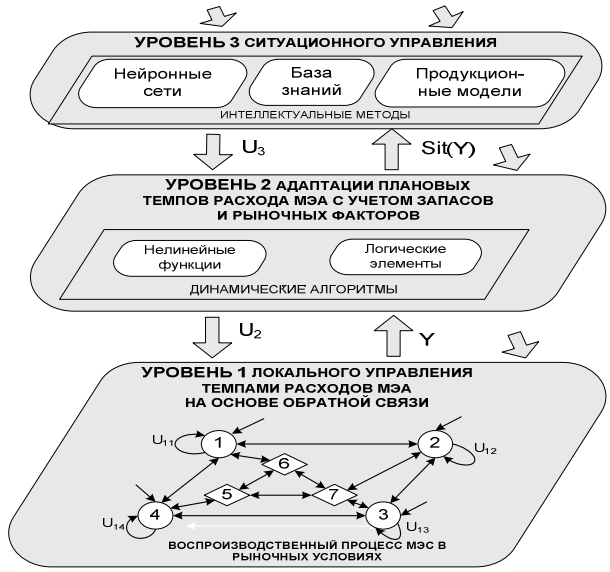



Рисунок 1 – Уровни иерархии модели системы управления воспроизводственным процессом МЭС в рыночных условиях

*Третий (верхний) уровень управления* построен на основе *принципа ситуационного управления*, предполагающего выполнение классификации текущей ситуации $Sit_i(Y)$ и преобразования ее в желаемую $Sit_j(Y^0)$ путем принятия множества решений $U(t)$. Применение ситуационного подхода предполагает использование знаний о текущих значениях множества макроэкономических индикаторов (темпах потоков, объемах запасов, рыночных факторах) как интегральную системную информацию, характеризующую состояние всей МЭС в целом, так и ее отдельных функциональных подсистем. Верхний уровень управления предназначен для решения задачи координации функционирования секторов путем своевременного принятия решений, направленных на перераспределение потоков финансовых ресурсов и соответствует поддержке принятия решений для государственных органов власти.

Цель управления МЭС состоит в обеспечении плановых темпов выпуска валового внутреннего продукта (ВВП), формирования расходов и получения доходов секторами МЭС при условии поддержания требуемых уровней инфляции и безработицы. Необходимость государственного вмешательства в экономику обусловлена неэффективностью адаптационных возможностей рыночных механизмов, не способных противодействовать негативным влияниям факторов внешней среды, и, как следствие, непропорциональному перераспределению запасов финансовых ресурсов между секторами экономики.

## 2 Модели и методы управления воспроизводственного процесса МЭС

Предложены следующие методы и модели управления для реализации функций выделенных уровней иерархии системы управления. Для выполнения функций регулирования *нижнего уровня управления* разработаны управляющие алгоритмы в классе *динамических непрерывных моделей,* действующие в автоматическом режиме.

Для выполнения функций *второго уровня управления* алгоритмы адаптации плановых темпов расхода ресурсов представлены в виде *правил – продукций*. Поскольку алгоритмы являются динамическими и должны работать в режиме модельного времени, продукционных правила реализованы в виде процедурных знаний, встроены в динамические модели функционирования секторов МЭС и функционируют в автоматическом и автоматизированном режимах [2, 3].

Функциональные особенности *верхнего уровня управления* требуют применения *интеллектуальных технологий* для решения слабоформализуемых задач принятия решений с участием человека. Особенность решения задачи классификации макроэкономических ситуаций состоит в необходимости выполнения человеком многопараметрического анализа ситуаций на основе большого количества макроэкономических индикаторов. Трудности такого анализа состоят: в недостаточности статистической информации о значениях макроэкономических показателей; в сложности формирования зависимостей при классификации ситуаций в динамике и принятии решений, а также в необходимости проведения многочисленных экспериментов с динамической моделью и анализа большого объема экспериментальных данных как по отдельному эксперименту, так и по всем экспериментам в целом. Перечисленные проблемы приводят к целесообразности применения нейросетевых методов для классификации макроэкономических ситуаций [2,3].

Особенности предлагаемого подхода к решению задачи классификации макроэкономических ситуаций состоят в следующем.

Во-первых, обучение нейронной сети предлагается проводить на основе экспериментальных данных, полученных при работе с динамической моделью. Это обусловлено тем, что после разработки динамическая модель превращается в средство для генерации новых знаний. Извлечение знаний осуществляется на основе интеллектуального анализа результатов многократного проведения имитационных экспериментов, которые заносятся в базу экспериментальных данных [5-8].

Во-вторых, из всех известных методов нейросетевого анализа данных наиболее предпочтительным является применение нейронных сетей (НС) Кохонена [3,4]. Это обусловлено несколькими причинами.

1) Если рассматривать процедуру проводимого анализа экспериментальных данных с позиции строгой формализации, то ей соответствует задача кластеризации. Постановка задачи кластеризации в отличие от задачи классификации не требует предварительного определения принадлежности объекта какому-либо кластеру. Как правило, отнесение ситуации к определенному классу выполняется экспертным путем, и это неизбежно привносит элемент субъективности в формирование выборки. Поэтому более целесообразным считается выполнение вначале предварительного анализа данных, например, с применением компонентного анализа, затем решение задачи кластеризации и, в завершении, сопоставление полученных результатов [2-4].
2) Полученное отображение многомерного пространства экспериментальных данных на плоскость в виде самоорганизующихся карт (СОК) обладает богатыми выразительными возможностями. Наглядное цветное отображение многомерного пространства экспериментальных данных на картах в разрезе отдельных признаков позволяет быстро дать качественную оценку каждому кластеру.
3) Визуальное представление кластеров на СОК хорошо интерпретируется. На картах выделяются области, объединяющие: кластеры ситуаций, более благоприятных, чем плановые; кластеры плановых ситуаций; кластеры умеренно неблагоприятных ситуаций; кластеры

очень неблагоприятных ситуаций, соответствующих зонам риска. По расположению текущей ситуации на СОК можно сформулировать качественную (на основе цветовой гаммы) и количественную (на основе матрицы расстояний для многомерного пространства) характеристики степени близости текущей ситуации к зоне риска.

Необходимо особо отметить, что возможность количественной оценки текущей ситуации может быть использована для определения эффективности принимаемых решений при управлении, цель которого представлена вектором желаемых значений параметров системы, формирующих кластер плановых ситуаций в многомерном признаковом пространстве.

Для решения задачи формирования правил поддержки принятия решений предлагается применение технологии экспертных систем, позволяющей не только учесть знания эксперта, основанные на его опыте и профессионализме, но и учесть знания эксперта о закономерностях динамики функционирования МЭС, полученные им в процессе работы с динамической моделью МЭС при проигрывании различных вариантов управляемых сценариев.

Открытым остается вопрос согласования во времени процессов функционирования различных уровней иерархической системы интеллектуальной поддержки управления МЭС: процесса работы динамических управляемых моделей МЭС нижнего уровня иерархии, процессов функционирования динамических алгоритмов адаптации среднего уровня, а также процессов работы алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия решений (ППР) верхнего уровня управления.

Ответом на этот вопрос является выбор технологии моделирования и проведения экспериментальных исследований МЭС на основе ЭВМ, а также разработка режимов проведения сценарных экспериментов. В качестве платформы, предоставляющей исследователю возможность использовать достоинства как динамических моделей, так и интеллектуальных методов поддержки принятия решений, а также согласовать во времени их работу, применяется имитационное моделирование [9].

Имитационное моделирование как парадигма компьютерного моделирования и экспериментального исследования динамики управления сложными системами позволяет: объединить в единой программной среде модели разных классов и обеспечить их согласованную работу в режиме модельного времени; визуализировать динамику происходящих процессов; предоставлять возможность гибкого сочетания автоматических и автоматизированных режимов корректировки параметров динамических моделей в процессе проведения экспериментов; обеспечить возможность принятия решений человеком в процессе моделирования при согласовании с рекомендациями подсистемы интеллектуальной ППР.

## 3 Метод формирования интеллектуальных алгоритмов поддержки принятия решения при управлении воспроизводственным процессом МЭС

Разработан метод формирования интеллектуальных алгоритмов поддержки принятия решения для верхнего (третьего) уровня управления МЭС с учетом запасов и рыночных условий. Предложенный метод включает девять этапов.

На *этапе 1* формулируются цели нейросетевого анализа макроэкономических ситуаций в динамике. Цели анализа разнообразны и выделяются по следующим классификационным признакам.

1) В зависимости от границ объекта исследования в качестве целей выделяют: анализ макроэкономических ситуаций для отдельных подсистем МЭС (секторов) и анализ ситуаций, характеризующих состояние МЭС в целом.
2) В зависимости от наличия неравновесия в качестве целей выделяют: анализ ситуаций, близких к динамически равновесным, и анализ динамически неравновесных ситуаций.
3) Для динамически равновесных ситуаций выделяют цели анализа различных типов воспроизводственных пропорций.

4) Для динамически неравновесных ситуаций выделяют цели анализа причин возникновения неравновесных ситуаций.
5) В зависимости от степени общности классификационных признаков в качестве целей выделяют: анализ макроэкономических ситуаций по интегральным признакам и анализ ситуаций по элементарным признакам.

Сочетание перечисленных целей анализа предоставляет возможность получить спектр возможных целей нейросетевого анализа макроэкономических ситуаций в динамике. Сформулированная цель определяет результат выполнения последующих этапов разработки интеллектуальных алгоритмов.

На *этапе 2* на основе сформулированной цели предварительно составляется множество признаков $X = \{x_{ji}\}, j_2 = \overline{1,m}$, которые участвуют в нейросетевом анализе экспериментальных данных, полученных при проведении имитационных экспериментов.

На *этапе 3* выполняется структурирование множества классификационных признаков *X*. Структурирование может быть выполнено на основе различных способов декомпозиции (объектный, процессный или причинно-следственный). Результатом процесса структуризации является граф, например, в виде дерева признаков *Tree* , корневой вершиной которого является переменная – класс макроэкономической ситуации, промежуточными вершинами и листьями – переменные, характеризующие состояние подсистем МЭС. Целью структуризации множества признаков является снижение размерности признакового пространства, необходимое для обеспечения обозримости характеристик кластеров [5,6]. Отметим, что пространство признаков образуют координаты фактического состояния многосекторной МЭС как динамического объекта управления (ДОУ).

Существуют и другие методы снижения размерности в интеллектуальном анализе (например, компонентный анализ), однако знания исследователя – эксперта, имеющего в своем распоряжении динамическую модель как источник знаний о структуре объекта исследования, признаются более предпочтительными.

На *этапе 4* выполняется анализ построенного дерева признаков, на выделенных уровнях дерева определяют количество групп признаков, которое определяет количество нейронных сетей, необходимых для кластеризации макроэкономических ситуаций. Далее этапы 5, 6 и 7 повторяются в цикле для каждой *q*-й НС Кохонена.

На *этапе 5* составляется план проведения $n_q$ имитационных экспериментов, определяется функциональные зависимости для возмущающих воздействий *F*(*t*).

На *этапе 6* определяется множество моментов времени $T_q = \{t_{qk}\}, k = \overline{1;l}$, в которые производится запись значений векторов возмущающих *F*(*t*), управляющих *U*(*t*) и управляемых *Y*(*t*) координат из рабочей области *MATLAB* в базу экспериментальных данных (БЭД). Отметим, что задание моментов времени реализовано в СИМИУ в двух режимах: автоматизированном, когда человек-эксперт по результатам анализа ранее проведенных экспериментов выбирает моменты времени; и в автоматическом, когда выполняется диагностика неравновесных состояний секторов и всей МЭС в целом в режиме модельного времени по заданным условиям.

*Этап 7* предназначен для построения и анализа самоорганизующихся карт $СОК_q$ для динамических неравновесных и равновесных ситуаций на основе имитационных экспериментов. Этот шаг является важным, так как именно здесь происходит формирование правил классификации и принятия решений.

На *этапе 7.1* согласно плана экспериментов проводятся серии имитационных экспериментов и заполняется БЭД. В результате проведения всех $n_q$ экспериментов в базу экспериментальных данных заносится ( $n_q \cdot l$ ) записей; где *l* – количество моментов времени, анализируемых в одном эксперименте.

На *этапе 7.2* из составленной БЭД эксперт в соответствии с дополнительными требованиями составляет обучающую выборку для НС*q*. Дополнительные требования могут быть связаны, например, с отсечением неинформативных моментов времени.

На *этапе 7.3* определяется предварительно состав признаков, участвующих в обучении, при этом исключаются признаки, не обладающие дискриминантной силой. Для определения важности признаков могут быть применены методы многомерного статического анализа [4,5]. Особенность применения нейросетевых методов кластеризации требует предварительного определения числа кластеров $k_q$. В результате шага 6.3 определяется структура НС Кохонена.

На *этапе 7.4* выполняется обучение НС Кохонена и построение СОК*q*. Для этого применяется программный продукт *Deductor,* подключение к которому реализовано при создании единого информационного пространства СИМИУ [7-9].

Анализ построенных $m_q$ карт признаков (*этап 7.5*) проводится вначале визуально, а затем с привлечением статистических данных о результатах кластеризации. Цветовая гамма изменения значений признаков позволяет дать быструю качественную оценку результатам кластеризации. Анализ качества кластеризации позволяет уточнить состав признаков, обладающих достаточной дискриминантной силой, и исключить из анализа неинформативные признаки.

Помимо анализа цветовой гаммы исследуется статистика по каждому кластеру, учитывается населенность кластеров. По результатам анализа СОК*q* могут быть изменены и состав признаков, и количество кластеров, что требует возврата на этап 7.4 и повторного обучения НС*q* Кохонена и построения СОК*q*.

Отметим, что для корректировки количества кластеров также можно применить визуальный анализ. Если в пределах одного кластера какой-либо признак существенно изменяет цвет (значение), то этот кластер можно разбить на два; требуется увеличить количество кластеров. И наоборот, если по какому-либо кластеру невозможно найти хотя бы один признак, значительно отличающийся от других кластеров по цвету (значению), то требуется уменьшить количество кластеров. В результате такой циклической процедуры формируются границы кластеров; вопрос о принадлежности ситуации к тому или иному кластеру решается в процессе использования обученной нейронной сети.

На *этапе 7.6* выполняется формулирование правил кластеризации ситуаций и правил принятия решений.

Формирование правил принятия решений выполняется только для нейронных сетей нижних уровней декомпозиции дерева признаков. Их особенностью является то, что выделенные кластеры различаются по такому набору сочетаний признаков, которые соответствуют определенной причине, вызвавшей эту типовую ситуацию. Другой, соседний, кластер соответствует другой типовой ситуации, вызванной другой типовой причиной. Например, рецессия совокупного спроса может быть вызвана, например, либо колебаниями спроса на деньги, либо изменением потребительского спроса. Переход между кластерами при таком подходе невозможен.

Поэтому для карт нижнего уровня декомпозиции макроэкономических ситуаций в динамике выполняются последовательно два этапа: *этап 7.7* – для выявления причин неблагоприятных ситуаций путем привлечения для анализа дополнительных признаков, не участвующих в обучении; и *этап 7.8* – для формирования продукционных правил принятия решений с участием признаков, также не присутствующих в обучающей выборке и характеризующих ресурсный потенциал (запасы) секторов экономики.

Завершающим шагом процедуры построения СОКq является *этап 7.9*, на котором выполняется построение типовых сценариев как цепочек переходов между кластерами динамически неравновесных и равновесных ситуаций в виде интегральной (обобщенной) траектории, позволяющей дать качественную оценку тенденциям движения системы. Построение траекторий движения МЭС в виде цепочки переходов между кластерами выполняется для нейронных сетей верхнего уровня декомпозиции. Переходы между кластерами хорошо интерпретируются. Для неуправляемых сценариев это траектории движения от плановой ситуации к ситуациям сначала умерено не-

благополучным, а если не предпринимать действия, то и к очень неблагоприятным, а далее – и к кризисным. Для управляемых сценариев движение МЭС направлено от зон кризисных ситуаций через зоны с умеренно неблагоприятными ситуациями к зонам с плановыми ситуациями, а далее, в случае эффективного управления, и к зонам с благоприятными ситуациями.

После завершения построения всех выделенных *q* нейронных сетей и формирования правил кластеризации и принятия решений на *этапе 8* становится возможным применение извлеченных правил для проигрывания нового имитационного эксперимента в режиме принятия решений.

На *этапе 9* выполняются: анализ состояния МЭС; останов процесса имитационного моделирования в требуемые моменты времени, подключение обученных НС Кохонена для классификации текущей микроэкономической ситуации, определение рекомендуемых решений и корректировка на их основе значений управляющих воздействий, которые изменяют неблагоприятные тенденции на тенденции движения к областям благоприятных ситуаций.

## 4 Пример разработки интеллектуальных алгоритмов принятия решений при управлении воспроизводственным процессом МЭС

В рамках решения задачи разработки интеллектуальных алгоритмов принятия решений при управлении воспроизводственным процессом МЭС в условиях взаимодействия рынков благ, труда и денег выполняется анализ динамически неравновесных ситуаций, характеризующих МЭС в целом на основе признаков различной степени общности.

Множество анализируемых признаков $X=\{ x_j \}, j=1;m$ включает элементы векторов *Y*, *F* и *U,* составляющих описание МЭС как ДОУ. Поскольку количество признаков достаточно большое (более сорока), то целесообразно предварительно структурировать их по степени общности описания неравновесных макроэкономических ситуаций. На рисунке 2 представлено двухуровневое дерево классификационных признаков.

Рисунок 2 – Дерево признаков для кластеризации макроэкономических ситуаций

Верхний уровень соответствует кластеризации макроэкономических ситуаций на основе информации о состоянии рынка благ. Информация о темпах выпуска ВВП, совокупных расходах, уровне цен и всех компонентах совокупного спроса, которые описывают состояние рынка благ как интегрирующей подсистемы МЭС, и является наиболее обобщенной характеристикой описания состояния МЭС. Для выполнения кластеризации на этом уровне разрабатывается нейронная сеть $HC_1$. Последовательность кластеризации ситуаций соответствует нисходящему движению по уровням иерархии.

Нижний уровень представлен четырьмя вершинами (группами признаков), которые определяют четыре типовые группы ситуаций, обусловленные изменениями совокупного спроса и совокупного предложения. По каждой из четырех групп ситуаций производится самостоятельная кластеризация на основе признаков, оказывающих влияние на изменение совокупного спроса (ситуации групп 1 и 3) или совокупного предложения (ситуации групп 2 и 4). Для кластеризации ситуаций этих групп разрабатываются четыре нейронные сети.

В качестве примера представлены две нейронные сети. Первая $HC_1$ Кохонена соответствует верхнему уровню декомпозиции и предназначена для кластеризации неравновесных макроэкономических ситуаций на основе обобщенной информации о состоянии рынка благ как интегрирующей подсистемы МЭС. Правила принятия решений не формируются. Вторая $HC_2$ Кохонена нижнего уровня предназначена для дополнительной кластеризации неравновесных ситуаций рецессии группы 3, обусловленных снижением совокупного спроса. Именно эта группа ситуаций является самой многочисленной по различным вариантам рецессии, которые связаны с изменениями в поведении всех секторов МЭС и требуют формирования отдельных множеств рекомендуемых решений либо по бюджетно-налоговой, либо по кредитно-денежной политикам, либо по их сочетанию.

Для построения каждой $HCq$ составлен план проведения $n_q$ экспериментов, определены множества $T_q = \{t_{qk}\}$ анализируемых моментов времени, проведены эксперименты по неуправляемым сценариям функционирования МЭС и созданы файлы БЭД. Сформирован вектор входных признаков $HC_1$:

$$X_{HC_1} = \{\dot{A}s,\ \dot{A}d,\ \dot{Y}_{\exp},\ \dot{\mathrm{R}}ev,\ P,\ \dot{I}b,\ \dot{G},\ Md,\ Ms, Un\},$$

где $\dot{A}s, \dot{A}d, \dot{Y}_{\exp}, \dot{\mathrm{R}}ev, \dot{I}b, \dot{G}$ – фактические темпы формирования совокупного предложения, совокупного спроса, ВВП по расходам, доходов реального сектора, инвестиционного спроса и госзакупок соответственно; $P$ - текущий уровень цен; $Md$ - спрос на деньги; $Ms$ - предложение денег, $Un$ - уровень безработицы.

Количество кластеров $k_1$ первоначально задается равным 8. Этот выбор объясняется количеством возможных групп неравновесных ситуаций на рынке благ, выделенных на основе анализа соотношения совокупного спроса, совокупного предложения и тенденций их изменения. Один кластер включает ситуаций, близкие к плановым. Группа 1 ситуаций подъема экономики представлена тремя кластерами с учетом политик, способствующих росту ВВП, а также ситуаций перегрева экономики. Группа 2 ситуаций экономического спада представлена двумя кластерами с учетом степени спада и отдаления от кластера плановых ситуаций. Группа 3 ситуаций также представлена двумя кластерами с учетом степени снижения совокупного спроса. Ситуации группы 4 не представлены, так как согласно ограничениям долгосрочный экономический рост в работе не рассматривается.

Выполнен анализ построенных $COK_1$ (рисунок 3), сформированы правила классификации макроэкономических ситуаций и принятия решений. Кластер $O_1$ включает ситуации, близкие к базовому равновесному режиму функционирования МЭС, но предполагающие незначительные отклонения между спросом и предложением на каждом из макроэкономических рынков, вызванные несущественными изменениями в поведении секторов МЭС. Решения не принимаются.

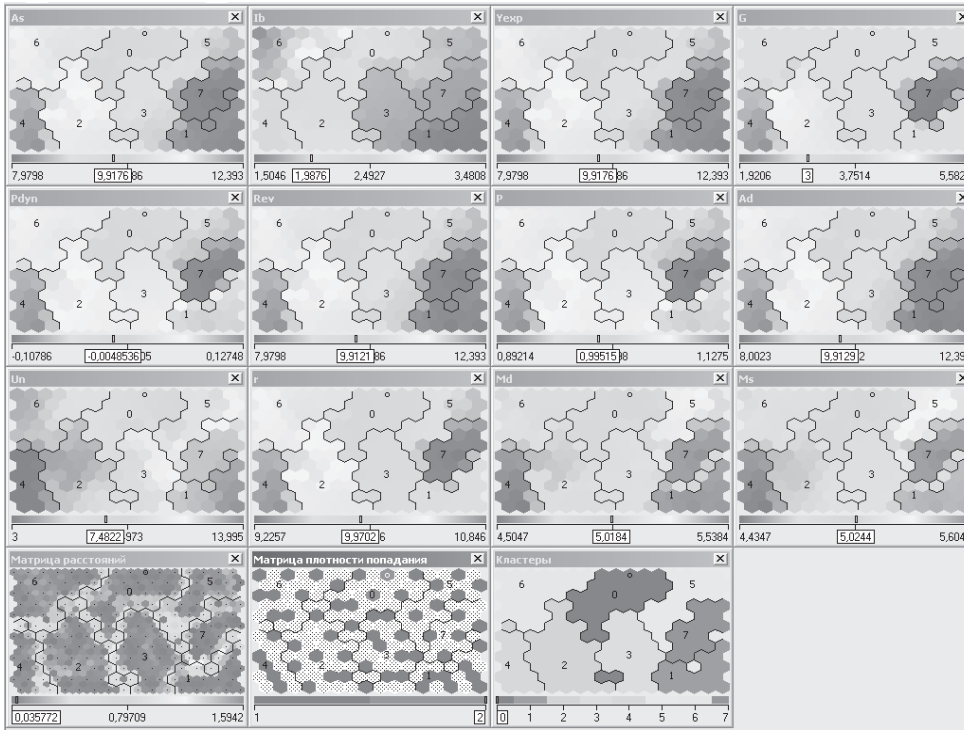



Рисунок 3 – Самоорганизующиеся карты $COK_1$ для неравновесных ситуаций МЭС с учетом информации о состоянии рынка благ

Интегральная характеристика кластеров и их расположения на картах состоит в следующем. Плановый кластер $O_1$ расположен в средней части карты. Постепенное ухудшение ситуаций происходит в направлении к правой части карты, что сопровождается изменением цвета карт от зеленого (в плановом кластере) до темно синего (в кластерах кризиса $7_1$ и стагфляции $1_1$). Подъем экономической конъюнктуры наблюдается при движении на карте влево от планового кластера, что соответствует изменению цвета, например, темпа выпуска ВВП $\dot{Y}_{\text{exp}}$ от зеленого к красному – в кластере $4_1$ ситуаций перегрева экономики

С плановым кластером $O_1$ граничат, таким образом, кластеры умеренно неблагоприятных ситуаций (справа) и кластеры более благоприятных, чем плановые (слева). Эти кластеры составляют «ближнее окружение» кластера плановых ситуаций. К «дальнему окружению» относятся кластеры, которые не граничат с плановым и относятся к очень неблагоприятным ситуациям (в правой части кары) и умеренно неблагоприятным (в левой части карты ситуациям перегрева экономики). Отметим, что эти ситуации относятся к нежелательным состояниям экономики, поскольку характеризуются инфляционными тенденциями и отсутствием резервов различных видов ресурсов (трудовых, капитальных).

В качества примера приведены характеристики нескольких кластеров.

Кластер $5_1^*$ (из «ближнего окружения») соответствует рецессии, возникшей вследствие падения совокупного спроса. Для ситуаций этой группы характерным является более низкий уровень ВВП $\dot{Y}_{\text{exp}}$, совокупного спроса $\dot{A}d$; незначительное снижение уровня цен *P,* спровоцированное снижением совокупного спроса; начавшийся реакцией рынка труда в виде не-

большого роста уровня безработицы $Un$. Рынок денег отреагировал ростом реального предложения денег $Ms$. Эта группа ситуаций пока незначительно отличается от плана, и именно поэтому требуется своевременное принятие решений, которые и должны возвратить МЭС на желаемую траекторию движения. Поскольку эти ситуации многочисленны, то выполняется дополнительная кластеризация их с помощью $HC_2$ и. формирование решений. Символ «*» свидетельствует об ухудшение ситуации.

Поскольку для всех последующих нейронные сети нижнего уровня не представлены, то дается качественная характеристика рекомендуемых действий. Рекомендуемые множества решений, в первую очередь, связаны с мерами монетарной политики $Dec_m^{IF}(\mathrm{r}, Ms)$, направленных на стимулирование инвестиционного спроса, а также с финансовой поддержкой государства $Dec_f^{IF}(\dot{T}r_1)$. Отметим, что в обозначении множества решений предполагается, что в скобках указан контур, на который оказывается воздействие; нижний индекс указывает изменяемый фактор; верхний индекс соответствует значению изменяемого фактора (M – поддерживание планового режима, IF – небольшое увеличение, I – увеличение, IM – значительное увеличение, DF – небольшое уменьшение, D – уменьшение, DM – значительное уменьшение).

Кластер $7_1^{**}$ соответствует углублению рецессии, вызванной падением совокупного спроса. Это ситуации, сходные по качественным характеристикам с ситуациями кластера $5_1^*$, но отличающиеся количественно по основным макроэкономическим показателям в худшую сторону. Эти ситуации близки к кризисным, имеет место значительное падение ВВП, низкие цены, наблюдается рост безработицы до 10-11%. Необходимы экстренные меры государственного вмешательства в экономику. Необходимы экстренные меры государственного вмешательства в экономику, которые должны включать значительные финансовые государственные расходы $Dec_f^{IM}(\dot{T}r_1, \dot{T}r_2, \dot{G})$, возможное облегчение налогового бремени $Dec_f^{DF}(\Delta k_{tp}, \Delta k_t)$, а также меры в области монетарной политики $Dec_m^{IM}(Ms)$, направленные на денежное подкрепление проводимой финансовой политики [1].

Далее выполняется построение второй нейронной сети Кохонена НС2 для дополнительной кластеризации ситуаций рецессии кластера $5_1^*$. Вектор входных признаков для $HC_2$ Кохонена представлен в виде: $X_{HC_2} = \{\dot{F}l_1, \dot{T}p, \dot{F}l_2, \dot{T}_2, \dot{C}, \dot{F}l_3, \dot{I}, \dot{F}l_4, \dot{G}, r\}$, где $\dot{F}l_i, i = \overline{1,4}$ – темп формирования сальдо потоков i-го сектора; $\dot{T}p, \dot{T}_2, \dot{C}, \dot{I}, \dot{G}$ – темпы формирования налогов на производство и импорт, подоходных налогов, потребления, инвестиций и госзакупок соответственно. Количество кластеров $к_2$ первоначально принимается равным 6. Это объясняется предполагаемым количеством типов рецессии совокупного спроса.

Построены $COK_2$ для ситуаций снижения совокупного спроса. Далее представлены примеры анализа построенных кластеров и сформулированных правил классификации и принятия решений.

Кластер $0_2$ включает ситуации рецессии, связанные со снижением потребления населения и ростом сбережений в силу сложившихся на основе рыночной информации потребительских ожиданий. Нарушен баланс потоков для сектора домохозяйств, что внесло возмущение в основной контур «производство-потребление» $\dot{R}l - \dot{C}$. Совокупный спрос снижен. Своевременно принятые решения в виде стимулирующей налогово-бюджетной политики $Dec_f^{IF}(\dot{T}r_2)$, позволят восстановить потребительский спрос.

Кластер $2_2$ включает неблагоприятные ситуации, связанные с особенностями инвестиционного климата и обусловленные негативными ожиданиями инвесторов и предположения-

ми их относительно предельной эффективности капитала [199]. Возмущения, внесенные в контур «инвестиции-сбережения» $\dot{S} - \dot{I}$, не могут не затронуть и основной контур $\dot{R}l - \dot{C}$. Решения должны быть связаны с мерами монетарной политики для создания благоприятного инвестиционного климата $Dec_m^{IF}(Ms)$, $Dec_m^{DF}(r)$. Выбор путей проведения монетарной политики может быть сделан в пользу политики дешевых денег, которая, однако, имеет опасность столкнуться с ликвидной ловушкой [1].

Кластер $1_2$ включает неблагоприятные ситуации, связанные с проведением сдерживающей финансовой политики государства, сокращением расходов на госзакупки. Следствием такой политики, которая может быть эффективна в периоды перегрева экономики, а в периоды экономического спада оказывает только деструктивное действие, является ухудшение ситуации в условиях уже начавшегося спада совокупного спроса. Рекомендуемое множество решений должно состоять из мер стимулирующей налогово-бюджетной политики $Dec_f^{IF}(\dot{T}r_2)$, $Dec_f^{IF}(\dot{G})$, которые должны позволить восстановить совокупный спрос и впоследствии – и совокупное предложение.

Правила принятия решений, например, для кластера $3_1^*$ правило имеет вид: ЕСЛИ кластер= $5_2$ И $St_2 = M$ *И* $St_3 = D$, ТО Решение= $Dec_m^I(Ms)$. В левой части которых представлен не только класс ситуации, но и запасы секторов экономики, требуемые для реализации рекомендуемых решений.

**Заключение**

Таким образом, предложен метод формирования интеллектуальных алгоритмов поддержки принятия решения при ситуационном управлении МЭС с учетом запасов и рыночных механизмов регулирования, который предполагает: построение самоорганизующихся карт Кохонена для динамически неравновесных и равновесных ситуаций на основе результатов имитационных экспериментов с учетом выделенных моментов времени; многопараметрический анализ построенных кластеров с учетом информации о рыночных индикаторах и формирование правил кластеризации; анализ причин неблагоприятных ситуаций и формирование правил принятия решений с учетом запасов секторов экономики; формирование типовых сценариев поведения МЭС как цепочки переходов между кластерами неравновесных макроэкономических ситуаций как интегральной траектории, позволяющей дать качественную оценку тенденциям движения МЭС.

**Список использованных источников**


[1] Макроэкономическое регулирование: роль государства и корпораций: учебное пособие / кол. авторов под ред. В.М.Соколинского. – М.: КНОРУС, 2010. – 248с.

[2] Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И.Д. Рудинского. - М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.: ил.

[3] Рыбина Г.В. Основы построения интеллектуальных систем: учеб. пособ. / Г.В. Рыбина. – М.: Финансы и статистика; ИНФРА-М, 2010. – 432 с.

[4] Кохонен Т. Самоорганизующиеся карты / Т.Кохонен; пер. 3-гоангл.изд. – М.:БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 655 с.

[5] Дюк В., Самойленко А. Data Mining: учебный курс. – СПб.: Питер, 2001. – 368 с.

[6] Барсегян А.А. Анализ данных и процессов: учеб. пособие / 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.

[7] Ильясов Б.Г., Макарова Е.А., Павлова А.Н. Интеллектуальная информационная система поддержки процедур управления воспроизводственным процессом // Программные продукты и системы, 2010. – №1(89). – С. 88-90.

[8] Макарова Е.А. Программный комплекс для формирования базы экспериментальных данных по результатам имитационного моделирования. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия "Информатика. Телекоммуникации. Управление", 2009. №6(38). – С.85-88.
[9] Павловский Ю.Н. Имитационное моделирование : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Ю.Н. Павловский, Н.В. Белотелов, Ю.И. Бродский. – 2-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 240 с.

# POULTRY MANURE UTILISATION; A KNOWLEDGE TRANSFER PROJECT IN THE SVERDLOVSK REGION OF THE RUSSIAN FEDERATION

**A.C. Bijl**
Project Officer and project leader – NL Agency
NL EVD International
The Hague, The Netherlands
arie.bijl@agentschapnl.nl
phone: + 31 88 6021 460

***Key words:*** *environment care, pollution, poultry manure, bi-lateral assistance*

**Абстракт**
В прошлом году в Свердловской области выполнен проект передачи знаний об утилизации помёта домашней птицы. Этот так называемый G2G-проект был профинансирован правительством Нидерландов. Основной результат состоит в том, что ценность помёта домашней птицы в качестве удобрения для зерновых культур недооценена в указанном регионе, и существующее положение дел следовало бы изменить. В России действующее законодательство создает проблемы для птицеферм, так как помёт должен храниться сравнительно длительный период на ферме, и это доставляет неудобство для окружающего населения и риск с точки зрения ветеринаров. Продемонстрировать новую систему обработки помёта домашней птицы, его транспортировку и применение, чтобы затем подготовиться к внесению изменений в законодательство – эта инициатива не была поддержана в Свердловской области. Для уменьшения распространения запаха в окрестностях ферм, вывоз удобрения с ферм после быстрого компостирования в сочетании с высушиванием на ленте конвейера в птичниках считается интересным вариантом.

## Introduction

In 2010-2012 a knowledge transfer project between The Netherlands and Sverdlovsk region has been implemented concerning poultry manure under the Dutch Government to Government bilateral assistance program. Poultry farms of Russia experience difficulties with the disposal of the manure that is produced by the birds kept. In the past decades farms in The Netherlands faced also a problem with manure utilisation. That problem was of a different nature as in The Netherlands the problem was caused by the presence of too large numbers of livestock in the relatively small country. Feed ingredients were imported and the minerals that were remaining in the manure were a too heavy burden for the environment when used as fertiliser. The government of The Netherlands made strict legislation for manure since the mid eighties and livestock farmers, especially pig- and poultry farmers had to find solutions for this problem if they wanted to continue their business.

It was suggested that the knowledge that was gathered in The Netherlands by solving the "manure problem" might be beneficial to the authorities in the Sverdlovsk region to solve their problem. The project consisted of an inception phase in which a fact finding mission of Dutch experts to Sverdlovsk was held. After the inception phase a delegation from Sverdlovsk made a study tour of one week in The Netherlands. The delegation consisted of two officials of the Ministry of Agriculture and Food of Sverdlovsk region and 5 representatives of different poultry farms of the region.

The next activities were workshops in Sverdlovsk to disseminate the knowledge and get feedback on the ideas that were generated during the project from different stakeholders that are involved in the region with management on poultry farms.

One of the mechanisms that were introduced in The Netherlands to find solutions for the manure problem was the "governmental experiment". With this phenomenon the legislation on a certain issue is partly relaxed for a defined group of companies involved, to find practical solutions for a problem and prove that that their idea for solving the problem works and is an alternative way of achieving the same goal as the legislation introduced on the problem.

Last but not least within the project also activities were initiated to assess the practises of using poultry manure in the Sverdlovsk region. From the reports during the inception phase, it became clear that the adopted practises for using poultry manure in arable agriculture were counteracting the acceptance of manure as a fertiliser by arable farmers.

## 1 The poultry manure project

### 1.1 The Government to Government (G2G) technical assistance program and project

The Netherlands Ministry of Infrastructure and Environment had funds available for knowledge to be transferred under the G2G Environment facility. For this program all kinds of ideas could be proposed as long as it concerned a theme that needs attention in one of the target countries and in The Netherlands knowledge is available that can contribute to solutions.

In this particular case the project leader encountered the poultry manure situation during discussions on another bilateral program and proposed the responsible ministry in Sverdlovsk region to organise a G2G project on this.

The project that was developed consisted of the following activities:

- a fact finding mission by a group of Dutch experts on the theme;
- a study tour of Russian expert in The Netherlands;
- visits to different poultry farms in Sverdlovsk region;
- an advisory mission of an arable farming expert;
- workshops with stakeholders in Sverdlovsk region;
- design of a technical installation that could serve as the most favourable solution;
- dissemination activities.

Prior to the start of the project a meeting was held in the Federal Ministry of Agriculture to inform the federal authorities on the scope of the project and ask them if in any way they wanted to be involved in activities of the project. During that meeting also a representative of the Russian Poultry Union was present. In December 2010 the first activities started and in the summer of 2012 the project is going to be excluded.

### 1.2 Poultry manure in Sverlovsk region

Poultry production in the Russian Federation has developed in the past decades on large farms. Most of these are located near urban centres to facilitate easy distribution of the products poultry meat and eggs. This situation is also true in Sverdlovsk region. With a human population of 3.5 million people, the poultry population is approximately 11 million heads. The sector produces more meat and eggs than the region consumes so a small portion of the production is sold in other Russian regions. The estimated poultry manure production in the region is estimated at 85.000 tons.

### 1.3 Structure of the poultry industry

The poultry production sector consists of a number of production chains. Most important are the broiler meat production chain and the table egg production chain. Within each chain different stages can be recognised like rearing young bird and egg producing adult birds.

The different age stages produce manure with a different quality. Also the type of housing creates differences in quality of manure, especially concerning the physical attributes. In Russia mostly cage systems are found; parent stock, table egg layers as well as broilers are housed this way. This

type of housing creates opportunities to start "conditioning the manure" for later processing in an early stage by using ventilation air to start a drying process.

### 1.4 Poultry manure as a product

Poultry manure as a product has distinct attributes. Below a short comment on these.

Chemical

Fresh poultry manure contains the same chemical components as chicken feed. Of each component some has been digested for production and maintenance of the bird. What is most typical is that part of the nitrogen that was present in the feed as protein, is released from the bird as urea. So the main contents of poultry manure is carbohydrates, nitrogen and different minerals.

Biological

Poultry manure contains many types of viruses and bacteria as it comes from the intestinal tract of poultry. When the birds are healthy and do not carry micro organisms that are harmful to men, the product is safe.

Micro organisms that can be transmitted to men are:

- viruses: the only virus that is known to be spread in this way is High Pathogenic Avian Influenza. In case this virus is present in a flock of poultry, special measures will be taken. For manure it means storage for a considerable time. The virus will become inactive during long storage (6 months).
- bacteria: different bacteria can be harmful: some salmonellae, campylobacter, clostridia. It is expected that via hygienization these bacteria can be killed.

***Natural changes in composition***

The biological composition does change of course during storage, but no information is known what happens exactly. For bacteria this is not known as there are so many types of bacteria. From a long experience with using poultry manure, it is known that only persistence of harmful salmonellae and clostridia can create problems. However it happens rarely that clostridia are present in flocks of poultry. For harmful salmonellae a higher occurrence is reported. Some of them are quite persistent. However the specific micro organism must be present in the flock of poultry before it can be spread via the manure.

For the chemical composition the changes in the nitrogen fraction are most interesting. Undigested protein and urea are converted by bacteria into ammonia. This process is most active in manure that has a moisture content of more than 40 %. Below 30 % it almost stops.

When used as a fertiliser for crops, another important attribute becomes manifest: the high organic matter contents of poultry manure is very beneficial to soil fertility because of its gradual release of nutrients to plants and its positive contribution to soil organisms.

When used as an organic fertiliser, poultry manure has to compete with manure from other livestock. One imported trait gives it advantages above the "competition": poultry manure or rather the discharged urea has a small quantity of water. The combined discharge of urea and faeces creates a relatively dry raw material for the manure processing process.

Drying manure is important for the costs of logistics that are needed for bringing the manure from the production site to the arable farms where is will be used as a fertiliser. When the manure is produced by the chicken it has averagely a moisture content 87%. A rule of thumb is that if the transport distance is less than 25-30 kilometres, it is more economical to apply the manure in a liquid form; with bigger distances it pays to start a drying process as the transport of (large quantities of) water (in the manure) over long distances is very costly.

### 1.5 Legislation and utilisation

In the Russian Federation fresh poultry manure has been included in the waste legislation as hazardous waste class 3. This results in the following rules:

- Fresh manure cannot be removed from the farms unless by special transport vehicles that prevent any leakage. In case the manure is removed freshly from the farm, the storage facility at the receiving point must comply with strict conditions and rules.
- Fresh poultry manure should in any other case be stored at the farm (4 to 6 months) until it is composted; then it changes automatically from Class 3 to Class 4 of the hazardous waste legislation and can be transported by ordinary trucks to the places where it can be used as a fertilizer.
- The receiving farms must submit a plan for utilising the manure before they are allowed to receive manure. This plan has to be approved by the inspection service of the Ministry of Environment.

The present legislation creates unfavourable effects for both the farms and the surrounding population:

- The manure has to be stored in open spaces and because of the long storage period, the weight of the manure increases as rain-/ snow water adds to the weight;
- The storages are close to the farms; from a veterinary point of view this is not wise as certain microorganisms may be transferred back to new flocks on the farms.
- The storage give considerable extra emissions of odours and other nuisances that are unfavourable for surrounding population.

As the project is aimed at transferring knowledge from The Netherlands to Russia, a brief overview of the most important points of relevant Dutch legislation:

- Manure legislation in The Netherlands is aimed at a restrictive application of manure as a fertiliser for crops; maximum allowed annual gifts are the basis;
- To control the above situation, strict rules for transport and storage of manure are applied.
- Parallel to the manure legislation, other legislation is in force for farms to control emissions of the farms to the environment (both population and nature).

### 1.6 Existing initiatives

In the Russian Federation different initiatives have been taken to solve the problems with poultry manure. Most have been concentrating on drying the manure in order to make transport of the product more economical and/ or with a focus on serving niche markets.

One of the niche markets is export. In case of another Dutch financed project, a drying tunnel was installed at Roskar Poultry farm in Leningrad region. This installation was delivered by the Dutch based company Dorset. The manure is dried to approx. 20% moisture and pelletized. For sanitation purpose it is heat treated before being packed. In that way the product is suitable for exports.

Other initiatives are aimed at the domestic markets of garden owners. Also here the extraction of moisture from the product and/ or odour reduction are the aims of the process. “Fresh” dry poultry manure can occasionally be supplied to vegetable garden owners in large quantities. We experienced this during the project in case of a parent stock farm with floor keeping system.

In Sverdlovsk especially Sredneuralsk poultry farm has taken several initiatives to make a manure product; the latest is a process of drying/ sanitizing with the help of electro-magnetism.

Most of these initiatives require large amounts of energy which make the end product costly. In case of niche markets like (private) ornamental gardens and/ or vegetable gardens the higher cost can be compensated by a reasonable price. However for the main quantity of poultry manure produced on the farms in Russia, more economic practises must be pursued as the main market, being arable farms, is very competitive.

## 2 Results of the project

As the project is a knowledge transfer project, the knowledge transfer is not a goal in itself but the knowledge must be beneficial to the solution of problems that exist in the receiving country. In this case the region of Sverdlovsk is the place where the knowledge was going to be applied. The region of Sverdlovsk has a surface of approximately 300.000 km2. The area is mostly covered by forests. There is approximately 600.000 ha. of arable land that is in principle the market for livestock manure of the region. A rough calculation based on agronomic principles give the conclusion that the potential market is large enough for the livestock manure production of the region. In the view of the project team, the policy of the regional Ministry of Agriculture and Food should be aimed at stimulating the market. So that can be seen as the secondary goal of the project.

### 2.1 Alternatives considered

During the inception phase general information was passed to the Sverdlovsk Ministry of Agriculture and Food and stakeholders in the region on different solutions that had been adopted in The Netherlands on the (poultry) manure problem. During the study tour different solutions have been visited and discussed. Also information has given from legislative and enforcement authorities on the subject. The different objects that have been visited were:

- A broiler farm with biogas production. Though this farm did not use its own manure for the biogas installation (cow manure was the basic raw material for the digester), the manure from this farm was exported to Germany where it was used in a biogas installation (a more economical solution for that individual farm). Poultry manure has only been used in a few cases in biogas installations in The Netherlands as the chemical composition of poultry manure is not very suitable for this. Biogas installations are combined with "green" electricity production for which the producer receives a subsidy.
- A broiler farm that uses its manure on its own arable land. On this farm the particulars on manure storage and application was studied. Due to the "manure legislation" in The Netherlands, only small quantities of manure can be spread on the fields annually.
- A floor keeping egg layer farm with a drying tunnel of Dorset. This farm was a supplier of the incineration plant (see below). The manure was dried to 60-65 % dry matter. Following this excursion, a visit was made to the manufacturer of drying tunnels "Dorset".

Figure 1 – Poultry manure spreader

- A manufacturer of manure application equipment. This company called "Schuitemaker" manufactures equipment for both applying dry manure and liquid manure. The equipment for applying dry manure is suitable for applying smaller quantities per ha.
- Arable farms where both dry and liquid manure were applied.

- A logistic service provider for organising transport of manure from the poultry farms with the name “Mosterd v.d. Weg”; this company also transported manure from the farms that were infected with AI during the 2003 epidemic.
- A layer farm with fast composting facility. This farm was one of a group of farms that were enabled through a “governmental experiment” to find their own practical solution the manure situation. The fast composting installation processes belt dried manure (approx. 40% dry matter) to exportable manure of 60-70% dry matter. The process also enables the manure to get hygienized by a high temperature which can be naturally induced in the process. The manufacturer of this fast composting solution is Christiaens Environmental Technique.
- Another fast composting plant for floor type dry manure “Ferm-o-Feed” that dries the manure with composting from approx. 60% dry matter to approx. 80% dry matter. After that composting, the manure is pelletized and exported over long distances.
- A large scale manure incineration plant in which annually 400.000 tons of dry poultry manure is used as fuel to generate electricity. The electricity is rated as “green electricity” and the producer receives a subsidy from the government for that.

In between the visits, lectures were held on the enforcement system of the manure legislation, the policies behind the legislation, theoretical and practical information for using livestock manure as a fertiliser, exports of manure over long distances and market development.

The studied alternatives are not exhaustive but are the ones that have been successfully applied under the Dutch situation. They are meant as an input for finding solutions under the Russian circumstances.

### 2.2 Possible solutions for the Sverdlovsk case

The issue of poultry manure utilisation is a complex one. Throughout the production period on the farm, the quality can be influenced by feed composition, housing equipment, management practises etc. Costs must be kept low as the customers usually are not willing to pay high prices for the manure. Below recommendations are given that may contribute to improving the situation.

***Market for manure***

The situation in Sverdlovsk region is such that theoretically the produced poultry manure can be utilised on arable field in the region in an environmental responsible way. Before that level of utilisation can be achieved, the acceptance of poultry manure with arable farmers needs to be improved. The acceptance can be improved when some changes will take place:

- The utilisation of poultry manure must be seen by arable farmers as a part of their strategy to improve soil fertility for the crops they grow.
- The logistic provisions of poultry manure must be adapted to the needs of arable farmers. It would probably be wise to establish storages of poultry manure in area’s with many arable farmers.
- The farmers must use specialised equipment to spread the manure in the required quantities (10-15 tons per ha) evenly on the fields.
- Subsidies that are available for the purchase of artificial fertilisers, should also be made available to the purchase of organic fertilizers.

The manure is a by-product of the poultry production chain. The arable farmers that use the manure as a fertilizer must be treated as customers. So the suppliers must adapt to the needs of those customers.

***Legislative environment***

The present legislation is experienced as very complex and prohibiting. The item that causes the main problem is the rule that fresh manure cannot be removed immediately from the farms to the

field where it is going to be used as a fertilizer. The storage in the open air discourages the farms to pay much attention to the quality of the product.

In the view of the Dutch experts the rule that fresh manure cannot be removed from the farm immediately is unnecessary: fresh manure from poultry flocks do not contain harmful elements unless a contagious disease has been identified on the farm. Only in that case measures should be imposed on the farms. Nevertheless the reason for introducing the present legislation seemed to be realistic. However it seems that the dumping of the manure was the most important reason for introduction of the present legislation. It is recommended to simplify the legislation into a system where administratively the manure can be traced from farm to place where it will be utilised and application quantities can be monitored. In The Netherlands, there is extensive experience with such system.

***Treatment on the farms***

As the majority of poultry is housed on cages, it is easy to introduce belt drying on the farms. In many cases manure belt cages are already in place; it will be easy and inexpensive to add a drying system to those cages. The aim of belt drying is to raise the dry matter % of the manure from approx. 25 % to at least 40%. Manure with less moisture is easier to transport and easier to handle.

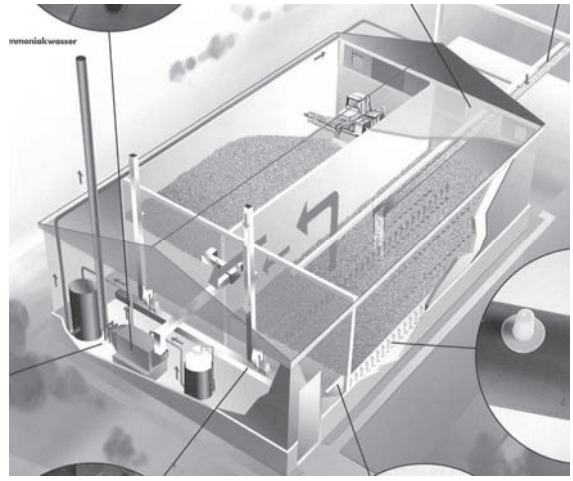


Figure 2 – Installation for fast composting

As long as the rule exists that fresh poultry manure cannot be transported to the arable field under easy conditions, a way of treatment must be practised. The easiest process for that is a system of fast composting. Immediately after removal from the poultry houses, the manure can be entered into composting chambers. There it will start composting immediately and dries in a week time from 40 % dry matter to approx. 60% dry matter. The composting chambers are ventilated and the exhaust air is washed to eliminate ammonia and reduce other odours. Within the process, a step can be included to raise the temperature in the chamber to approx. 70 $^{o}$C. This can be regarded as a sanitizing step.

***Logistics***

As stated earlier, when the fields for applying the manure are less than 50 kilometres from the farm, the system to consider is wet application. When manure is removed from the poultry houses it must be moisturized to approx. 20 % dry matter as it will be fit for pumping then. It can be stored in silos for some time. Application may be by overhead spraying.

When the manure has to be transported over a longer distance, it is advisable to dry it, this may be by composting or tunnel drying. Sometimes the drying is an attribute of the housing system like with floor housing. The reason for choosing a higher dry matter % is, that transporting the water in

manure makes transport costly. In the case of the Sverdlovsk farms, the maximum transport distance is 250 kilometres. A dry matter % of 60 would create the best economical solution for this situation.

Storage on the field where the manure is going to be applied is the most logical solution for dry manure. However under Russian circumstances this may not always be possible so above already is mentioned to make a central storage in area's with a lot of arable farming.

In case the transport of manure must be done over long distances (i.e. over 500 kilometres) it is advisable to further process the manure to a dry matter % of 80-85 %; pelletizing is often also an interesting step for manure products that have to travel long distances.

***Economics***

As the suggested solutions are new for Russian circumstances, no clear answer can be given what it would cost to process and transport the manure. One thing can be certain: the costs of manure at the arable farms must be lower than the benefits to get acceptance from arable farmers. So the benefits for the arable farmer must be quantified. First of all, the major nutrients in the manure can be valued at the price of their "artificial fertiliser" equivalent. So simply calculate the price of nitrogen and phosphorus that is in the manure. One should however take into consideration that the availability of those minerals from manure is not as quick and as high as with artificial fertiliser.

**Discussions**

1) Ecological principles.

Manure from livestock is a bye product of meat, egg or milk production. The animal that produce these consumer goods have been fed with minerals that once were part of soils. The nowadays structure of the livestock production chains is such that feed ingredients are transported over long distances. That means that if the ecological principal is followed, that excess minerals from livestock production, should be recycled to the soil, the manure should travel back top the field where the crops have been produced. This can only be done economically when the manure is very dry and compact. However processes that dry and compact the manure require a lot of energy which is in contradiction of ecological principles. A nasty dilemma. In case of The Netherlands the situation led to re-exporting feed ingredients in the form of manure. However the practise is that the manure is exported to other fields/ regions of the world than the feed ingredients were sourced from.

In the Russian situation, feed ingredients are sourced from regions of the Russian Federation where abundant crop production takes place (in the south and east). The livestock production is concentrated near big cities. As shortages of fertilising minerals are expected on mid long term (especially for phosphorus) it might be considered by the Russian policy makers to stimulate the recycling of manure minerals to the fields of origin.

2) Facilitating new ways of manure utilisation by Russian policy makers.

In 2003/ 2004 new legislation concerning (poultry) manure was introduced in Russia. This was apparently for good reasons as many livestock farms had very environment unfriendly practises for disposing of their manure. Now this legislation is in force for a considerable number of years, many farms experience problems when complying to that legislation. The problems are mainly in the sphere of nuisances for the population that lives in the surrounding of farms. Also the practises allowed for application of manure on fields will lead to excessive leaching of mineral to sub soil water; eventually the allowed concentrations for nitrogen compounds will be exceeded in (near) future, making the water less suitable as drinking water for livestock and people.

Within the project, the Ministry of Agriculture and Food of Sverdlovsk region has made an attempt to introduce an alternative way for (poultry) manure storage, transport and application that con-

sisted of a different approach to achieve the aims of environmentally responsible utilisation of manure. It failed because colleague ministries did not agree with such an approach. This is a missed chance as the "governmental experiment" that was initiated, was allowed on federal legislative level to prepare amendments to federal legislation. Now this initiative did not succeed, it is suggested that the authorities that are responsible on federal level for "manure legislation", are approached for changing the rules. When rules are eventually changed, it should be remembered that the Russian Federation has a large territory and the livestock farms face different circumstances with regard to manure processing and removal. The legislation should allow for different solutions that comply with the goals of environment friendly storage, transport and application of manure.

**Acknowledgements**

The project "Technical solutions and legislative environment for poultry manure in Sverdlovsk region, Russian Federation" would haven not been possible without the generous co-operation of many persons in the Sverdlovsk region. To mention a few: mr. V.G. Grebnev, deputy Minster of Agriculture and Food for the Sverdlovsk region, mr. N.A. Eiriyan and V.N. Bakhtin, both experts of the Sverdlovsk Ministry of Agriculture and Food. Dr. V. P. Lysenko of the All Russian Poultry Research and Technological Institute in Sergiev Posad. Different staff of the Ural State Academy for Agriculture have been very helpful with providing facilities for having workshops and giving information. Last but not least the staff of the different poultry farms in Sverdlovsk region have given excellent information on their farms and the practical issues concerning the manure disposal and utilisation.

**References**

[1] Many personal communications with officials, farm employees and experts.
[2] Dr. V. P. Lysenko, Ecological problems of Russian poultry factories and the role of biotechnology in organic waste processing.
[3] Dr. V. P. Lysenko, Poultry Manure is a Valuable Fertiliser.
[4] Ing. J.E.G. Peltjes, Report on the visit to Sverdlovsk region in August 2011.

# КОНТРОЛЛЕР РЕСУРСООБЕСПЕЧЕННОСТИ В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ КОММУНИКАТИВНЫХ ДЕЙСТВИЙ

**А.Н. Гинзбург[1], М.В. Игнатьев[2]**

[1]Институт прикладной физики РАН
06005, Нижний Новгорода, ул. Ульянова, 46, Россия
aginzburg@bk.ru
тел: +7 (831) 436-80-67

[2]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» – Нижний Новгород
603155, Нижний Новгород, ул. Б.Печерская, 25/12, Россия
mikhail.ignatyev@gmail.com

***Ключевые слова:*** *коммуникативное действие, система поддержки коммуникативных действий, обеспечение ресурсами, онтология, интерактивная визуализация онтологий*

**Abstract**
This paper presents the development details of resource controller. Describes ideas about using controller as provider of resource arguments for communication support systems. Development ideas include using ontology and web-oriented tools for collaborative ontology development. Tool for collaborative ontology development can be selected from huge field presented in the Internet. Authors suppose that Protégé and Web-Protégé can be selected as most effective tools for collaborative development. We can adopt Web-Protégé and add interactive visualization tool into web page. So, resource controller can be constructed using most effective tools without huge modifications or development process.

## Введение

Развитие интерсубъективных теорий и их приложений к управлению в социально-экономических системах предполагает построение систем поддержки коммуникативных действий (СПКД), как средств достижения взаимопонимания в процессах принятия решений о методах урегулирования проблемных ситуаций коллегией неоднородных акторов в условиях неопределенности [1]. Во время коммуникативных процессов акторы должны располагать необходимым количеством аргументов для отстаивания своей точки зрения. Информация о ресурсных возможностях акторов является весомым аргументом. Необходимость создания адекватных инструментов информационного обеспечения не вызывает сомнения. Методологические подходы к построению информационных систем, которые предоставляют подобного рода функциональность, достаточно широки: от систематизированного таблично-графического представления информации до сложных комплексов по извлечению информации из неструктурированных и разрозненных источников, различных систем имитационного моделирования.

В данной работе предлагается рассмотреть возможности адаптации концептуальной модели контроллера ресурсообеспеченности [2], учитывающей его использование в системах поддержки коммуникативных действий как элемента аргументации. Рассматриваются вопросы построения и реализации инструмента, который может функционировать как настольное, так и web-приложение.

## 1 Ресурсообеспеченность как аргумент

Системы поддержки коммуникативных действий опираются на аргументированный диалог как основной метод достижения взаимопонимания коллегией неоднородных акторов. Ис-

ходя из специфики выбранного типа коммуникационного взаимодействия, отметим, что основной информационной единицей будет служить аргумент. Аргументом может являться состоявшийся факт, общепринятое знание и другая достоверная информация. В процессе коммуникативного действия, каждый участник коллегии акторов рассматривает аргументацию других, принимает или отвергает её, волен модифицировать свой набор аргументов, противопоставлять свои аргументы аргументам предложенным другими акторами и т.д.

Урегулирование проблемной ситуации связано с расходованием определенных ресурсов, которые могут иметь различную природу (экономические, временные, человеческие и другие). Информация о доступных ресурсах, несомненно, весомый аргумент при диалоге. Даже в случае прямого доступа к необходимому ресурсу у одного актора, коллегия, заинтересованная в урегулировании проблемной ситуации может не иметь сведений о ресурсе по разнообразным причинам. В социально-экономических системах акторы, зачастую, не располагают должным уровнем информирования об имеющихся у них ресурсах, что зачастую является первопричиной возникновения дополнительных проблем.

Информация о ресурсном обеспечении служит аргументом в коммуникативном действии. Руководствуясь знанием о недостатке, необходимом количестве или избытке ресурса, актор способен оперативно реагировать на трансформации проблемной ситуации. Коллегия в результате коммуникативного действия способна достичь взаимопонимания о методах и средствах урегулирования, которые подкреплены соответствующей ресурсной базой.

## 2 Контроллер - адекватный инструментарий информирования

Опираясь на вышеизложенную идею использования информации о ресурсообеспеченности в качестве аргумента во время коммуникативных действий, отметим, что создание адекватного инструментария информирования о ресурсообеспеченности для использования во время коммуникативных действий становиться актуальной научно-практической задачей.

Информационные системы, которые успешно функционируют в структурах социально-экономических систем, как правило, уже имеют возможности по работе с ресурсами. Информационные системы такого класса принято обозначать аббревиатурой ERP (Enterprise resource planning). Такие системы направлены на управление ресурсами, имеющимися в распоряжении акторов при регулировании проблемных ситуаций, обеспечении функционирования различных процессов и другой деятельности, связанной с функционированием системы.

Если внимательно взглянуть на последствия управленческого решения, становится очевидным, что воплощение любого решения так или иначе связано с расходованием ресурсов. Если ресурс находиться под контролем искусственной системы и система располагает к нему беспрепятственным доступом, то с этой позиции ERP-системы соответствуют роли контроллера обеспечения.

Наиболее интересным объектом является ресурс, к которому у системы нет непосредственного доступа. Хорошим примером является необходимость расширения производства. Под расширением здесь понимается как расширение ассортимента выпускаемой продукции, так и территориальное расширение системы. При такой постановке задачи акторы могут иметь лишь поверхностное представление о необходимых ресурсах, а в самом трудном случае и не иметь такового. Приняв решение о целесообразности расширения производства, акторы вынуждены организовывать различные мероприятия для обеспечения информационной поддержки. Стоимость таких мероприятий и время их проведения должны быть минимизированы. Контроллер обеспечения ресурсами должен оперативно и в необходимом объеме предоставить информацию о том, какие ресурсы нужны для успешного воплощения идеи, какими ресурсами располагает система, где и в каком объеме можно получить доступ к недостающим ресурсам.

Пользователями контроллера могут выступать как акторы, так и лица, ответственные за наполнение информационных баз, пост-обработку данных, и другие лица, вовлеченные в про-

цесс урегулирования проблемной ситуации. В отдельную категорию пользователей можно выделить поставщиков ресурсов, которые являются источниками информации. В таком случае, для акторов, контроллер будет выступать как дополнительный инструмент анализа возможных путей поставки необходимых ресурсов. Предполагаемый доступ к информации о необходимых системе ресурсах позволит сторонним поставщикам найти новых потребителей.

## 3 Архитектурная модель

В работе [2] показаны концептуальные возможности обсуждаемого инструментария. На основании отмеченных особенностей можно разработать модульную архитектуру контроллера. Рисунок 1 показывает основные функциональные модули контроллера. Предлагаемая схема иллюстрирует также архитектурные связи между модулями.

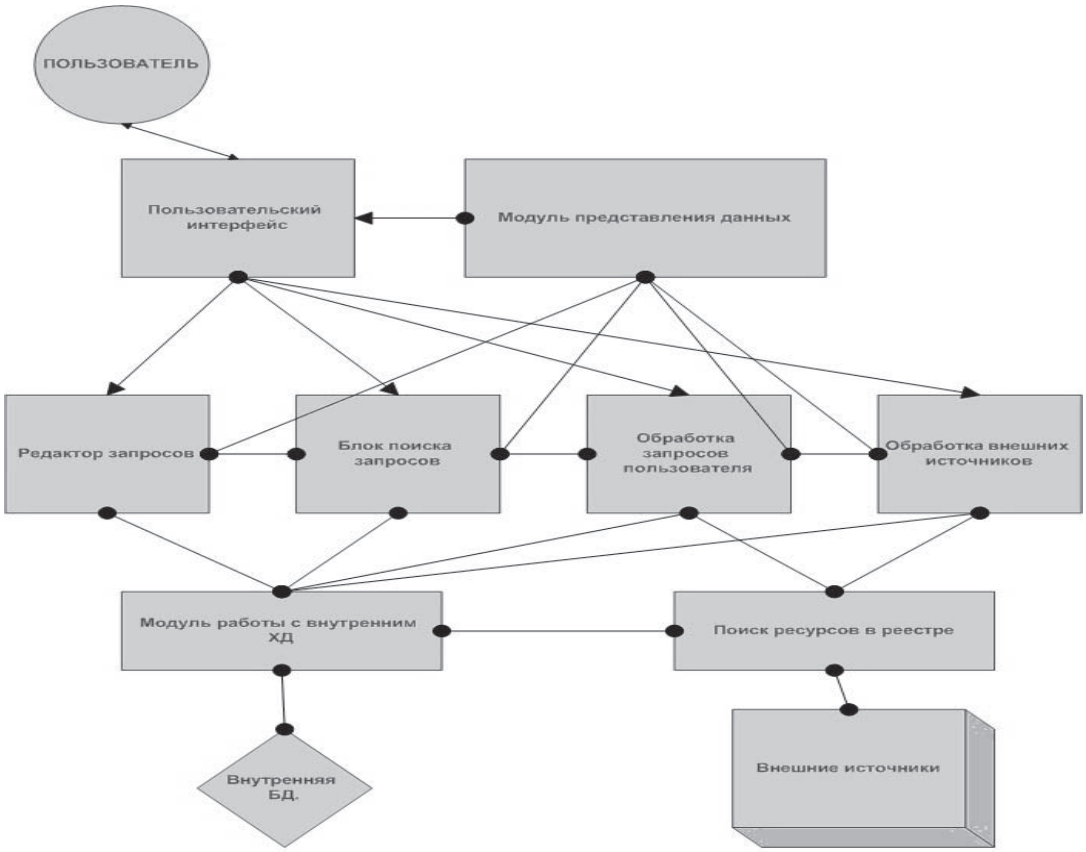



Рисунок 1 – Функциональные модули контроллера

### 3.1 Пользователи и интерфейсы

Как было сказано выше, контроллер предназначен для различных типов пользователей. Соответственно, для каждого типа пользователя необходимо разработать свой пользовательский интерфейс. Учитывая необходимость оперативного информирования, следует предусмотреть наличие как традиционного представления интерфейса, в виде локально установленного на персональный компьютер программного обеспечения, так и web-интерфейса, с реализациями функций, соответствующими настольной.

Для акторов интерфейс должен содержать такие средства работы с данными, которые:

- обеспечивают максимальную наглядность представления информации (различные средства для визуализации информации: построение графиков, таблиц и т.п.);
- предоставляют интуитивно понятные механизмы для построения запросов (мастера составления запросов, перечень типовых запросов с разбиением по типам ресурсов, недавно использовавшиеся запросы, поиск запросов по ключевым словам).
- в случае наделения актора полномочиями на выбор поставщика ресурсов, модуль для работы с внешними источниками данных, содержащими информацию о поставщиках, ресурсах, текущих ресурсных потребностях системы.

Для лиц, вовлеченных в информационное сопровождение контроллера интерфейс должен содержать такие средства работы с данными, которые содержат все необходимые функции для их обработки, включая средства для индивидуальной настройки интерфейса под конкретную задачу. Исходя из общей сложности работы по обработке разнородных данных, интерфейс будет не в полной мере понятен другим типам пользователей, и должен быть скрытым.

Для поставщиков ресурсов интерфейс должен состоять из двух концептуальных составляющих:

- модуль просмотра текущих ресурсных потребностей системы;
- модуль размещения информации о своих возможностях по предоставлению ресурсов.

### 3.2 Работа с запросами

Работа с запросами состоит в работе с набором модулей, реализующих функциональность по созданию, редактированию, сохранению, обработке (модификация и поиск). Реализация такой функциональности требует тщательной архитектурной проработки, которая должна включать в себя анализ возможных архитектур источников данных, оценку качества запросов, и другие задачи связанные с проектированием программного обеспечения.

### 3.3 Источники данных

Возможные особенности источников данных являются дополнительной причиной усложнения разработки качественной архитектуры контроллера. Источники данных могут быть как внутренними – локальными, так и внешними – удаленными базами и хранилищами данных, базами знаний и т.д. Разработка архитектуры локальных источников может опираться на известные правила и методы [3] проектирования, которые обеспечивают должный уровень качества работы программного обеспечения.

Для работы с внешними источниками следует предусмотреть средства автоматической обработки данных от таких источников, опираясь на описание архитектуры таких источников, предоставленное их разработчиками. При разработке функциональности по работе с внешними источниками данных необходимо учитывать возможные последствия такой работы и разработать средства безопасного доступа к внутренним модулям, чтобы избежать неблагоприятных последствий.

## 4 Аспекты реализации

Онтологический подход к организации внутренней структуры данных в контроллере позволяет говорить о том, что реализация контроллера как программно-аппаратного комплекса требует решения нескольких специфических задач. Пользовательский интерфейс двух видов требует реализации визуализации данных и онтологических моделей в web-браузере на персональном компьютере. Работа с запросами и разнообразными источниками данных также ставит задачи обеспечения функциональной совместимости реализаций контроллера.

Для решения поставленных задач необходимо выбирать такие средства реализации, которые будут обеспечивать совместимость версий интерфейса. Выбор средств реализации следует начинать с выбора языка программирования, на котором будут реализованы основные модули контроллера. Среди доступного множества предлагается выбрать язык Java. Средства этого

языка смогут обеспечить необходимый уровень качества конечного программного продукта. В качестве возможного решения задачи о двух интерфейсах предлагается взять за основу редактор онтологий Protege [4] и развивающиеся дополнение WebProtege к данному редактору позволяющее редактировать и создавать онтологические модели в web-браузере и позволяющее при необходимости развернуть полноценное web-приложение для доступа через сеть интернет. Для полноценной работы с онтологическими моделями в сети интернет необходимо средство интерактивной визуализации данных. Решение этой задачи авторы видят в следующей последовательности: расширение функциональности дополнения WebProtege путем добавления модуля экспорта онтологических моделей в формат XML, разработка или адаптация специализированного средства визуализации XML данных в web-браузере, например WiGis [5].

Таким образом, создание и обработка онтологических моделей на персональном компьютере будет происходить с использованием редактора Protege. Интерфейс WebProtege предоставляет функциональность для работы в сети интернет. Фреймворк Wigis служит средством интерактивной визуализации при работе с web-версией интерфейса. При работе с локальной версией интерфейс для акторов и интерфейс для поставщиков ресурсов может быть реализован с использованием множества доступных технологий Java: Eclipse, NetBeans, GWT и других.

**Заключение**

Контроллер ресурсообеспеченности может выступать как самостоятельное программное средство, но его использование в СПКД позволит решить задачу информационного обеспечения коммуникативной деятельности акторов в части снабжения информацией о ресурсном обеспечении. Такая информация может использоваться в качестве аргумента при коммуникативных действиях.

Контроллер может использоваться как инструмент для производителей и поставщиков ресурсов, способствующий организации реализации продукции.

**Список литературы**


[1] Виттих В.А., Игнатьев М.В., Смирнов С.В. Системы поддержки коммуникативных действий. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIII международной конф. (15-17 июня 2011 г., Самара, Россия). - Самара: СамНЦ РАН, 2011. - С. 369-371.

[2] Гинзбург А.Н., Игнатьев М.В. Концептуальная модель контроллера обеспеченности ресурсами в СППР на основе онтологий // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XII международной конф. (21-23 июня 2010 г., Самара, Россия). - Самара: СамНЦ РАН, 2010. - С. 548-552.

[3] Дейт К.Дж. Введение в системы баз данных. - М.: Вильямс, 2006.

[4] http://protege.stanford.edu/, http://protegewiki.stanford.edu/wiki/WebProtege
Режим доступа: свободный. Последнее обращение 20.03.2012.

[5] http://www.wigis.net. Режим доступа: свободный. Последнее обращение 20.03.2012.

# СОВРЕМЕННЫЕ СИЛОВЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИИ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА

**З.В. Апанович**

Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Лаврентьева, 6, Россия
apanovich@iis.nsk.su
тел: +7 (383) 330-93-44, факс: +7 (383) 332-34-94

***Ключевые слова:*** *многоуровневые методы визуализации, алгоритм Камада-Кавая, алгоритм Фрюхтерман-Рейнгольда, GRIP, HDE, FM$^3$,Topolayout*

**Abstract**

Methods of Information visualization are aimed at abstract data representation in order to enhance cognitive capabilities of user. This kind of visualization can be a part of the user interface of information systems of various purposes, including information-measuring system, control systems, multi-agent systems, etc. A generally accepted way to facilitate understanding of large and complex data sets is to use graph visualization methods. This paper presents a survey of state-of-the-art in the area of graph drawing algorithms based of physical analogies. Various objective functions and algorithms for their optimization are considered. Special attention is paid to recent advances in multi-level algorithms designed for the visualization of graphs of large volume.

## Введение

Методы визуализации информации предназначены для поддержки представлений абстрактных данных, часто очень больших, полу-структурированных или многомерных, не имеющих явной физической интерпретации с целью усиления когнитивных возможностей пользователя. Такого рода визуализации являются частью пользовательского интерфейса информационных систем различного назначения, в том числе информационно-измерительных систем, управляющих систем, мульти-агентных систем и др.

Универсальным средством представления абстрактной информации являются графы. Данная работа посвящена современным алгоритмам визуализации, основанным на физических аналогиях. Рассматриваются различные целевые функции, алгоритмы для их оптимизации и структуры данных, позволяющие повысить эффективность вычислений. Особое внимание уделено последним достижениям в области многоуровневых алгоритмов, предназначенных для визуализации графов большого объема, содержащих десятки тысяч вершин.

Наиболее гибкие алгоритмы, позволяющие строить изображения простых неориентированных графов относятся к группе *силовых* алгоритмов, известных также под названием *пружинных*. Эти методы очень популярны по следующим причинам: они очень интуитивны, и пригодны для построения изображения графов произвольного вида, их легко понять и запрограммировать, легко настраивать на специфические требования, для графов, имеющих порядка 150 вершин они дают вполне удовлетворительные результаты. Эти изображения выглядят эстетично, отражают симметрию данных и, если это возможно, не содержат пересечений ребер. Основу любого силового алгоритма составляют две компоненты:

1) модель, описывающая систему из физических объектов (соответствующих вершинам и ребрам графа);
2) алгоритм, который (приблизительно) вычисляет состояние равновесия для этой системы.

Описание модели строится на основе представлений о том, какое изображение можно считать хорошим в каждом конкретном случае. С моделью связывается целевая функция, описывающая конкретное понятие хорошего изображения, а алгоритм служит для оптимизации целевой функции.

## 1 Базовые силовые алгоритмы

Первый «пружинный» алгоритм, предназначенный для визуализации графов, был предложен P. Eades [1] в 1984 году, и размещал графы G = (V, E), имевшие до 30 вершин. Вершины графа G рассматривались как стальные шары, соединенные пружинами. Позиция каждой вершины $v \in V$, описывалась вектором $p_v$. Требовалось получить как можно более симметричное изображение, в котором все вершины, связанные ребром, располагаются на одинаковом расстоянии, задаваемом «идеальной» длиной ребра. В модели [1] считается, что на каждую пару вершин, связанных ребром, действует *сила пружины*, вычисляемая по формуле:

$$f_{spring}(p_u, p_v) = c_{spring} \log \frac{\| p_u - p_v \|}{l} \overrightarrow{p_v p_u},$$

где $l$ соответствует "идеальной длине» пружины,
$c_{spring}$ - настроечный коэффициент, управляющий «силой» пружины.
На каждую пару не-смежных вершин действует *сила отталкивания* :

$$f_{rep}(p_u, p_v) = \frac{c_{rep}}{\| p_v - p_u \|^2} \overrightarrow{p_u p_v}$$ , где $c_{rep}$ - настроечный коэффициент.

Для поиска положения равновесия этой системы шаров и пружин используется следующая процедура:

**SPRING**($G(V, E)$){
    Разместить вершины графа $G(V, E)$){в случайные позиции
    Повторять $M$ раз{
        Вычислить силу $F_v(t)$, действующую на каждую вершину $v$
        Сместить вершину в направлении действия силы на величину $\delta F_v(t)$
    }
}

В 1991году появился алгоритм Fruchterman-Reingold [2], который добавил требование *равномерного распределения вершин»* и немного модифицировал силы, действующие на вершины. Для получения равномерного распределения идеальная длина пружины вычисляется по формуле $l = \sqrt{\frac{area}{numberofvertices}}$ Силы отталкивания действуют между **каждой** парой вершин по формуле: $f_{rep}(p_u, p_v) = \frac{l^2}{\| p_u - p_v \|} \overrightarrow{p_u p_v}$ **для всех (u, v)∈V.**

Силы притяжения действуют только между **смежными** вершинами:

$$f_{attr}(p_u, p_v) = \frac{\| p_u - p_v \|^2}{l} \overrightarrow{p_v p_u}$$

Еще один взгляд на то, что считать хорошим размещением был предложен в 1989 году в работе T. Kamada и S. Kawai[3]. Было предложено считать, что каждая пара вершин в графе связана пружиной, идеальная длина которой равна кратчайшему расстоянию между вершинами *в графе*. Потенциальная энергия такой системы, состоящей из $n(n\text{-}1)/2$ пружин для заданного размещения $p$ должна соответствовать разнице между Евклидовым расстоянием и расстоянием в графе и определяться по формуле: $E_{KK} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \frac{1}{2} k_{ij} (| p_i - p_j | - l_{ij})^2$, где $l_{ij}$ соответству-

ет идеальной длине пружины, соединяющей вершины $i$ и $j$. Сила пружины между вершинами $i$ и $j$ вычисляется как $k_{ij}= K/d^2_{ij}$ , где $K$- это константа, а $d_{ij}$- расстояние между вершинами $i$ и $j$ в графе $G(V, E)$. Требуется найти такие значения переменных, которые минимизируют функцию энергии $E(x_1, x_2,..., x_n, y_1, y_2, \dots , y_n)$. Поскольку известно, что в локальном минимуме все частные производные равны 0, это соответствует решению $2n$ нелинейных уравнений. Итеративный метод находит вершину с наибольшим градиентом и смещает ее, в то время как позиции всех остальных вершин зафиксированы. Алгоритм останавливается, когда размер градиента оказывается ниже порогового значения.

Тестирование вышеперечисленных базовых алгоритмов показало, что все они генерировали приемлемые размещения для графов имевших менее 180 вершин достаточно быстро, но давали абсолютно неприемлемые результаты и время вычислений для графов, содержавших несколько тысяч вершин. Поэтому возникла необходимость в методах, позволяющих изображать графы большого объема. Наиболее затратным по времени шагом силовых алгоритмов является вычисление сил отталкивания, действующих между всеми парами вершин и требующих времени вычислений не менее $O(N^2)$. Способ ускорения таких вычислений уже давно известен в физике под названием метода Barnes-Hut[4]. Метод применялся в астрофизике и описан в терминах небесных тел. На рисунке 1 показана основная идея этого метода.

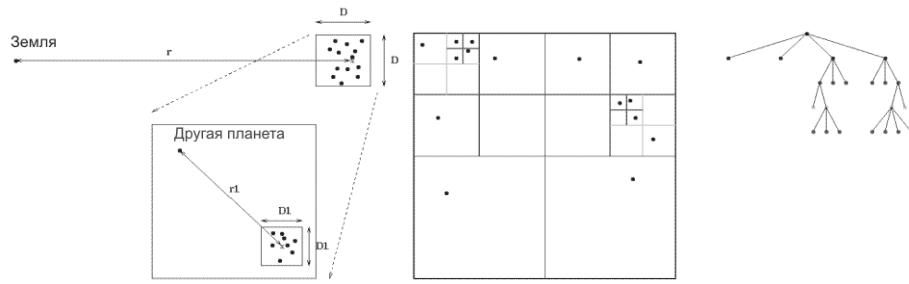



Рисунок 1– (а) Аппроксимация сил отталкивания и (б) структура квадро-дерева

Предположим, мы хотим вычислить силу гравитации, действующую на планету Земля под влиянием небесных тел, находящихся в туманности Андромеды. Если размер области, в которой расположены эти небесные тела, невелик по сравнению с расстоянием до Земли, то суммарную силу, действующую со стороны всех небесных тел, можно аппроксимировать силой, действующей из центра масс и пропорциональной массе всех небесных тел. Новизна идеи состоит в том, что эту аппроксимацию можно применять рекурсивно. То есть влияние силы гравитации на некоторое небесное тело, расположенное в Туманности Андромеды, со стороны остальных небесных тел Туманности Андромеды можно вычислять по аналогичному принципу. Разумный выбор группы небесных тел, действующих на тело $v$, осуществляется при помощи пространственной структуры данных, называемой quadtree (квадро-дерево). Для построения квадро-дерева область размещения графа рекурсивно разбивается на 4 квадранта и каждому квадранту сопоставляется узел квадро-дерева. Если квадрант содержит несколько вершин графа, то он далее разбивается на 4 квадранта. Процесс останавливается, когда каждый квадрант содержит ровно одну вершину исходного графа $G$.

Общая схема применения метода Barnes-Hut:

1) Построить дерево квадрантов.
2) Для каждого квадранта дерева вычислить центр масс и сумму всех частиц, находящихся в данном квадранте.
3) Просмотром дерева от корня к листьям вычислить силу, действующую на каждую частицу.

Для визуализации графов этот метод впервые был использован в системе под названием FADE [5]. В работе [6] описан вариант метода FADE, строящий рекурсивную диаграмму Вороного вместо квадро-дерева, и имеющий сложность $O(|V^2|)$.

## 2 Многоуровневые силовые алгоритмы

Помимо квадратичного времени вычислений сил отталкивания, еще одной важной проблемой силовых алгоритмов является то, что если начинать со случайного начального размещения, для больших графов требуется много итераций для получения конфигурации локального минимума. Поэтому для быстрого получения хорошего результата желательно иметь хорошее начальное размещение. Эту проблему решает *многоуровневый* подход к размещению. Первый многоуровневый силовой алгоритм, хорошо размещавший графы, имеющие более 1000 вершин, появился в 1999 году [7]. В нем была предложена двухфазная модель многоуровневого алгоритма.

1) *Фаза огрубления*, начиная с исходного графа $G = G_0$, генерирует последовательность графов $G_0, G_1, \ldots, G_k$ убывающего размера. При этом граф $G_{i+1}$ связан с графом $G_i$ для $i = 0, \ldots, k-1$ так, что граф $G_{i+1}$ на (*мульти) уровне* или *уровне уточнения* $i + 1$ может рассматриваться как грубое представление более тонкого графа $G_i$ на мультиуровне $i$.
2) В *фазе уточнения* применяется силовой одноуровневый алгоритм для того, чтобы получить изображение самого грубого графа $G_k$. Затем размещение самого грубого графа $G_i$ используется для того, чтобы получить начальное размещение более тонкого графа $G_{i-1}$, для $i = 1, \ldots, k$. Это начальное размещение $G_{i-1}$ улучшается при помощи одноуровневого силового алгоритма, который уже был использован для построения изображения $G_k$. На самом нижнем мультиуровне строится изображение графа $G = G_0$.

Простая улучшенная версия алгоритма [7] была предложена в работе [8]. Алгоритм [8] применялся для построения изображения связных, не взвешенных графов. Для построения последовательности грубых графов, используется алгоритм, который ищет приближенное решение *NP*-трудной проблемы *k*-центров. Оптимизационная цель этой проблемы – определить подмножество $S \subset V$ размера $k$ в графе $G = (V, E)$ минимизирующее значение $\max_{v \in V} \min_{s \in S} \text{dist}(s, v)$. Множество вершин $V_i$ графа $G_i$ в последовательности $G_0,\ldots,G_k$ определяется приближенным решением проблемы $k_i$-центров для графа $G$, так что $k_i = cx^{k-i}$, где $x > 1$ и $c = /V_k/$- это константа для всех $i \in \{1, \ldots - 1\}$. На каждом уровне создается кластер вершин, расположенных наиболее близко к каждому центру. В качестве одноуровневого силового алгоритма используется модификация алгоритма Kamada-Kawai [3]. Для ускорения вычислений функция энергии Kamada-Kawai, связанная с графом $G_i$ , $i \in \{0, \ldots, k-1\}$, модифицирована, так что она вычисляется не по всем парам вершин, а только в окрестности радиуса $c_i$ множества вершин $V_i$:

$$E_{HK}(p(V_i)) = \sum_{v \in V_i} \sum_{u \in N^{c_i}(v)} \left( \frac{\| p_v - p_u \| - l \cdot dist(u,v)}{dist(u,v)} \right)^2 .$$

$p(V_i) = (p_v)_{v \in Vi}$ - это размещение вершин графа $G_i$, $l$- идеальная длина ребра, а $N_{ci}(v)$ (для правильно выбранного целого $c_i$) - это $c_i$-окрестность вершины $v$, определяемая по формуле:

$N_{ci}(v) = \{u \in V_i \mid 0 \le \text{dist}(u, v) \le c_i\}$. Отличие от оригинальной энергии Kamada-Kawai состоит в том, что рассматриваются только некоторые из $n - 1$ пружин, связанных с вершиной $v$. Harel и Koren утверждают, что асимптотическое время вычислений равно $\theta(|V||E|)$. Поскольку расстояния между всеми парами вершин надо запоминать, память оценивается как $\theta(|V|^2)$. Эксперименты показали, что этот алгоритм строит красивые изображения для графов, содержащих до 15000 вершин быстрее, чем за минуту.

Еще один многоуровневый метод под названием GRIP был предложен в работах [9-10]. В этом методе, фаза огрубления основана на построении *фильтрации максимальных независимых множеств* или *MIS –фильтрации* множества вершин $V$. Авторы определяют MIS-фильтрацию как семейство множеств $\{V = V_0, V_1, \ldots, V_k\}$ таких, что $\varnothing \in V_k \subset V_{k-1} \subset \ldots \subset V_0$. При этом каждое $V_i$, где $i \in \{1, \ldots, k\}$ является максимальным подмножеством $V_{i-1}$, для которого расстояние по графу между каждой парой его элементов равно не менее $2^{i-1} + 1$. Для построения используется следующая процедура: Предположим, независимое множество $V_i$ порядка $i$ уже построено. Для построения $V_{i+1}$ используется вспомогательное множество $V^* = V_i$, из которого набираются элементы $V_{i+1}$. Возьмем случайный элемент $v_0 \in V^*$, и поместим его в $V_{i+1}$. Затем удалим все элементы $V^*$, чье расстояние по графу до $v_0$ меньше или равно $2^i$. Выберем в $V^*$ следующий элемент $v_1$, поместим $v_1$ в $V_{i+1}$ и удалим из $V^*$ выбранную вершину и все вершины, чье расстояние до $v_1$ меньше или равно $2^i$. Повторим этот процесс до тех пор, пока $V^*$ не станет пустым. Пример MIS-фильтрации показан на рисунке 2.

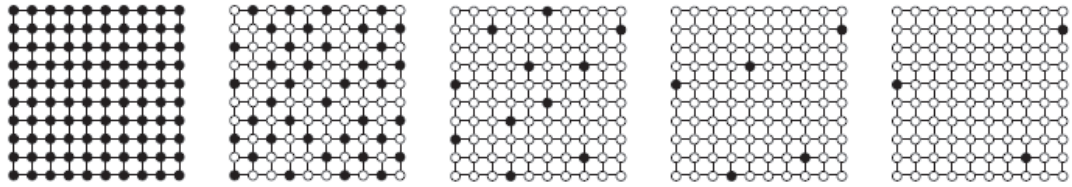


Рисунок 2 – Огрубление графа на основе MIS-фильтрации

В качестве одноуровневого алгоритма они используют метод, похожий на пружинный алгоритм. Сила, действующая на вершину $v \in V_i$ на мультиуровне $i$, определяется как

$$F_{GK}^{i}(v) = \sum_{u \in N_i(v)} \left( \frac{\| p_v - p_u \|}{l^2 \bullet dist(u,v)} - 1 \right)(p_u - p_v)$$

Этот вектор силы похож на тот, что используется в методе Kamada-Kawai[3], но ограничен подмножеством вершин $V_i$ обозначаемым $N_i(v)$. Другой важной особенностью GRIP является то, что он способен размещать вершины в $n$-мерном пространстве $n \geq 2$, изображать граф в этом пространстве, а затем проецировать изображение в два или три измерения. Было доказано, что асимптотическое время работы этого алгоритма (за исключением времени, необходимого для построения MIS –фильтрации) равно $\theta(|V|(\log diam(G)^2))$ для графов с ограниченной максимальной степенью вершины, где $diam(G)$ обозначает диаметр графа $G$.

Еще один, концептуально наиболее простой, но самый быстрый из многоуровневых методов - это метод Walshaw[11], основанный на паросочетаниях. Паросочетание в графе $G = (V, E)$ - это подмножество $M \subseteq E$ такое, что каждая вершина $v \in V$ инцидентна не более чем одному ребру $e \in M$. Чтобы создать более грубый граф $G_{i+1}$ из грубого графа $G_i$ сначала строится максимальное паросочетание при помощи эвристики линейной сложности [12]. Граф $G_i$ копируется в $G_{i+1}$, затем все ребра $e \in M_i$ в $G_{i+1}$ стягиваются в вершины, и из $G_{i+1}$ удаляются кратные ребра. Рисунок 3 показывает пример огрубления. Огрубление продолжается до тех пор, пока в графе не останется всего 2 вершины, а эти две вершины размещаются случайным образом. Одноуровневый алгоритм, используемый для изображения графов $G_i$, является вариацией сеточного варианта Fruchterman- Reingold[2]. Эксперименты показывают, что алгоритм генерирует хорошо структурированные изображения графов, имеющих до 100000 вершин менее чем за 7 минут. Этот алгоритм не очень подходит для изображения графов, содержащих вершины высокой степени.

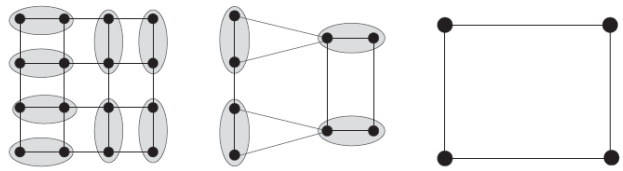
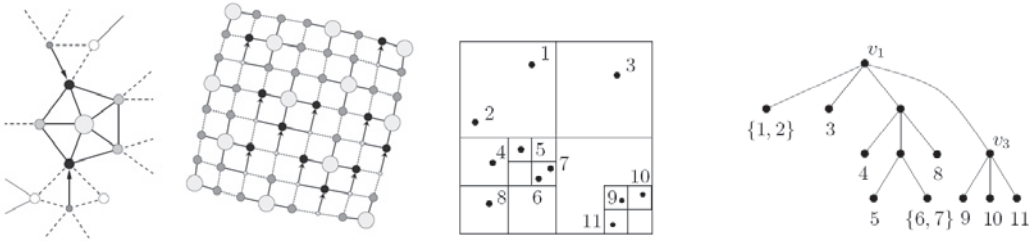


Рисунок 3 – Пример огрубления графа на основе паросочетаний

Несмотря на то, что многоуровневые методы [7-11] строили приемлемые изображения графов, имевших несколько тысяч вершин, ни для одного из них не была доказана субквадратичная оценка сложности. Первый многоуровневый алгоритм для графов общего вида с доказательством того, что в наихудшем случае асимптотическое время вычислений равно $O(N\log N+E)$ был представлен в 2004 году в работе Hashul и Junger[13] под названием Fast Multipole Multilevel Method ($FM^3$). В этом методе граф разбивается на непересекающиеся солнечные системы. Каждая солнечная система стягивается в одну вершину, и процесс повторяется, создавая иерархию огрублений. Солнечная система $S$ содержит одну центральную вершину, называемую солнцем ($s$-node). Каждая из смежных с солнцем вершин называется планетой ($p$-node), она тоже принадлежит этой солнечной системе. Остальные вершины солнечной системы называются лунами ($m$-node), каждая луна находиться на расстоянии 2 по графу до своего солнца. Значит, подграф графа $G$, индуцированный каждой солнечной системой, имеет диаметр не более 4.




(а) (б) (с)

Рисунок 4 – (а) Огрубление графа $G$ (b) (б) галактика, состоящая из 13 солнечных систем (с) разбиение области на квадранты и соответствующее редуцированное дерево с листьями, имеющими емкость 2

Итеративное улучшение размещения на каждом уровне осуществляется алгоритмом, использующим две новых идеи:

1) В качестве физической модели используется многополюсная экспансия [14].
2) Для рекурсивного вычисления сил отталкивания используется редуцированное квадродерево, в котором каждая вершина имеет не менее двух непустых сыновей, а листья могут содержать несколько вершин исходного графа. Редуцированное квадро-дерево имеет только $O(n)$ вершин независимо от распределения частиц, что позволяет реализацию метода линейной сложности для аппроксимации сил отталкивания. Эксперименты по оценке качества размещения, генерируемого методом $FM^3$ [15]показали, что он генерировал изображения, существенно лучшего качества, чем его предшественники.

### 3 Размещение в пространстве высокой размерности

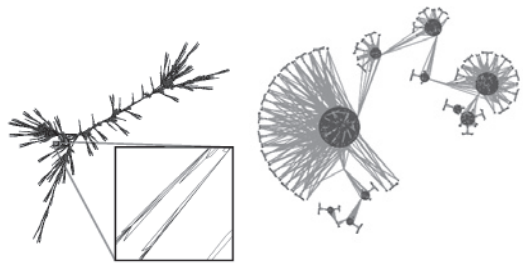
Следует упомянуть еще один очень быстрый метод для изображения не взвешенных графов [16], разработанный Harel и Koren, хотя этот алгоритм и не относится к классу силовых алгоритмов. Метод под названием High-Dimensional Embedding (HDE) использует двухфазный

подход, который сначала строится размещение в векторном пространстве очень большой размерности, а затем осуществляется проекция этого размещения на плоскость. Сначала метод HDE использует алгоритм линейной сложности для приближенного решения задачи $k$ - центров. В [16] использовали фиксированное значение $k = 50$, где $k$ также является размерностью векторного пространства, в котором осуществляется размещение. От каждой из вершин-$k$- центров выполняется поиск в ширину, который выдает $k$- мерные вектора, хранящие расстояния по графу для каждой вершины $v \in V$ до каждого из $k$ центров. Эти вектора интерпретируются как $k$-мерное размещение вершин графа. Затем строится проекция этого многомерного размещения в двумерное или трехмерное пространство.

Практические эксперименты показали, что HDE генерирует изображения для графов, содержащих до $10^6$ вершин менее чем за одну минуту, что существенно быстрее, чем работает любой силовой алгоритм. Качество размещения на графах, с которыми осуществлялось тестирование, часто сравнимо с качеством силовых алгоритмов, хотя авторы замечают, что качество может оказаться хуже, чем у силовых алгоритмов, и что этот алгоритм непригоден для размещения деревьев. Это неудивительно, так позиции вершин в $k$-мерном размещении графа, имеющего точки сочленения, могут совпадать. Наилучшей областью применения для этого метода являются графы, близкие по структуре к сеткам.

## 4 Многоуровневое размещение, учитывающее торологические особенности

Все выше описанные многоуровневые методы используют эвристики, никак не учитывающие топологические особенности изображаемых графов. Эту нишу заполняет метод TopoLayout [17], многоуровневый алгоритм, который изображает неориентированные графы на основе их топологических особенностей. На этапе огрубления выделяются такие подграфы, как деревья, связные компоненты, двусвязные компоненты, полные графы, кластеры, а также графы, пригодные для изображения методом HDE[16]. Эти особенности идентифицируются в графе рекурсивно, и выделенные подграфы стягиваются в вершины, образуя иерархию графов. Каждый подграф изображается при помощи алгоритма, соответствующего его топологии. Работа [17] содержит большое количество экспериментальных данных, указывающих на то, что в случаях, когда изображаемые графы имеют низкоуровневую структуру внутри высокоуровневой, результаты, получаемые при помощи метода TopoLayout, превосходят результаты метода $FM^3$ . Для сравнения на рисунке 5, показаны два изображения 32-разрядного сумматора, содержащего 4960 вершин и 9462 ребра, построенных методом $FM^3$ (а) и методом



(а) (б)

Рисунок 5 –Изображения 32-разрядного сумматора

TopoLayout (б). На наш взгляд, оба изображения недостаточно отражают регулярную структуру этого графа и указывают на необходимость дальнейшего развития.

## Заключение

В данной работе были рассмотрены последние достижения в области визуализации графов, позволяющие строить изображения графов, содержащих десятки и сотни тысяч вершин. Исследования в этой области продолжаются, а нам хотелось бы отметить, что используемые для реализации этих методов структуры данных, подобные квадро-деревьям, создают возможности для параллельной реализации этих методов, и значит, делают их конкурентоспособными при решении современных задач, связанных с анализом данных большого объема.


## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11-07-00388).


## Список литературы


[1] Eades P., A heuristic for graph drawing// Congressus Nutnerantiunt.– 42. – pp. 149–160. – 1984.
[2] Fruchterman T. M. J., Reingold E. M., Graph Drawing by Force-Directed Placemen// Software -Practice and Experience . – Vol. 21, N.11. – pp. 1129-1164. –1991.
[3] Kamada, T., Kawai, S., An algorithm for drawing general undirected graphs, Information Processing Letters,Vol. 31. – pp. 7-15. – 1989.
[4] Barnes J., Hut P., A hierarchical O(N log N) force-calculation algorithm. Nature, 324(4), December 1986.
[5] Quigley J., Eades P.: FADE: Graph Drawing, Clustering, and Visual Abstraction. – 2000.
[6] Pulo K. J. Recursive Space Decomposition in Force-Directed Graph Drawing Algorithms. // Australian Symposium on Information Visualization, volume 9, pp. 95–102, 2001.
[7] Hadany R., Harel D., A multi-scale algorithm for drawing graphs nicely. // Proceedings of the 25th International Workshop on Graph-Theoretic Concepts in Computer Science (WG ’99) . – LNCS 1665. – pp. 262–277. – 1999.
[8] Harel D., Koren Y., A Fast Multi-scale Method for Drawing Large Graphs. //J. Marks, editor, GD‘2000, LNCS 1984. – pp. 183–196. – 2001.
[9] Gajer P., Kobourov S., GRIP: Graph Drawing with Intelligent Placement.// J. Marks, editor, GD‘2000, LNCS 1984.– pp. 222–228.– 2001.
[10] Gajer P., Goodrich M., Kobourov S. A Multi-dimensional Approach to Force-Directed Layouts of Large Graphs.// J. Marks, editor, GD‘2000, LNCS 1984. – pp. 211–221. – 2001.
[11] Walshaw C., A Multilevel Algorithm for Force-Directed Graph Drawing.// J. Marks, editor, GD‘2000, LNCS 1984. – pp. 171–182. –2001.
[12] Hendrickson B . Leland R. A multilevel algorithm for partitioning graphs.//S.Karin, editor, Proc. Supercomputing '95, San Diego. ACM Press, New York. – 1995.
[13] Hachul S., Junger M. Drawing Large Graphs with a Potential-Field-Based Multilevel Algorithm. // GD’2004. – LNCS 3383. – pp. 285–295. 2005.
[14] Aluru S., et al. Distribution-Independent Hierarchical Algorithms for the N-body Problem// The Journal of Supercomputing. – Vol. 12, Issue 4. – pp.303-323. – 1998.
[15] Hachul S., Junger M. An experimental comparison of fast algorithms for drawing general large graphs// LNCS 3843. – pp. 235–250. – 2006.
[16] Harel D., Koren Y, High-Dimensional Embedding// JGAA, 8(2). – pp. 195–214. – 2004.
[17] Archambault D., Munzner T., Auber D. TopoLayout: Multi-Level Graph Layout by Topological Features //IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics.– N.13.– pp. 305–317.– 2007.

# АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ JAVA-АППЛЕТОВ ДЛЯ ГРАФИЧЕСКОГО ОТОБРАЖЕНИЯ WEB-ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОНТОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

**С.В. Смирнов[1], А.А. Антропов[2]**

[1]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

[2]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» – Нижний Новгород
603155, Нижний Новгород, ул. Б. Печерская, 25/12, Россия
antropov@sandy.ru
тел: +7 (910) 387-93-37

***Ключевые слова:*** *онтологии, сетевые модели, java, applet, графический web-интерфейс*

**Abstract**
This article analyzes Java applets usage in case of ontological graphical web visualization. It compares different approaches to creation of web-representations and step by step creates Java-applet based on “Higher school of economics University” organizational structure.

## Введение

Актуальный тренд последнего десятилетия обнаруживается в применении для представления данных и знаний онтологических моделей - явных описаний понятий предметной области и отношений между ними. Онтология - общий термин, включивший в себя многие понятийные структуры: тезаурусы, иерархии классов в объектно-ориентированном программировании, концептуальные карты, семантические сети и др. [1, 2].

Интуитивной сферой приложения подобного подхода является создание сетевых инфологических моделей, отображающих набор концептов заданной предметной области и связей между ними, а также создающих при помощи современных технологий удобное представление-визуализацию с навигацией по сети, с отображением скрытых параметров объектов и связей, выполнение информационного поиска и т.п. [3, 4].

В рамках этой проблематики в предыдущей работе авторов была предложена архитектура программной системы, обеспечивающей web-представление онтологических моделей [5]. При этом для хранения онтологических спецификаций был использован формат *GraphML*, а для создания графического web-представления библиотека *flare* и технология *Flash*. Предметной областью работы стала организационная структура нижегородского филиала НИУ ГУ ВШЭ.

Опыт показал, что с увеличением предметной области - добавлением в онтологию новых классов и отношений – обостряется проблема производительности, обеспечиваемой *Flash*. Когда количество сущностей модели (вершин на графе) приблизилось к 5000, время загрузки визуального образа сети превысило минуту, что недопустимо для комфортной работы с онтологией. Поэтому было принято решение отказаться от технологии *Flash* в пользу более «скоростных» решений. В качестве альтернатив были рассмотрены два варианта: создание *Java-апплета* и развертка web-приложения с помощь инструментальных систем *Ruby on Rails* или *Django* (*Python*), - все эти технологии способны обеспечить более высокую производительность, чем использованный ранее *Flash*. Два фактора - очень простая имплементация апплета по сравнению с запуском web-приложения на сервере и широчайшая распространенность - склонили выбор в пользу решения на основе языка Java.

## 1 Выбор Java-библиотеки

Понимание задач проектируемого web-приложения позволяет сформулировать следующие требования к библиотекам:

- возможность использования в Java-апплетах;
- обладание встроенным парсером GraphML-файлов;
- возможность создания из GraphML-файлов динамически модифицируемых представлений графов;
- пригодность для графического представления уже созданных онтологических моделей;
- бесплатное распространение;
- наличие вменяемой документации.

Несмотря на широкое распространение языка Java и весьма активном и развитом Java-коммьюнити, библиотек-кандидатов оказалось всего лишь четыре: *JGraphX*, *Java Universal Network/Graph Framework* (JUNG), *Graph INterface librarY* (GINY) и *prefuse* [6-9].

В таблице 1 приведены характеристики этих библиотек с точки зрения выдвинутых к ним требований: «+» - удовлетворяет; «-» - не удовлетворяет; «+/-» - удовлетворяет частично.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика соответствия Java-библиотек требованиям проекта

| Библиотека / Требование | JGraphX | JUNG | GINY | prefuse |
|---|---|---|---|---|
| Возможность использования при создании Java-апплета | + | + | + | + |
| Наличие парсера для GraphML | + | + | +/- | + |
| Возможность создания динамически модифицируемых представлений графов | + | + | + | + |
| Распространение под бесплатной лицензией | +/- | + | + | + |
| Наличие документации/руководства пользователя | +/- | +/- | - | + |

JGraphX (JGraph 6) является бесплатной частью большого программного пакета JGraph, который состоит из собственно JGraphX - основанной на *Swing* [10] свободно распространяемой графической библиотеки, и платного JavaScript-компонента *mxGraph*, ответственного за визуализацию данных [6]. Главным плюсом данного решения является то, что в силу прямой связи с платным пакетом он активно развивается и поддерживается разработчиками. Последнее обновления пакета произошло буквально на момент написания статьи, в год же разработчиками выпускаются десятки апдейтов. Но данное преимущество прямо связано и с минусами, в частности, документационная поддержка осуществляется в основном для платной части проекта, и в желании использовать JGraphX разработчик по большей предоставлен сам себе, а из руководств пользователя доступны лишь несколько примеров.

Java Universal Network/Graph Framework (JUNG) распространяется под BSD-лицензией, обеспечивает всю необходимую функциональность по парсингу GraphML-файлов, имеет большой набор встроенных методов по обработке, анализу и визуализации графов [7]. В отличие от предыдущей библиотеки, JUNG – это самостоятельный продукт, в полной мере обеспечивающий требуемую нашему проекту функциональность. Более того на сайте предоставлены наглядные примеры апплетов по всем типам визуализаций. К недостаткам можно отнести отсутствие текстового описания классов, логики построения приложений, а также то, что проект давно не обновлялся - последняя версия вышла более двух лет назад, в январе 2010 года.

Graph INterface librarY (GINY) на своей домашней странице довольно громко заявляет, что эта библиотека призвана собрать все лучшие черты среди решений по графической визуализации и избежать имеющихся в них ошибок [8]. Однако вся документация ограничивается

интерфейсом программирования приложений (API), разбор которого теоретически возможен, но практически в плане временных затрат вряд ли разумен.

Библиотека prefuse по функциональности похожа на JUNG. Однако, во-первых, она отличается более богатыми возможностями для графических представлений за счет тонкого использования технологии Java2D [9]. Во-вторых, данная библиотека обладает пошаговым руководством, которое позволяет разобраться в принципах использования ее классов и методов. К сожалению, исчерпывающим данное руководство назвать нельзя, однако, в более сложных случаях на помощь разработчику приходит довольно большой форум, посвященный данной библиотеке. С 2008 года prefuse перестала разрабатываться, и была выложена в общий доступ на сервисе совместной разработки *github*, где благодаря активности программистского сообщества до сих пор исправляются ошибки и недочеты библиотеки. Последнее обновление датируется мартом 2012 года.

В результате сравнения вышеперечисленных программных средств между собой, а также оценивания сравнивавшихся библиотек на соответствие задачам проекта в качестве перспективного средства визуализации была выбрана библиотека prefuse, ключевыми аргументами в пользу которой стали богатая функциональность и максимальная степень подробности документации среди всех конкурентов.

## 2 Архитектура библиотеки prefuse и ее возможности применительно к проекту по web-визуализации онтологических моделей

Логика prefuse основывается на модели визуализации информации, разработанной Эдом Чи в 1999 году [11]. Согласно предложенной концепции процесс визуализации разбивается на несколько дискретных шагов, начиная со сбора и моделирования данных до создания их интерактивной презентации. Общая схема этого процесса применительно к нашему проекту представлена на рисунке 1.

Рисунок 1 – Схема процесса визуализации с помощью библиотеки prefuse

Исходные данные, описывающие онтологическую модель, считываются в память приложения, где на их основе создается экземпляр класса **prefuse.data.Graph**. Данный класс позволяет осуществлять не только редактирование модели, но и необходим для дальнейшей передачи данных в класс визуализации. Класс **prefuse.Visualisation** отвечает за визуальную абстракцию данных, моделируя такие свойства как размещение, цвет и геометрию отображения. На основе полученной абстракции, при помощи методов класса **prefuse.Display** создается непосредственно интерактивное представление данных, с которым взаимодействует пользователь.

Рассмотрим представленные на рисунке 1 шаги несколько более подробно.

- Первый шаг – получение исходных данных из файла. В нашем случае при помощи метода **readGraph()** класса **prefuse.data.io.GraphMLReader** считывается семантическая сеть из файла формата GraphML.
- Следующий шаг - обработка входной информации и преобразование ее в так называемые «таблицы данных», являющиеся сущностями внутреннего представления информации. Для нас это лишь объявление экземпляра класса **prefuse.data.Graph** на основе прочитанного файла, но в общем случае это действие может заключать в себе любое количество чтений входящих файлов с последующими преобразованиями. Классы **prefuse.data.Node** и **prefuse.data.Edge** представляют собой сущности-члены загруженной модели.

- Полученная на предыдущем шаге структура данных – предмет создаваемой на третьем шаге визуальной абстракции графического представления **prefuse.Visualisation**, которая задает расположение образов сетевой модели в пространстве, их цвета, размеры и формы.
- Фактическое отображение данных графического представления представляет собой создание вида данных и переход от одного вида к другому. Видом данных (класс **prefuse.Display**) называются отображаемые в данный момент данные с учетом всех примененных и активных фильтров.
- Пользователь, взаимодействуя с визуализацией (через предоставленные ему контроллеры - сущности класса **prefuse.controls.Control**), может внести изменения на любом этапе создания графического отображения, начиная с изменения файла входных данных и заканчивая изменением положения образов семантической сети в окне её отображения.
- Наконец, измененная модель при необходимости может быть вновь сохранена в файл на физический носитель данных. Очевидно, что необязательно, чтобы формат входных и выходных данных был одинаков; в качестве форматов вывода prefuse поддерживает не только GraphML, но и CSV, TreeML или SQL для сохранения модели в базу данных.

Порядок, описанный выше, довольно схож с известным шаблоном проектирования архитектуры графических приложений «модель-вид-контроллер», согласно которому графический пользовательский интерфейс разбивается на три части:

- модель, содержащую данные;
- один, или несколько видов, отображающих содержимое модели;
- контроллер, обрабатывающий входные данные и соответствующим образом обновляющий модель и вид.

Модель информационной визуализации расширяет этот шаблон проектирования, добавляя один дополнительный уровень. Таблицы данных служат основой модели данных, которая обеспечивает создание любого количества визуализаций, внутри которых визуальная абстракция служит дополнительно определенной для каждой визуализации моделью своих собственных видов и контроллеров.

Такая программная модель может быть с легкостью представлена в виде Java-апплета и размещена в интернете. Для этого при создании приложения необходимо провести наследование от класса **prefuse.util.ui.JPrefuseApplet** и скомпилировать его, затем все необходимые библиотеки поместить в jar-архив, размещая его на html-странице.

## 3 Реализация Java-апплета

Приложение для web-визуализации онтологических моделей, разработанное согласно представленным в разделе 2 положениям, размещено по адресу web-ontology.ru [12].

На рисунке 2, продемонстрирован вид апплета в окне браузера. Окно визуализации разделяется на две части. В левой отображается текущее представление (на скриншоте это наиболее общее понятие рассматриваемой предметной области – концепт «НИУ ГУ ВШЭ», и входящие в него факультеты), а в правой можно наблюдать контроллеры модели, регулирующие расстояние между сущностями, количество уровней сущностей, которое будет отображаться, считая от выбранной и т.п.

## Заключение

В статье проанализированы средства для создания web-ориентированной графической визуализации онтологических моделей и представлен прототип соответствующего приложения.

Основные результаты работы, имеющие научное и практическое значение:

- разработка архитектуры системы визуализации онтологических моделей;

- сравнительный анализ существующих Java-библиотек и выбор подходящей для реализации проекта;
- создание прототипа системы web-представления онтологических моделей и ее апробация на модели значительного объема.

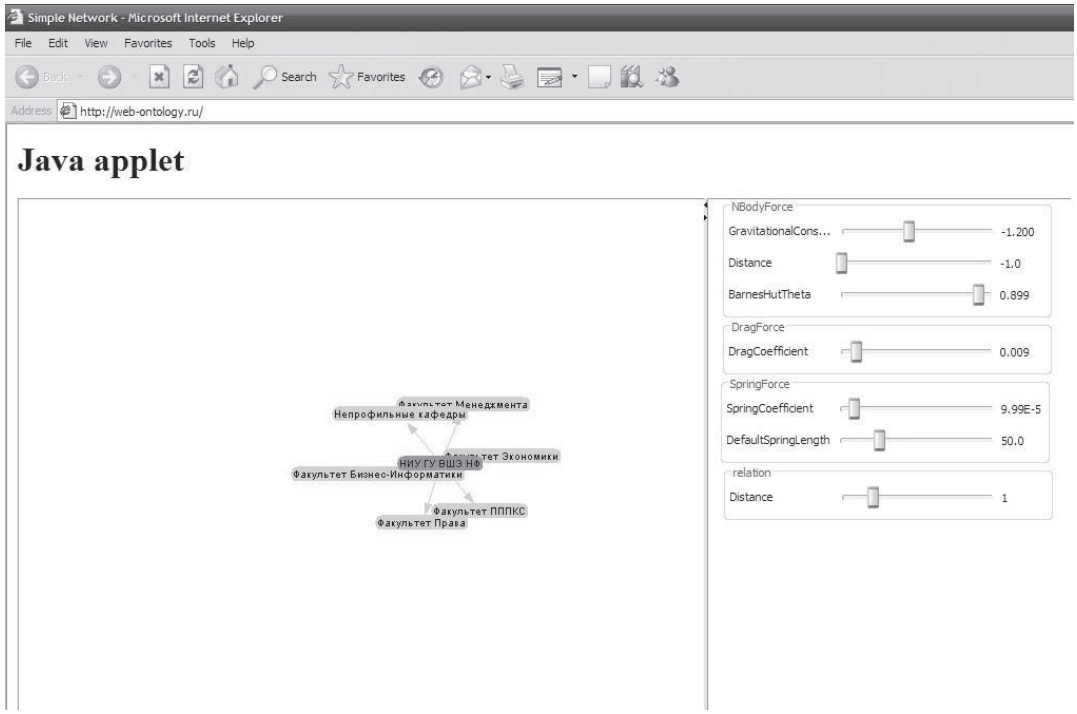



Рисунок 2 – Вид созданной визуализации онтологической модели в окне браузера

**Список литературы**


[1] Кузнецов О.П., Суховеров В.С., Шипилина Л.Б. Онтологии в современных информационных системах // Датчики и системы. 2011. №8. С. 67-77.

[2] Лукашевич Н.В. Тезаурусы в задачах информационного поиска. – М.: Изд-во Московского университета, 2011.

[3] Katifori A., Halatsis C., Lepouras G., Vassilakis C., Giannopoulou E. Ontology visualization methods – a survey // ACM Computing Surveys (CSUR). 2007. Vol. 39. No. 4. Article 10, pp. 1-38.

[4] Смирнов С.В. Прагматика онтологий: объектно-ориентированная модель знаний о предметной области // Одиннадцатая Национальная конф. по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2008 (28 сентября-03 октября 2008 г., Дубна, Россия): Труды конф. Т. 3. – М.: ЛЕНАНД, 2008. - С. 208-216.

[5] Антропов А.А., Смирнов С.В. Подход к разработке системы для web-представления онтологических моделей // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIII международной конф. (15-17 июня 2011 г., Самара, Россия). – Самара: СамНЦ РАН, 2011. - С. 566-570.

[6] http://www.jgraph.com

[7] http://jung.sourceforge.net/index.html

[8] http://csbi.sourceforge.net/index.html

[9] http://prefuse.org

[10] http://ru.wikipedia.org/wiki/Swing

[11] Chi E.H. A Framework for Information Visualization Spreadsheets // Ph.D. Thesis. University of Minnesota, Computer Science Department, 1999.

[12] http://www.web-ontology.ru

# ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ОБОЗРЕВАТЕЛЯ ОНТОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

**С.В. Смирнов, Е.Г. Суворова**

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:*** *онтологическая модель, визуализация графов, метод «фокус-контекст», формирование изображения*

**Abstract**

In this article the Ontological models browser – a component of "*gB*-system" modeling toolset, being developed in ICCS of RAS, is considered. Representation of model is carried out with use of graphs, forms and "sheets of an extended description" for objects. Possible variants of objects coordination on the screen are analyzed. Original display organization of model is grounded on a method "focus-context". The algorithm of model imaging is submitted.

## Введение

Более десятилетия разработки ИПУСС РАН в области информационного моделирования слабоформализуемых предметных областей опираются на инструментарий *общецелевой системы объектно-ориентированного моделирования gB*[1] [1]. Однако, несмотря на то, что совершенствование этого инструментария де-факто является долгосрочным наукоемким проектом лаборатории анализа и моделирования сложных систем ИПУСС РАН, сведения, *прямо* освящающие эволюцию архитектуры и развитие *gB* как программно-технической системы, практически не публиковались[2].

Начало исправлению этой ситуации положила статья [4], в которой номинально рассматривался частный вопрос улучшения интерфейса одной из компонент *gB*-системы, но фактически продемонстрирован общий вектор движения проекта:

- система строится на *массовой вычислительной платформе* как надстройка популярного приложения *Excel* MS Office, располагая всеми возможностями этого приложения, и по существу представляет собой специальное объектно-ориентированное расширение базовой системы программирования MS Office – *Visual Basic for Application*, эмулирующее объектно-ориентированную СУБД на таблично-реляционном остове *Excel*;
- система формируется как *совокупность специализированных интерактивных приложений*, создаваемых по единому шаблону, когда каждое приложение – денотативная модель («экземплификация») предметной области приложений, описываемой онтологией «Решатели задач» [1];
- интерфейс системы ориентируется на представление знаний *графами* и реализацию соответствующих методов манипулирования онтологическими моделями [5-7].

[1] *gB* – сокращение от *«good Base»* что, в свою очередь, можно рассматривать как акроним от *«graceful object-oriented data Base»*. Отправным же пунктом для именования системы была мысль о создании *«хорошей основы»,* и *«good Base»* - соответствующая английская калька.

[2] Например, в [2] и ряде других работ, где представлялись онтологические модели, разработанные с применением *gB*, кратко описывались некоторые *элементы управления gB*-редактора моделей. В [3] без явной привязки к *gB* анализировались прагматически ориентированная объектно-ориентированная модель знаний о предметной области.

На сегодня наиболее продвинутым компонентом-приложением в *gB*-системе является *Обозреватель моделей*, осуществляющий визуализацию онтологических моделей и навигацию по информационному пространству моделей в режиме просмотра. В этой разработке воплощен ряд оригинальных идей и методов, не уступающих функционально близким решениям в известных инструментах с графическими средствами редактирования и просмотра онтологий – OntoEdit, Protégé, WebODE, WebOnto [8]. Это побудило продолжить начатое в [3] представление основных принципов реализации Обозревателя моделей *gB*-системы.

## 1 Представление онтологических моделей графами, формами и листами расширенного описания

Представление знаний вообще и онтологических моделей в частности на основе формализма графов – прием весьма распространенный и признанный вполне адекватным [5, 6]. Вершины графа в таком случае соответствуют *понятиям* (классам) или же единицам объема понятий – *объектам*, а дуги – разнообразным *бинарным отношениям*[3], описывающим связи между объектами моделируемой предметной области. Такое представление хорошо известно как *семантическая сеть*, относящаяся к одной из основных машинных моделей представления знаний [8].

Обозреватель моделей *gB*-системы использует именно этот подход к отображению онтологических моделей на экране компьютера. При этом наряду с объектами и их связями выводимый на экран граф обогащается вершинами-*псевдообъектами* и дугами-*псевдосвязями*:

- при отображении некоторой модели псевдообъекты представляют в ней, во-первых, *объекты других моделей*, определенным образом связанные с данной моделью (псевдообъекты-классы, псевдообъекты-лица [2] и др.), а, во-вторых, – *атрибуты объектов* данной модели;
- главная функция псевдосвязей – отмечать отношения объектов данной модели с псевдообъектами, а в онтологиях – визуализировать *структурные отношения* между классами объектов [3].

Дополнительно для просмотра специфических атрибутов объектов в Обозревателе моделей применяются *формы*:

- с их помощью организуется последовательный доступ к элементам статических и динамических атрибутов-*массивов*, которыми снабжаются объекты;
- они используются и для просмотра *VBA-кода* демонов и методов, характеризующих данный объект как и всякий другой экземпляр соответствующего класса объектов.

Еще одной, весьма характерной, определяемой потенциалом платформы, на которой реализуется *gB*-система, является возможность атрибутирования любого объекта модели *собственным* рабочим листом *Excel*. Рисунки, тексты, мультимедийные и другие объекты-приложения, располагаемые и внедряемые на таком *листе расширенного описания* (ЛРО) объекта, – широчайшая возможность оригинальной спецификации онтологической модели. Обозреватель моделей позволяет не только предъявлять ЛРО объектов, но и пользоваться внедренными здесь приложениями.

## 2 Координирование положения объектов на экране

На наш взгляд можно выделить *три* базовых способа фиксации положения отдельного объекта на экране компьютера: *абсолютное*, *относительное* и «*ad hoc*»-координирование.

Объект получает *абсолютные координаты* при отображении *всей модели* на, вообще говоря, бесконечном листе, который обозревается на экране с помощью скроллинга и/или масштабирования. Расчет таких абсолютных координат в зависимости от выдвигаемых при ото-

[3] Отношения бо́льшей арности всегда могут быть представлены с помощью бинарных отношений.

бражении модели условий может быть весьма нетривиальной задачей [9]. Поэтому однажды вычисленные координаты объектов, как правило, сохраняются как часть модели и могут использоваться все время, пока модель остается без изменений.

При наличии у онтологических моделей некоторой структурной макроорганизации, например, разбиения объектного пространства на *блоки* [3], отображение модели может производиться путем представления на экране ее *отдельных* макросоставляющих (например, отдельных блоков). Основное достоинство такого подхода – *обозримость* доставляемых фрагментов модели, а проблема *представления связей* отображенных объектов с объектами, которые размещены в *прочих* (не показываемых в данный момент) макросоставляющих модели может быть достаточно эффективно решена [3]. Однако сейчас отмечаем другое: в рассматриваемом случае координаты положения объектов *относительны*, т.к. определяются для каждой макросоставляющей модели независимо. Такие координаты также целесообразно сохранять как часть модели, а их пересчет производится для отдельной макросоставляющей при ее и только ее изменении.

Наконец, можно вообще отказаться от хранения экранных координат объектов в модели, всякий раз рассчитывая положение объектов заново, *по потребности* (*ad hoc*). Конечно, такой способ будет приемлем лишь при малых вычислительных затратах на позиционирование объектов на экране, чего, в свою очередь, можно достичь лишь при *стандартизации* расположения объектов. Роль *области стандартного размещения* должно играть некоторое геометрического многообразие, где помещаются центры фигур объектов. Очевидно, что простейшей подобной областью будет *отрезок* в пределах экрана, но вряд ли такое – «в линию» – расположение объектов позволит в общем случае обеспечить наглядность представления сетевого образа модели. В этом смысле более приемлемы замкнутая ломаная, окружность, эллипс: их использование позволяет более наглядно отобразить межобъектные связи в модели, т.к. в качестве образов связей будут служить визуально хорошо идентифицируемые *хорды*, соединяющие расположенные по контуру объекты.

Комплексное сравнение подходов, в том числе экспериментирование с прототипами Обозревателя моделей с разной организацией координирования объектов при отображении моделей, определило выбор в пользу «*ad hoc*»-координирования объектов по *лежащей в пределах экрана окружности*.

### 3 Организация отображения модели

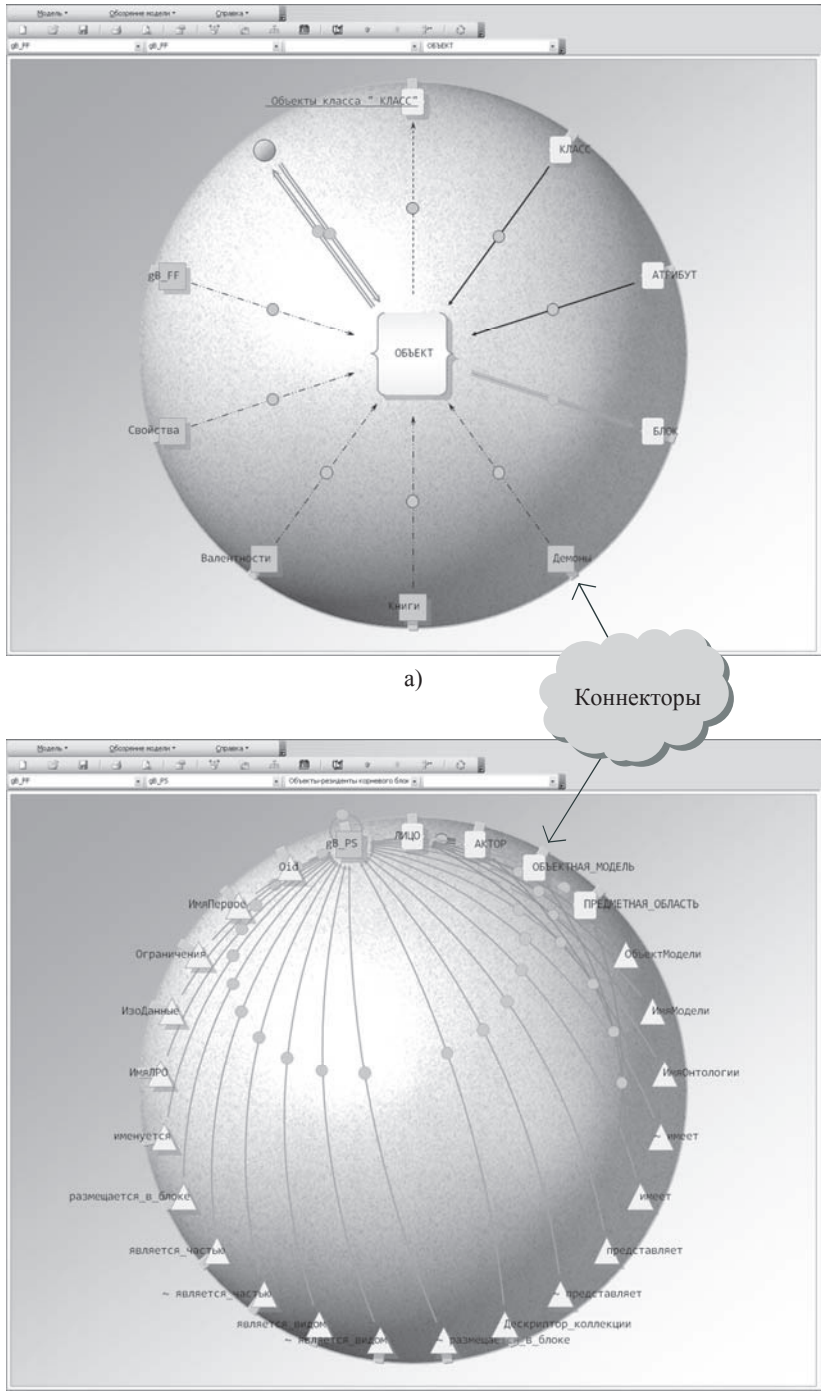
Принципы эффективной организации обозрения онтологических моделей достаточно полно сформулированы в [4], и задача данного раздела дать их краткое изложение.

Формируемое Обозревателем моделей отображение модели на экране компьютера удовлетворяет положениям концепции «*фокус-контекст*», когда с максимальной подробностью предоставляется фокусная часть визуального образа онтологической модели, а для остальной ее части дается упрощенное замещающее изображение.

Для единообразия восприятия в Обозревателе моделей совмещаются *центрально-радиальный метод* отображения фокус-группы, включающей актуальный объект и непосредственно связанные с ним объекты (рисунок 1а), и *круговой метод* для обозрения произвольно отбираемой группы объектов (рисунок 1б). И в том и другом случаях важнейшую когнитивную нагрузку несет *составной образ невидимой части обозреваемой модели* (СОНЧОМ).

СОНЧОМ формируется 3D-фигурой «*Инфоглобус*», которая организует пространство обозрения модели в целом, и *коннекторами* – псевдосвязями присутствующих на экране объектов с невидимыми объектами модели[4].

[4] Строго говоря, это верно лишь для круговой диаграммы обозрения. На центрально-радиальных диаграммах коннекторы «вбирают» в себя и связи между видимыми объектами-смежниками «обозреваемого объекта», располагающегося в центре изображения [4].




а)

б)

Рисунок 1 – Примеры представления онтологических моделей:
а) центрально-радиальная диаграмма с объектом обозрения в центре и смежниками на периферии;
б) круговая диаграмма для обозрения группы объектов

Инфоглобус – шар, на поверхности которого (по «горизонту» и/или в центре его экранной проекции) размещаются образы объектов и соединяющие их маркированные дуги-связи (рисунок 1). При наведении указателя мыши на маркер дуги доставляется наименование изображаемой этой дугой связи объектов.

В отличие от известных способов использования сферической поверхности для размещения и навигации в пространстве объектов, Инфоглобус непрозрачен и обращен к наблюдателю всегда одной стороной. Объекты модели статично не закреплены на поверхности и вначале отображения расположены на *обратной стороне* Инфоглобуса.

Смена фокуса обозрения модели производится по указанию пользователя путем анимированного перемещения объектов по видимой поверхности Инфоглобуса с «восходом» актуализируемых объектов из-за линии «горизонта» и «заходом» неактуальных объектов за линию «горизонта» Инфоглобуса. Финальная картина образуется следующим образом:

- на видимую сторону Инфоглобуса перемещается указанный пользователем (с помощью экранных элементов управления) актуальный фрагмент модели, изображение которого имеет центрально-радиальную или круговую организацию (в зависимости от запрашиваемого пользователем результата: либо отображение интересующего объекта и объектов, связанных с ним непосредственно, либо отображение группы объектов, отобранных каким-либо образом);
- все компоненты модели, не вошедшие в состав актуального фрагмента, располагаются на обратной, невидимой стороне Инфоглобуса;
- имеющиеся связи видимого объекта с невидимыми объектами показываются коннектором, образ которого – неориентированный отрезок прямой, – исходит из образа видимого объекта и «скрывается за горизонтом» Инфоглобуса.

## 4 Алгоритм формирования фокусной части изображения

Обозреватель моделей поддерживает *иллюзию постоянного присутствия на экране всей обозреваемой модели*, но в процессе работы строит соответствующий визуальный образ, изменяя лишь *фокусную часть изображения*. Алгоритм формирования этого изображения приведен на рисунке 2.

*Выбор актуальных объектов* производится одним из трех способов:

- *прямым указанием актуального объекта* (из числа объектов, образы которых присутствуют на экране) с помощью манипулятора «мышь»;
- *командой меню* (в меню разных уровней имеются набор подобных команд);
- в результате работы со *специальной формой*, позволяющей произвольно сформировать актуальный для обозрения набор объектов.

*Формирование образов объектов из фокус-группы* производится одним из двух способов:

- при выборе одного актуального объекта – в варианте для построения центрально-радиальной диаграммы;
- при выборе нескольких актуальных объектов – в варианте для построения круговой диаграммы.

*Формирование образов связей объектов из фокус-группы* производится аналогично:

- при построении центрально-радиальной диаграммы строятся образы связей актуального объекта с его смежниками, а образы связей смежников между собой и невидимыми объектами модели интегрируются коннекторами;
- при построении круговой диаграммы строятся образы всех связей между видимыми объектами, а коннекторы отражают связи этих объектов с невидимыми объектами модели.

В итоге после *вывода образов на экран* фокусная часть визуального образа обозреваемой онтологической модели предстает либо в виде центрально-радиальной, либо круговой диаграммы и, если пользователь не прекращает работу, то процесс повторяется.

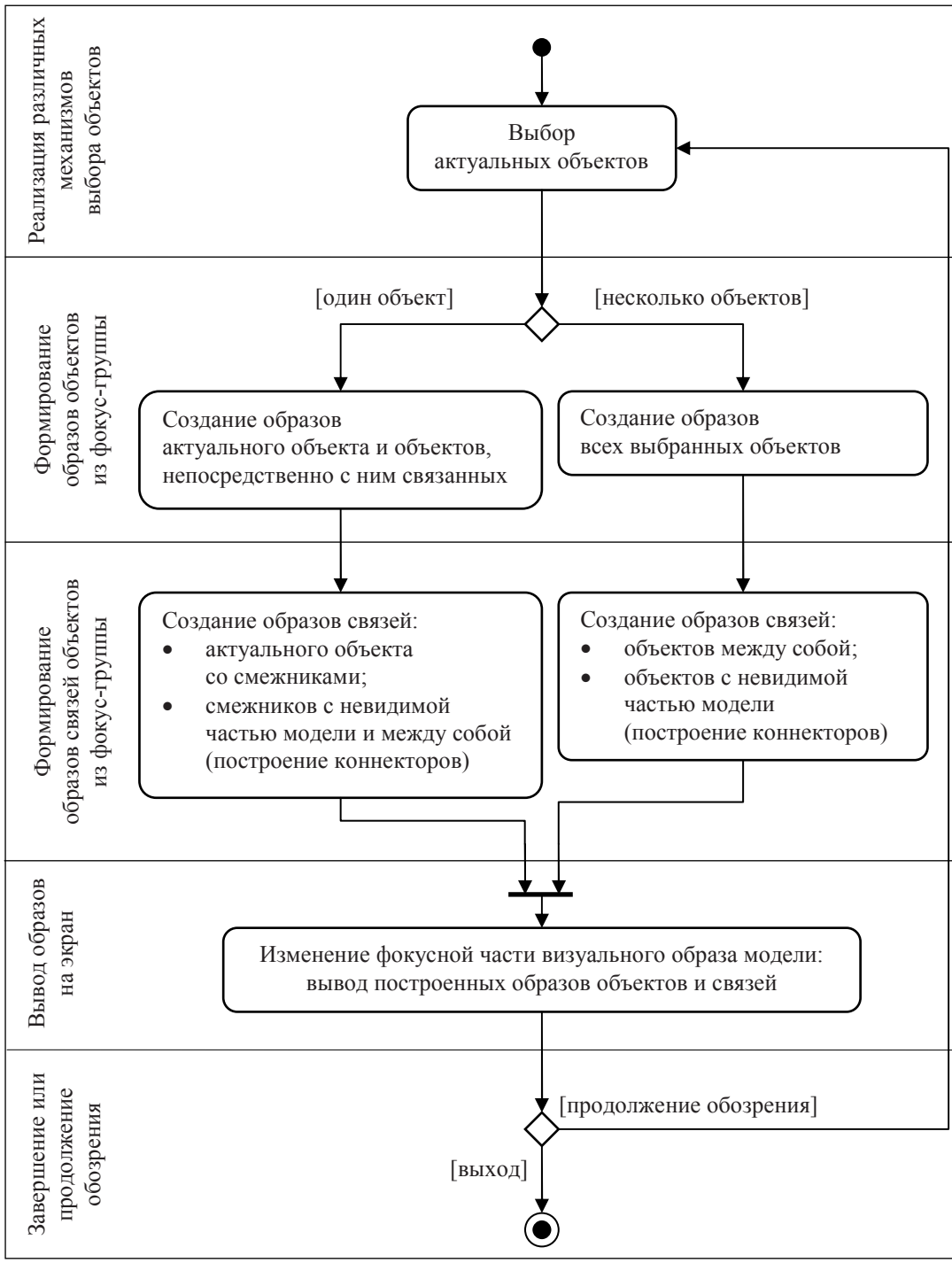



Рисунок 2 – Алгоритм формирования фокусной части визуального образа онтологической модели

**Заключение**

Изложенные вопросы очерчивают в части *отображения онтологических моделей* результаты эволюционного развития и совершенствования Обозревателя моделей – одного из наиболее востребованных интерактивных приложений *gB*-системы моделирования.

За рамками данного сообщения осталась весьма насыщенная тема реализации в Обозревателе моделей *информационного поиска* в онтологических моделях. Некоторые принципы построения системы ответов на запросы о моделях в *gB*-системе рассматривались в [2, 3], в частности: *управление* содержанием поисковых форм *на основе онтологии*, автоматическое формирование *априори определенных запросов* к моделям, возможность сохранения «логической программы» запроса в модели и др. Однако логически цельное и практически выверенное изложение этих вопросов остается *актуальным*.

**Список литературы**


[1] Смирнов С.В. Среда моделирования для построения инженерных теорий // Известия Самарского научного центра РАН. 1999. Т. 1. № 2. - С. 277-285.

[2] Виттих В.А., Ситников П.В., Смирнов С.В. Онтологический подход к построению информационно-логических моделей в процессах управления социальными системами // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. № 5. - С. 45-53.

[3] Смирнов С.В. О модели данных для приложений, основанных на объектно-ориентированном представлении знаний // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды X международной конф. (23-25 июня 2008 г., Самара, Россия). – Самара: СамНЦ РАН, 2008. - С. 529-540.

[4] Смирнов С.В., Суворова Е.Г. Адекватная реализация когнитивного потенциала обозревателя онтологических моделей // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XII международной конф. (21-23 июня 2010 г., Самара, Россия). – Самара: СамНЦ РАН, 2010. - С. 526-533.

[5] Chein M., Mugnier M.-L. Graph-based Knowledge Representation. Computational Foundations of Conceptual Graphs. – Springer, 2009.

[6] Katifori A., Halatsis C., Lepouras G., Vassilakis C., Giannopoulou E. Ontology visualization methods – a survey // ACM Computing Surveys (CSUR). 2007. Vol. 39. No. 4. Article 10. - P. 1-38.

[7] Cuvelier E., Aufaure M.-A. Graph Mining and Communities Detection // Business Intelligence / Lecture Notes in Business Information Processing. 2012. V. 96. - P. 117-138.

[8] Гаврилова Т.А., Муромцев Д.И. Интеллектуальные технологии в менеджменте: инструменты и системы. – СПб.: Изд-во «Высшая школа менеджмента»; Издат. дом СПбГУ, 2008.

[9] Касьянов В.Н., Евстигнеев В.А. Графы в программировании: обработка, визуализация и применение. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003.

# СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО ЭКЗОСКЕЛЕТОННОГО УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ СТЕРЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПРИНЦИПА СИНЕСТЕЗИИ И ОБУЧЕНИЯ

**Д.В. Богомолов[1], В.П. Богомолов[2], А.Е. Никольский[3]**

[1]Королёвский институт управления, экономики и социологии
141070, Московская обл., Королёв, ул. Гагарина, 42, Россия
bogomolov_denis@list.ru
тел: +7 (903) 581-06-48

[2]ЦНИИМаш
141070, Московская обл., Королёв, ул. Пионерская, 4, Россия
тел: +7 (985) 190-51-33

[3]Московский государственный гуманитарно-экономический институт
107150, Москва, ул. Лосиноостровская, 49, Россия
nikae1936@yandex.ru
тел: +7 (495) 160-92-00

***Ключевые слова**: система, управление, экзоскелетон, стереопространство, интерфейс, микроконтроллер, акселерометр, гироскоп, беспроводной канал, программы*

**Abstract**
System remote exoskeletone upravle-nija and control of a condition of difficult systems in raz-lich th environments with use of means stereoskopiche-skih images, a principle cinectezii and training.

## Введение

Необходимость замены труда человека робототехническим устройством антропоморфного типа существует в различных сферах человеческой деятельности: космической, атомной, на химически вредных производствах, при проведении подводных работ, в военном деле, при работе в подземных условиях, в медицине, в сельском хозяйстве, на транспорте, при тушении пожаров, ликвидации природных и техногенных аварий, и т.д.

Во всех выше перечисленных областях человеческой деятельности возникает необходимость дистанционно управлять машинами, органы управления которыми первоначально были рассчитаны на механическое взаимодействие с руками или ногами человека. Робототехнические комплексы данного типа могут управляться оператором дистанционно из пункта управления, вынесенного за пределы места проведения работ, с неудовлетворительными для человека условиями. Роботов предполагается использовать не только в экстремальных условиях, а также при высоких расходах на транспортировку и обеспечение жизнедеятельности человека и при оказании сервисных услуг людям с нарушениями опорно-двигательной функции.

Фактически создается новая человеко-машинная система, допускающую возможность дистанционного управления комплексом на больших расстояниях.

Общая схема системы дистанционного управления и контроля состояния сложных систем показана на рисунке 1.

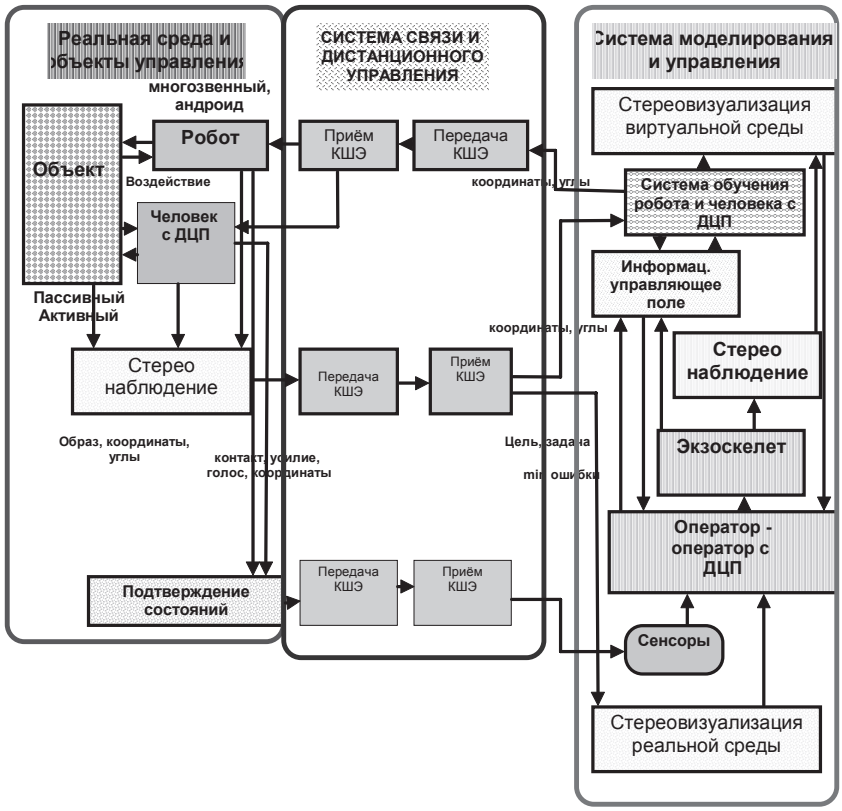



Рисунок 1 – Общая схема системы дистанционного управления и контроля состояния сложных систем

Сложность программного управления робототехническими системами возникает при выполнении сервисно-ремонтных работ, включая аварийно-спасательные, ремонтные работы, обслуживание человека и оборудования. В свою очередь, непосредственное копирование движений оператора создает чрезвычайно напряженный режим его работы, и существенные трудности при дистанционном выполнении высокоточных операций в реальном масштабе времени. Эти трудности в основном связанны с отсутствием полной адекватности между действиями оператора и движениями робота, возникающей при считывании, передаче и обработке управляющих сигналов. Поэтому требуется разработка развитого человеко-машинного интерфейса для выполнения операций и отражения оператору информации о рабочей зоне. Интерфейс должен автоматически распознавать и парировать неадекватности в действиях оператора и робота, а также автономное выполнение ряда операций. Обратное отражение информации о конфигурации робота в пространстве также должно быть комфортным для оператора и давать возможно полное представление о дистанционно выполняемых действиях, обеспечивая супервизорное управление. Отображение видео, тактильной и силомоментной информации из рабочей зоны робота, в совокупности, позволяют эффективно осуществлять работу в слабо формализуемых и недетерминированных средах. В итоге, развитый интерфейс позволяет использовать сильные стороны человека такие, как анализ и интерпретация информации, обучаемость и принятие решений, а также достоинства робототехнических систем при выполнении операций, требующих высокой точности и повторяемости движений, силы и выносливости.

Важными элементами человеко-машинного интерфейса становятся системы отслеживания движений человека и стереоскопической визуализации. В настоящее время эти системы наиболее активно используются при создании кинофильмов, телевизионных передач и компь-

ютерных игр, а также в интерактивных системах управления движением объектов «виртуальной реальности». Однако комплекс таких систем обладает высокой стоимостью, и их применение требует использования дополнительного дорогостоящего оборудования и программного обеспечения, а также высококвалифицированных специалистов. Эти недостатки не позволяют применять данные системы в других областях человеческой деятельности. С помощью подключаемых к ЭВМ средствам ввода информации о действиях оператора и средствам отображения оператору информации о процессах, происходящих в рабочей зоне робота, человек "погружается" в моделируемую или дистанционно наблюдаемую среду. Система обеспечивает сбор информации, совмещение различных факторов (признаков) ситуации, и, используя принцип синестезии, и создание избыточной информации для каждой обучаемой ситуации, обеспечивает точное воспроизведения действий впоследствии.

Положение и конфигурация частей тела, направление взгляда оператора могут фиксироваться и вводиться в компьютер, осуществляя дистанционное управление роботом, в том числе для оказания сервисных услуг человеку. Компьютер может воспроизводить динамику поведения всех объектов этой среды и, воздействуя на органы зрения, слуха, мышц и тактильных рецепторов человека, создаёт ощущение непосредственного взаимодействия с этой средой.

В тоже время при неадекватных действиях робота в рабочей зоне требуется применение адаптивных программно-аппаратных средств распознавания и парирования таких действий для выполнения высокоточных операций. Примером таких операций может служить оказание услуг человеку, таких как массаж, кормление, или устранение тремора рук человека при неврологических заболеваниях. Кроме того работа со сложной динамической системой, какой является космический манипулятор, требует создания программно-технических комплексов, обеспечивающих идентификацию динамических характеристик системы, моделирование динамических процессов и планирование операций, а также экспертную поддержку в процессе выполнения различных видов функциональной деятельности и защиты от ошибок оператора.

В данной работе предпринята попытка существенного снижения стоимости интерактивных средств копирования движений человека и средств стереоскопической визуализации процессов, происходящих как в реальной, так и в виртуальной рабочей зоне роботов. Управление многозвенной динамической системой в пространстве может осуществляться с помощью контроля конфигурации рук оператора. Одним из способов такого контроля является отслеживание показаний беспроводных датчиков положения звеньев экзоскелетона, установленных на руке оператора. В разрабатываемой системе в качестве датчиков положения использованы одновременно оптические датчики, установленные в шарнирах звеньев экзоскелетона и шестикомпонентные инерциальные датчики, закрепленные на его звеньях. При этом в качестве интерфейса беспроводной передачи данных для оптических датчиков использован стандарт Bluetooth, в то время как связь с инерциальными датчиками осуществляется по беспроводной сенсорной сети ZigBee, показанной на Рисунке 2.

Разрабатываемая система представляет собой аппаратно-программный комплекс. Аппаратная часть системы состоит их трех основных компонент, в том числе:

1) комплекта беспроводных датчиков, закрепляемых на звеньях экзоскелетона, движения которых необходимо отследить;
2) контроллера, который собирает информацию с датчиков и передает ее на компьютер для обработки и визуализации данных;
3) головного компьютера.

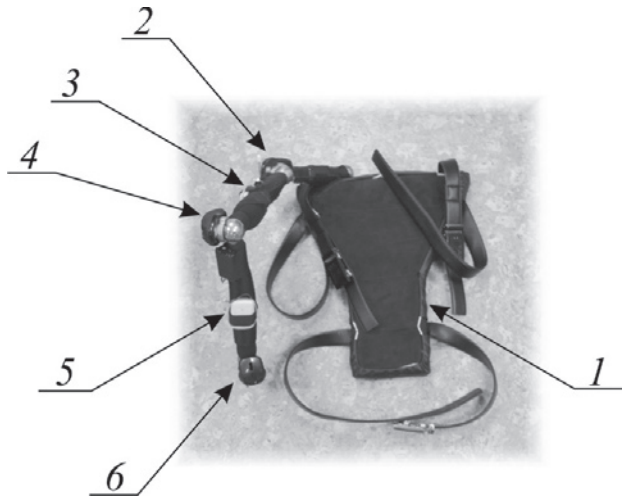



Рисунок 2 – Макет копирующего экзоскелетона;
1 – каркас, закрепляемый на спине оператора; 2, 4, 6 – шаровые шарниры, соответственно, плеча, локтя и запястья с беспроводными оптическими датчиками положения;
3, 5 – беспроводные шестикомпонентные инерционные MEMS-датчики

Датчики предоставляют информацию об угловых и линейных ускорениях звеньев экзоскелетона, с помощью которых осуществляется расчет углов поворота и координат этих звеньев. Программное обеспечение системы отвечает за сбор и обработку данных с датчиков и визуализацию движений 3-мерной модели манипуляционных систем в режиме реального времени.

В качестве тестовой системы был разработан макет, позволяющий продемонстрировать передачу данных с датчиков, установленных на двух звеньях экзоскелетона по беспроводному каналу к контроллеру, который передает их на компьютер для обработки и визуализации виртуальной модели манипулятора. Общий вид демонстрации макета системы показан на Рисунке 3.

Для сбора, первичной обработки и пересылки данных в экспериментах были использованы беспроводные микроконтроллеры английской компании Jennie. Беспроводные ZigBee микроконтроллеры позволяют в реальном времени снимать, первично обрабатывать показания с датчиков и передавать их на сервер обработки и визуализации данных для отображения движений руки экзоскелетона в программном модуле 3-мерной визуализации. Макет системы построен на базе ZigBee микроконтроллера JN-5139.

Технические характеристики платы микроконтроллера:

Особенности передатчика:

- Частота передачи 2.4ГТц;
- Шифрование 128-bit AES;
- MAC адресация;
- Интегрированное управление питанием и режимом энергосбережения;
- Напряжение питания 2.2 - 3.6 Вольт;
- Ток потребления в спящем режиме 0.2 мкА;
- Ток потребления в активном режиме 1.3 мкА;
- Чувствительность передатчика - 97dBm;
- Мощность передатчика +3dBm;

Особенности микроконтроллера:

- 32-разрядный RISC-процессор с низким потреблением энергии;

- 192кб ROM (*ПЗУ*) системной памяти;
- 8кб, 16кб, 32кб или 96кб RAM (*ОЗУ*) памяти для программного кода;
- 4 12-битовый АЦП, 2 11-битовые ЦАПы.
- 2 UART-а.
- Подключение датчиков по интерфейсам SPI и I2C;
- Рабочая температура -40°C ÷ +85°C;
- Размер модуля 8×8 мм 56-контактный QFN.

В экспериментальной системе в качестве базовых датчиков для измерения движений человека используются миниатюрные MEMS- акселерометры и гироскопы. Датчики, построенные по этой технологии, отличаются малыми размерами, низкой стоимостью, низким энергопотреблением и высокой производительностью.

В качестве датчика ускорения используется интегральный MEMS-акселерометр MMA7455L производства компании Freescale, имеющий следующие характеристики:

- цифровой выход ($I^2C$/SPI);
- малое потребление энергии 400мкА;
- чувствительность выбирается из диапазона: ± 2м/с2, ± 4м/с2, ± 8м/с2;
- корпус размером 3×5×1 мм LGA-14;
- низкая стоимость.

В качестве датчика измерения углов поворота используется интегральный MEMS-гироскоп IDG-300 компании InvenSense со следующими характеристиками:

- два независимых гироскопа по осям X и Y;
- полный диапазон измерений ± 500°/с;
- встроенный фильтр нижних частот;
- напряжение питания 3 Вольта;
- корпус размером 6×6×1.4 мм QFN;
- низкая стоимость.

В качестве альтернативного способа контроля углового перемещения звеньев экзоскелетона были использованы оптические беспроводные датчики, установленные в магнитомеханических шаровых шарнирах. Считывание углового перемещения

*Программная часть* системы состоит из двух составляющих: программное обеспечение (*ПО*) для микроконтроллеров и *ПО* для визуализации движения на сервере.

*ПО* для микроконтроллеров было разработано на языке Си, позволяющее снимать показания с датчиков, предварительно их обрабатывать и передавать на сервер обработки и визуализации данных.

Для визуализации в реальном масштабе времени отслеживаемых движений человека разработан программный модуль трехмерной визуализации. Разработка велась на языке MS Visual C# с использованием открытой графической библиотеки OpenGL, которая позволяет в реальном времени визуализировать отслеживаемые движения, сохранять полученные данные и воспроизводить ранее сохраненные данные о движениях манипулятора.

Программа совместима с существующими системами трёхмерного моделирования, такими как Autodesk 3ds Max, Maya, Blender и др. Это обеспечивается за счёт использования для хранения данных файла в формате BVH, разработанного компанией Biovision и широко используемого в системах «захвата движений» типа Motion Capture. Данный формат данных позволяет хранить всю необходимую для 3-мерной визуализации информацию, включая данные о моделях манипуляционных систем и их движениях.

Рисунок 3 – Общий вид демонстрации макета системы

*Особенностью предлагаемого решения* является то, что ранее не было полностью беспроводной системы отслеживания движения в реальном времени. В лучшем случае в таких системах носимые конечные устройства с датчиками объединяются проводными каналами, а информация на компьютер передается по беспроводным каналам связи. В данной же разработке базовые элементы системы не связаны проводными каналами связи − все данные с носимых устройств передаются по радиоканалу с частотой 2.4 ГГц. Для использования системы не требуется какого-либо специального помещения с дополнительным оборудованием (специальные камеры, экраны, излучатели, потолочные маркеры и т.п.), достаточно подключить систему к обычному компьютеру.

Среди основных достоинств системы следует отметить относительно низкую стоимость конечной системы по сравнению с существующими подобными системами, отсутствие лишних проводных каналов связи, хорошую масштабируемость, отсутствие потребности в специально оборудованной лаборатории, автономность конечных носимых устройств с датчиками, работу в реальном времени, совместимость с существующими системами трёхмерного моделирования.

*Развитие разрабатываемой системы* связано с широким спектром возможных применений. К перспективным областям применения беспроводной системы отслеживания движений человека можно отнести:

- погружающие системы виртуальной реальности, предоставляющие весь комплекс человеко-машинных интерфейсов для взаимодействия человека с виртуальной средой;
- домашние игровые системы, позволяющие в домашних условиях более полно погрузиться в атмосферу игры или «социальной» виртуальной среды типа «Вторая Жизнь» (Second Life);
- профессиональные системы для измерений и обработки данных движения человека в киноиндустрии при создании художественных и анимационных фильмов, в интерактивных телевизионных студиях и в рекламной индустрии;
- имитационные или тренажные системы виртуальной реальности, позволяющие отрабатывать процесс функционирования сложных человеко-машинных комплексов, готовить специалистов по дистанционному управлению удаленным оборудованием;

- виртуальная робототехника и преобразование реальных движений в виртуальные для управления различными манипуляторами, человеко-подобными роботами;
- исследования в области эргономики, реабилитационной медицины;
- применения в области спорта высших достижений для сбора данных спортсменов в процессе тренировок и соревнований для их последующей обработки и анализа.

*В заключении следует отметить, что* в данной работе представлена беспроводная система отслеживания движений человека на основе технологии беспроводных сенсорных сетей. Данная система включает в себя все необходимое оборудование и программное обеспечение для отслеживания движения и его визуализации.

Основные достоинства предлагаемого решения – это отсутствие проводных каналов связи, высокая масштабируемость, низкая стоимость по сравнению с существующими системами, а также отсутствие необходимости в оборудовании специальных площадок или помещений.

Разработанный макет системы отслеживания движений человека демонстрирует возможности применения технологии *БСС* при передаче данных с датчиков по беспроводному каналу связи и визуализации их в реальном масштабе времени с помощью модуля стереовизуализации.

Планируется разработать собственный измерительный инерциальный модуль небольшого размера, который можно закреплять на различных частях тела человека для измерений и оценки движений человека, выполнить переход на более производительную платформу от компании Freescale и использовать систему не только как единое целое, но и использовать отдельные компоненты в самостоятельных проектах.

**Список литературы**


[1] А.Н. Вабищевич. Беспроводная система трёхмерной визуализации движения в реальном времени. Тезисы докладов «Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ». - М. МИЭМ, 2009 г., с. 145-146.

[2] М.М. Комаров, С.Г. Ефремов. Универсальная платформа для беспроводной сенсорной сети. Тезисы докладов «Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. - М. МИЭМ», 2009 г., с. 153-155.

[3] Midori Kitagawa and Brian Windsor, MoCap for Artists. Workflow and Techniques for Motion Capture, 2008 Published by Elsevier Inc.

[4] M. Meredith, S. Maddock, Motion Capture File Formats Explained, 2001 by Department of Computer Science, University of Sheffield.

[5] Технология ZigBee. Ссылка в Internet: http:// www, zigbee. org/en/index. asp

[6] Springer, Guang-Zhong Yang (Ed.) «Body Sensor Networks».

[7] Insup Lee, Joseph Y-T. Leung, Sang H. Son, Handbook of Real-Time and Embedded Systems, 2008 by Taylor & Francis Group, LLC.

# ФАКТОР СУБЪЕКТА В ФУНКЦИОНИРОВАНИИ СИСТЕМ

**Л.Л. Чекалов**

ООО «Транс-Мобил Спедишн»
443030, Самара, Желябова, 3-45, Россия
ltrans777@mail.ru
тел: +7 (963) 115-00-77

***Ключевые слова:*** *система, жизненный цикл, информация, обработка информации*

**Abstract**
Artificial objects and subjects can be functional elements in difficult systems. Difference in information processing by object and the subject influences functioning and life cycle of system. Psychophysiological difference of hemispheres of a brain determine two types of information processing by the subject. Transition between types of information processing can transfer the subject to a stress condition.

## Введение

В своей деятельности человеку приходится управлять искусственными или естественными объектами, представляемыми им как системы.

*Система* (С) – это формализованное представление объекта в виде конечного множества функциональных элементов и отношений между ними, выделенное в объекте в соответствии с определенной целью (задачей) в рамках определенного временного интервала. Система существует в движении (изменении и взаимодействии) в пространстве и времени.

*Внутреннее пространство системы* определяется границей взаимодействия функциональных элементов самой системы.

*Внешнее пространство системы* ограничено границей внутреннего пространства и границей получения информации о внешнем пространстве рисунок 1.

Любой объект можно представить в виде совершенно различных систем, в зависимости от целей (задач) представления и концепции реализации задачи. Истинность или не истинность представления определяется реализацией поставленных целей с той или иной степенью точности. В основном цели определяются либо определением «траектории» перехода из прошлых состояний (в текущей ситуации настоящего времени) внутреннего пространства и внешнего пространства объекта в будущие состояния, либо управлением системой при переходе от настоящего к будущему.

В данной работе рассматриваются искусственные системы, элементом которых может быть как искусственный или естественный объект, так и человек - *субъект (С)*, и для которых основной причиной их управления является информация.

*Информация* – комплекс свойств и состояний самой системы, а также их изменение при движении и взаимодействии с объектами или субъектами внешнего или внутреннего пространства. Информация в своем проявлении может иметь совершенно различные свойства, отражающие соответствующие характеристики материального мира. Например, дискретность и непрерывность фундаментальное свойство материального мира, и соответственно информация имеет свойства дискретности и непрерывности.

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 неоднород-

ности, 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, то принимаемая информация будет непрерывной.

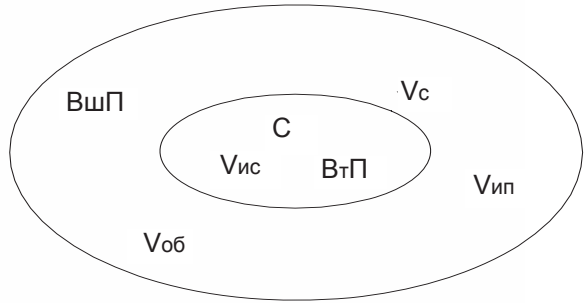



Рисунок 1 – Внешнее и внутреннее пространство системы

*Текущая ситуация* (ТС) – комплекс состояний внешнего и внутреннего пространства системы в определенный промежуток настоящего времени Тн (рисунок 3).

Сознание субъекта, в рамках данной работы, рассматривается только на ментальном (мыслительном) уровне как способность к накоплению (опыт) и обработке информации.

Три взаимосвязанных понятия - обработка информации, принятие решения и управление рассматриваются совместно. Без обработки информации нет принятия решения, без принятия решения нет управления.

*Обработка информации* (ОИ) – сравнение ТС внешнего и внутреннего пространства с прошлым опытом и на основе этого соответствия или несоответствия принятие решения, являющееся целью управления.

*Принятие решения* (ПР) – определяет цель в будущем пространстве-времени, как результат обработки информации, без практической реализации (управления).

*Управление* (УП) – изменение системой своих, и возможно чужих, параметров движения в пространстве и времени (практическая реализация обработки информации и принятия решения) для совмещения с целью.

*Опыт* – информация о результатах практической реализации управления для повторяющихся в определенном диапазоне текущих ситуациях (циклах). В будущем ПР обычно учитывается цикличность (Ц), которая включена в опыт рисунок 2. Например, Ц3 может быть истинно включен в ПР при глубине ПР Т3, но не может быть включен при глубине ПР Т4, т.к. на этом отрезке проявится цикличность, которой не было в опыте Т2.

*Алгоритм* – набор инструкций, описывающих действия субъекта или объекта для достижения цели (обработки информации, принятия решения, управления) в ТС за конечное время. Алгоритм обладает свойством дискретности и представляется раздельными конечными действиями. Алгоритм является формализованным *динамическим опытом* прошлых действий и их результатов (связанных между собой причин и следствий) субъекта или объекта применительно к определенному диапазону текущих ситуаций для решения определенной задачи.

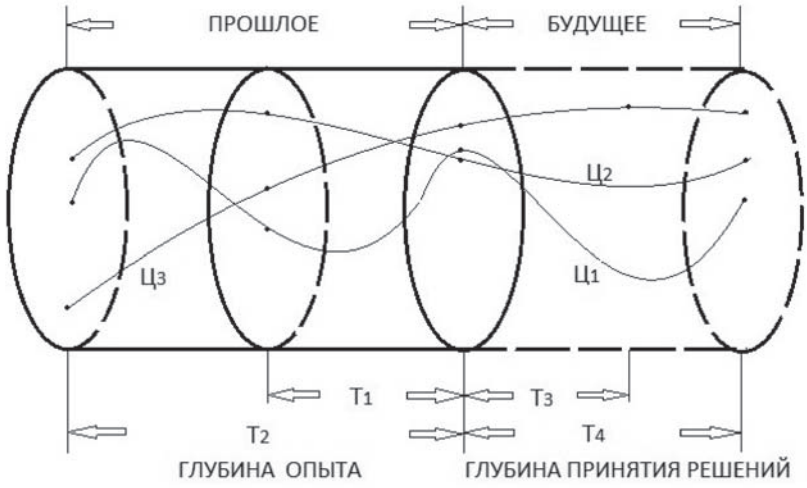



Рисунок 2 – Глубина опыта и цикличность текущих ситуаций

*Функционирование системы* определяется как адекватной обработкой информации, внешней и внутренней, и принятием решений на ее основе, так и практическим переходом из настоящего времени (ТС) в будущее (УП) с определенной степенью точности.

Для успешного функционирования системы необходимо:

- определение и контроль достаточного количества видов параметров и их диапазонов внешнего и внутреннего пространства;
- скорость изменения внешнего пространства Vоб не должна превышать суммы (рисунок 1):
- скорости получения (передачи) информации об этих изменениях Vип;
- скорости передачи информации внутри системы Vис;
- скорости обработки информации и принятия решений;
- скорости управления изменениями во внутреннем пространстве системы.

Функционирование системы возможно при наличии:

- *прошлого* опыта о возможных состояниях внешнего пространства, и возможных уже успешно реализованных ответах внутреннего пространства на эти состояния;
- средств получения и интерпретации информации о внешнем и внутреннем пространстве в *настоящее* время (ТС);
- средств обработки информации, принятия решения и управления для перехода в *будущее* пространство на основе сравнения опыта с ТС.

## 1 Влияние психофизиологических особенностей субъекта на обработку информации

Адекватность функционирования системы по отношению к изменениям внешнего пространства зависит от свойств элементов системы, связанных с их опытом, восприятием, обработкой информации и управлением. Элементы системы, являющиеся субъектами имеют психофизиологические различия левого и правого полушарий мозга, что позволяет субъекту поразному воспринимать действительность и накладывает особый отпечаток на обработку информации.

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 [1].

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) луча внимания на определенной части внешнего или внутреннего пространства субъекта (рисунок 5).

Любую ситуацию, связанную с принятием решения (ПР) можно представить в пространстве - времени как на рисунке 3. 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 (3-4).

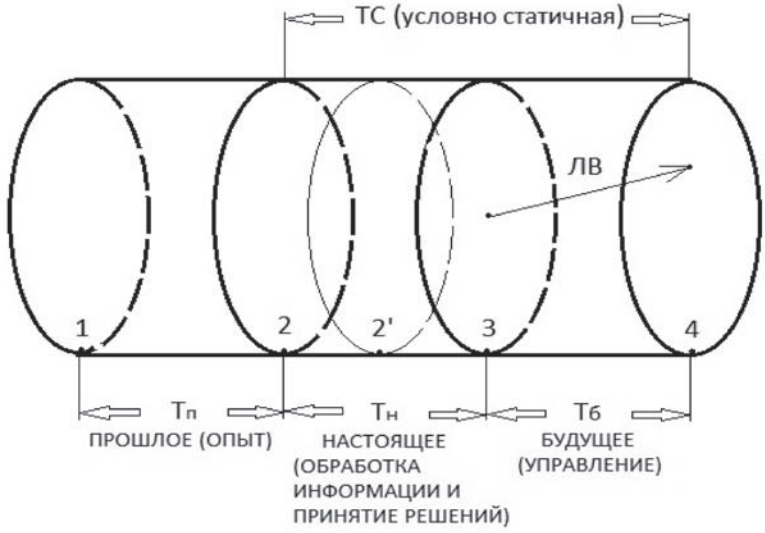



Рисунок 3 – Схема обработки информации, принятия решения и управления

Как будет выполнять эти шаги левое полушарие (дискретная обработка информации):

6) Прошлый опыт – дискретный фрагментарный алгоритмически взаимосвязанный, он ориентирован на ограниченное количество целей.
7) Текущая ситуация – дискретизируется алгоритмически 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.
8) Обработка информации – дискретная ТС сравнивается алгоритмически с дискретным опытом (время между точками 2’-3 больше нуля).
9) Принимается решение - точка 3 . Если необходимо, подтверждение истинности ПР в сознании до начала практической реализации происходит на основе алгоритма.
10) Управление. Практическая проверка истинности принятого решения и возможности совмещения с целью.

У правого полушария схема будет несколько иная:

11) Прошлый опыт – непрерывно-дискретный, более целостный, менее фрагментарный.
12) Текущая ситуация - дискретизируется, сравнивается с опытом и принимается решение на основе ощущения (чувства). Все три действия проходят «одновременно» и подтверждение

истинности ПР в сознании проводится без участия алгоритма на основе ощущения «мгновенно» (время между точками 2-3 стремится к нулю).

13) 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.

Любые элементы системы, принадлежащие миру неживой природы – искусственные или естественные объекты, не обладают возможностью непрерывной обработки информации как у субъектов. Обработка информации объектами ведется дискретно с помощью алгоритмов (динамическая информация) и массивов данных (статическая информация).

Реакции объекта ограничены, как перечнем параметров и их функциями, так и возможными диапазонами изменений этих параметров, как в пространстве опыта и текущей ситуации, так и в будущем пространстве управления. Выход параметра за пределы возможного диапазона, так и появление нового параметра, значимого для движения как элемента системы, так и все системы в целом, ведет к окончанию жизненного цикла системы в первоначальной структуре и функциях, и требует ее изменения.

## 2 Объективность дискретной и непрерывной обработки информации

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 3), 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 3), ни алгоритмически вывести и проверить принятое решение, ни вступить в интерсубъективное общение, потому что переход от точки 2 к точке 3 происходит «мгновенно». 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 основной задачей сознания для субъекта 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 таких решений зависела жизнь первобытного человека, поэтому 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.

Видимо существуют устойчивые зоны мозга, в которых пересекаются обработка информации и 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.

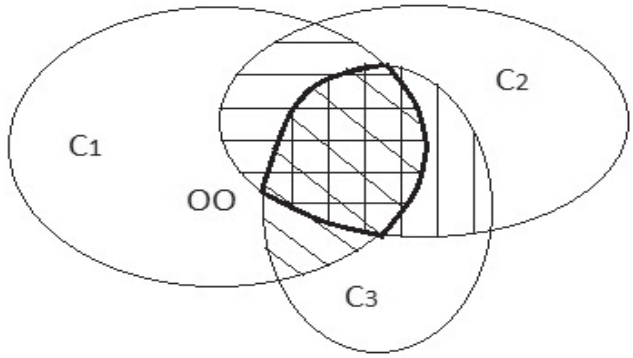



Рисунок 4 – Пересечение зон дискретного и непрерывного опыта трех субъектов

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 4). На самом деле, рисунок 4 должен быть нарисован объемным, где большинство дискретного обозначения непрерывного опыта совпадают (допустим на уровне русского языка), а вот непрерывная часть очень часто расходится в содержании. Одним и тем же словом у различных субъектов может обозначаться различный непрерывный опыт. Так появляется проблема «другого сознания» [2].

### 3 Информационная модель сознания, принятие решения и его осознанность

В 2008 году группа ученых провела опыты [5] с нажатием кнопок с использованием современной технологии – функциональной магнитно-резонансной томографии (МРТ). МРТ позволяет исследовать изменение активности различных участков мозга, наблюдая за изменением тока крови (наиболее активные участки мозга требуют больше кислорода). Испытуемых сажали перед экраном, на котором менялись буквы. Испытуемый должен был запоминать, при появлении какой буквы они совершали выбор между двумя кнопками. Ученые пытались определить, возбуждение каких участков мозга содержит наибольшую информацию о том, какой выбор совершит человек: нажмет он на левую или на правую кнопку. С учетом всех статистических поправок повышение активности мозга позволяла предугадывать выбор человека до того, как он его осознавал. В ряде условий прогноз удавалось осуществлять за 10 секунд до момента принятия осознанного решения испытуемым! Нейрофизиолог Джон-Дилан Хейнс (John-Dylan Haynes) и коллеги, участвовавшие в этом исследовании, пришли к выводу, что сеть управляющих участков мозга, ответственных за принятие решений, начинает формироваться задолго до того, как мы начинаем это *осознавать*.

Само ощущение осознанности возникает в коротком промежутке настоящего времени. Но из этого настоящего мы можем фантазировать о будущем или вспоминать прошлое, сле-

дить за внешним пространством или прислушиваться к ощущениям собственного тела (рисунок 5), т.е. осознанность обладает определенной направленностью и в дальнейшем это явление будем называть *лучом внимания* (ЛВ) или направленной осознанностью (рисунок 3)**.**

Информационное описание сознания, совмещенное с пространством и временем имеет разделение на зоны прошлого, настоящего и будущего, также на внутреннее (условно тело субъекта) и внешнее пространство (хотя информация о нем поступает тоже через различные органы тела), и, наконец, внутреннее пространство разделяется на зоны доступные вниманию (и потенциально поддающиеся управлению) и зоны не доступные вниманию (рисунок 2).

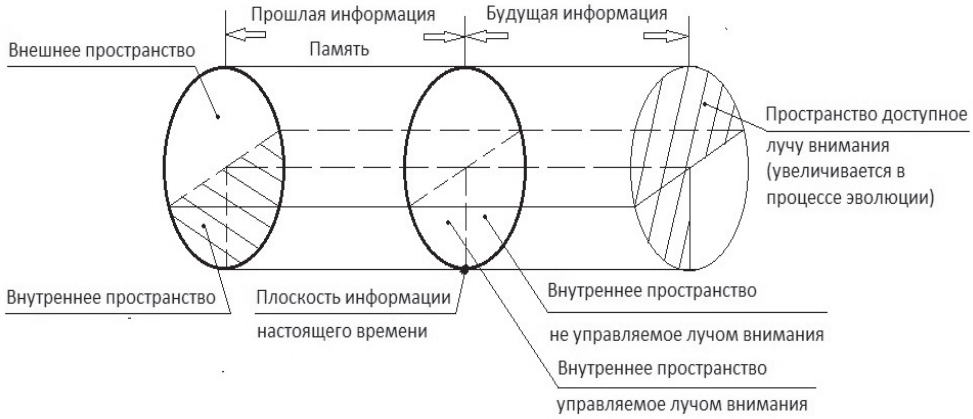



Рисунок 5 – Информационное описание сознания в пространстве-времени

*Обработка информации - это свойство зоны памяти*, как и хранение информации. Это свойство *сформированно в процессе эволюции* и работает по законам, не всегда поддающимся влиянию воли субъекта, т.е. это во многом объективный природный процесс. Обработка информации в зоне памяти в большей степени непрерывная, а вот в зоне луча внимания сознание человека пытается заниматься дискретной обработкой дискретной информации и с большим напряжением складывает и умножает большие числа или выполняет какие-либо логические действия. Эта зона в большей мере осознаваема и управляема человеком при обработке информации.

Пересечение участков головного мозга отвечающих за неосознанное управление внутренними органами и неосознанную обработку информации, с одной стороны делает возможным применение детекторов лжи, а с другой стороны дает один из вариантов описания появления стресса у субъекта.

## 4 Стресс как реакция на новые ТС и необходимость разработки новых алгоритмов

Стресс определяется у Г.Селье как общий адаптационный синдром. Факторы, вызывающие стресс, могут быть различны, но они запускают одинаковую на биологическом уровне реакцию организма. Стресс есть неспецифический (новый) ответ организма на любое новое требование к нему. Стрессорный эффект зависит от интенсивности требований к адаптационной способности организма. Такое требование может возникнуть как на биологическом уровне, так и на информационном уровне. Необходимость опять создавать новые алгоритмы ПР в других ТС переводят организм из состояния комфорта в стрессовое неприятное состояние, которого большинство из нас интуитивно не хочет. Но ограниченность во времени ПР, повышенная значимость (мотивация), большой объем информации для ПР может привести к повреждению организма на биологическом уровне с информационного уровня.

«Стресс» переводится на русский язык как «напряжение». И если это напряжение не находит благополучного разрешения с ощущением истинности ПР, или получив такое ощущение мы сознательно не следуем ему по каким-либо причинам, то в зоне информационного пересечения управления внутренних органов и обработки информации может быть нарушено привычное управление внутренними органами.

Из личной жизни попробуйте вспомнить прошлые ощущения при обучении вождения машиной и сегодняшнее чувство комфорта, когда функция вождения перешла в стадию совершенства. Также и сейчас, пересаживаясь на другой автомобиль или при вождении в незнакомом городе, снова возникает стрессовое состояние адаптации к новой ситуации.

## 5 Жизненный цикл системы и субъективный фактор

На продолжительность ЖЦ систем влияет множество факторов. Одна категория таких влияний связана с адекватностью реакций системы на внешние и внутренние ТС. Если параметры ТС выходят за предполагаемые пределы, принятые в период разработки системы, или появляются новые факторы и параметры ТС, которые не были учтены как существенные, то ЖЦ системы заканчивается и система требует либо модернизации, либо утилизации.

Другой вариант ограничения ЖЦ связан с конкуренцией либо в плоскости эффективности, когда появляются более эффективные по самым различным функциям системы, либо в плоскости комфортности и расширения набора функций на свободном рынке услуг.

В последнем случае, аналитики из компаний Strategy Analytics и RBC Capital Market заметили интересную особенность, что жизненный цикл мобильных операционных систем составляет 10 лет и своего коммерческого пика они достигали примерно к середине этого срока[6]. В качестве примера эксперты предложили взглянуть на график изменения популярности Windows Mobile, Palm OS, Blackberry OS и Symbian с течением времени.

Конечно, Strategy Analytics и RBC Capital Market дают упрощенное представление о реальной ситуации на рынке, хотя доля правды в отчете все же есть.

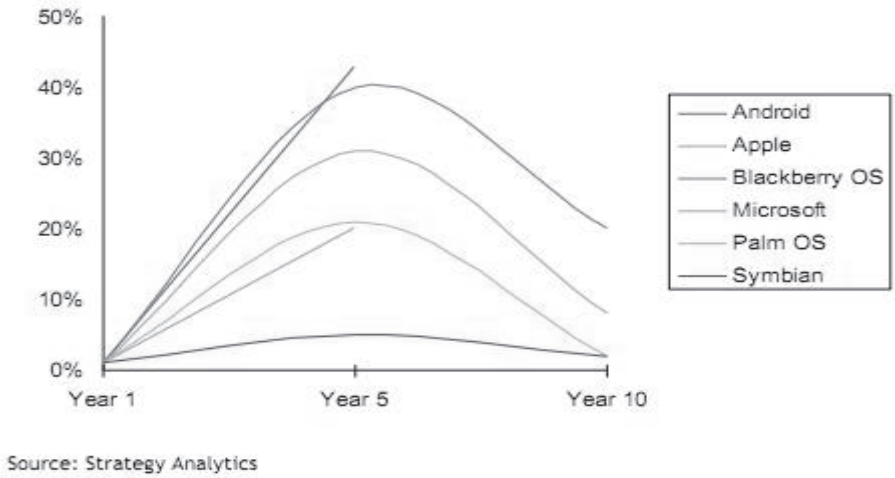



Рисунок 6 – Жизненные циклы мобильных операционных систем

Перечисленные операционные системы достигли своего расцвета примерно к 5 годам после масштабного выхода на рынок, а к 10 годам практически исчезли с рынка. Иными словами, смартфонный рынок подчиняется своему собственному закону.

Созданная мобильная ОС и коллектив её разработчиков представляют взаимосвязанную систему более высокого уровня, в которой, с одной стороны, сама операционная система явля-

ется дискретной системой, фиксирующей прошлый опыт и который сам по себе мешает внесению изменений, а с другой стороны, у субъектов, разработавших и улучшающих ОС дискретный опыт из левого полушария перешел в правое полушарие в состоянии совершенства и стал препятствовать своему же изменению. В этом одна из причин ограниченности ЖЦ операционных систем несмотря на большие финансовые возможности фирм производителей.

Каждая новая система имеет другую концепцию и структурную ориентацию. Новая система выигрывает не за счет того, что другие стали не адекватны, а за счет другой концепции. И это сначала успокаивает конкурентов - ведь у нас всё правильно работает... Но что интересно: несмотря на очевидные проблемы когда спад становится всем заметным, это достаточно долго игнорируется субъектами обслуживающими систему пока приближение краха становится всем очевидным.

Таким образом, субъекты на первом этапе разработки системы являются прогрессивным компонентом, где дискретная обработка информации левого полушария выполняется еще на свободном непрерывном и не заполненным дискретными навыками в стадии совершенства правом полушарии.

А во второй фазе развития и обслуживания системы:

- с одной стороны, консервативным является дискретный опыт застывший (кристаллизовавшийся) в системе, изменение концепции которого может по затратам ресурсов быть сопоставимо с разработкой новой системы;
- а с другой стороны, и сами субъекты переходят в психологически комфортное «внутреннее» состояние работы в режиме правополушарного «совершенного» дискретного опыта с известным продуктом, т.е. консервируют дискретный опыт и сами субъекты, вывести из которого может только угроза другого ещё большего стресса - краха любимой системы.

**Заключение**

Правое полушарие, с одной стороны, является непрерывной недискретизированной территорией на которой левое полушарие строит и отрабатывает дискретные алгоритмы, а с другой стороны, на эту территорию перемещаются отработанные левым полушарием алгоритмы дискретности [1], которые начинаю загромождать эту территорию привычками, догмами и прочими знаниями, естественно в чем-то очень полезными и нужными, но территория перестает быть площадкой для создания нового, а становится хранилищем для старого и движение вперед заканчивается.

Таким образом, переход отработанных до совершенства функций из левого полушарие в правое по причине ограниченности его ресурсов является информационным тормозом, как для восприятия и так и для создания нового, а с другой стороны, стресс становится психологическим тормозом.

В мире существуют три способа стимулирующих массовое движение вперед:

- конкуренция и здесь в стрессе субъектов виноваты соседние субъекты, создающие улучшенные или совсем новые системы;
- централизованное управление - здесь в стрессе при движении к новому будет виноват начальник, конечно если у него есть желание двигаться вперед и понимание изменений ТС, чтобы понять направление движения;
- силы природы, когда они кардинально меняют среду обитания, вынуждая субъектов живой материи искать новые способы выживания.

Также стоит отметить, что непрерывным опытом, совмещенным с обработкой информации, является только живая материя, и в наиболее совершенной её форме человеке - природный эволюционный процесс реализовал пока максимальный, из известных нам сейчас, по степени непрерывности и творчества процесс изменения пространства и времени.

**Список литературы**


[1] Геодакян В.А. Homo sapiens на пути к асимметризации. Антропология на пороге III Тысячелетия. Москва 2003, т.1, с. 170-201.

[2] Дубровский Д.И. Проблема «другого сознания». Вопросы философии, 2008, №1.

[3] Селье Г. Когда стресс не приносит горя. М., 1992.

[4] Чекалов Л.Л. Информационная модель сознания и описание эволюции её функций от животного к человеку. Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XII Международной конференции (21-23 июня 2010 г. Самара, Россия)/ Под ред.: акад. Е.А.Федосова, акад. Н.А.Кузнецова, проф. В.А.Виттиха. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2010. - с 256-262.

[5] John-Dylan Haynes. Unconscious determinants of free decisions in the human brain // Nature Neuroscience 11, 543–545 (1 May 2008) | doi:10.1038/nn.2112.

[6] Мобильные операционные системы живут 10 лет. Macdigger [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.macdigger.ru/iphone-ipod/mobilnye-operacionnye-sistemy-zhivut-10-let.html (дата обращения: 23.01.2012.

# МОДЕЛЬ «УПРАВЛЯЕМОЙ ЭКОНОМИКИ», КАК ОТРАЖЕНИЕ КАЧЕСТВА СОВРЕМЕННОЙ СЛОЖНОСТИ

**Д.И. Пунда**

ООО «НАУКОМП – Технологии Моделирования»
443010, Самара, ул. Самарская, 146, Россия
poundadi@yandex.ru
тел: +7 (846) 246-40-30, +7 (916) 571-63-17 (Москва), тел/факс: +7 (846) 221-19-13

***Ключевые слова:*** *технологии управления, технологии информационного обеспечения управления, сложные социальные системы, сложность управления, когнитивная сложность управления, ментальные ограничения управления, формализация знаний, обеспеченность представлений социальных систем*

**Abstract**

The analysis of features of modern complexity of social systems is presented. It is shown that main active now-days complexity has cognitive nature and reasons. Also fundamental reasons of modern complex economic crisis have cognitive character. For effective economy and for decision of such modern crisis the cognitive technologies of management now are required.

## Введение

Начавшиеся в середине прошлого столетия исследования сложных систем, нелинейной динамики и процессов самоорганизации [1-5] в настоящее время приобрели не только растущий научный интерес, но и практическую направленность в области развития междисциплинарных (конвергентных) наук и когнитивных исследований ментальных возможностей человека, для обеспечения эффективного управления современной сложной деятельностью общества [6-9]. Актуальность этих исследований сегодня может быть продиктована, например, неспособностью властей и экспертов эффективно управлять затянувшимся мировым финансово-экономическим кризисом 2008-2012... годов [7-10]. В настоящей работе анализируется современная сложность управления социальными системами (частными и государственными организациями, международными Программами, рынками...). Изучаются механизмы, порождающие эти сложности, с целью построения эффективных технологий управления..

## 1 Мыслительные возможности человека. Когнитивные и ментальные технологии. Развитый «богатый» язык

Ещё во времена Ньютона и Канта «всё сущее» разделялось на три основы: мир, мышление и ментальные модели мира [11]. Познаваемость мира считалась бесконечной, и на сегодня такую бесконечность познания можно представить в трёх относительно независимых аспектах: В «абстрактном» аспекте, согласно которому формальные представления о мире неограниченны, в смысле неполноты формальных непротиворечивых представлений по Гёделю [12] – неограниченность представлений систем в существующем пространстве-времени. В аспекте «реального» бесконечного познания мира, как познания неограниченного содержания Природы («электрон неисчерпаем, как атом», «механизмы поведения живой природы бесконечно разнообразны», «полностью познать мышление, как самого себя невозможно», и многое иное, что зачастую не бесспорно). И в «ментальном» аспекте, как невозможность в полном объеме сопоставить мыслительную модель мира и сам мир. В последнем представлении и аспекте

непознаваемости мира уже заложено то, что мышление человека имеет как когнитивные возможности, так и их когнитивные ограничения [7-10].

Научные познания, в основном 20-21 веков, существенно пополнили знания об элементарном порядке, определяющем «жизнь на Земле», и поведение социальных систем, в частности. Кроме того, что мир, мышление и мыслительные модели мира есть единое целое (что есть не Mind *and* Nature, a Mind *in* Nature [13]), на сегодня известно о фундаментальной (квантовой) природе неопределенности в пределах вероятностей событий [14]. И о том, что мышление человека развивалось от форм, близких к формам «мышления животного», согласно современным археологическим, палеонтологическим, антропологическим, психологическим (психологии человека и животных) и иным практическим исследованиям [15]. Известными стали практические знания даже о том, что непосредственно и не влияет на поведение социальных систем (элементарные частицы сверхвысокой энергии и сверхмалых размеров, предполагаемая тёмная энергия и нарушения фундаментальной симметрии и причинности...).

Поэтому о мышлении человека можно сказать, что кроме присущей клеткам и животным воспроизводимой реакции на внутренние и внешние возмущения («рефлексной глобальной когнитивной» технологии), человеческое мышление обладает «второй глобальной когнитивной технологией» – «ментальной технологией» обмена представлениями о мире (обмена знаниями), как «ментальной технологией» формализации знаний. Обобщенное понятие воспроизводимости реакции актора (клетки, животного, человека, социальной системы...) предполагает его способность воспроизводить «анализ и синтез представлений». В этом понимании воспроизводимость реакции актора есть «способность актора воспроизводимо строить представления целого как комбинацию известных частных, и его возможность тестировать (апробировать) принципиально неизвестное целое с последующей трансформацией этого неизвестного целого в новое известное частное, как результат процесса получения новых знаний». Возможность апробации принципиально неизвестного целого с переводом его в новое известное частное можно интерпретировать как совпадение этой возможности со «способностью актора воспроизводимо строить представления целого как комбинацию известных частных» после получения актором нового знания в качестве нового известного частного.

Деятельность (активность) любой социальной системы в первую очередь определяется совокупностью технологий, которые она реализует как интегрированная и открытая система (взаимодействующая с окружением). Технологий, как способов и средств, которые и получают, и применяют знания. Таких технологий, как производственные, организационные, политические, информационные, когнитивные и иные способы и средства активности систем. Когнитивные технологии – это технологии изучения процесса познания (мышления) и технологии применения знаний об этом процессе [7]. Методологическую основу технологий в значительной степени обеспечивает возможность обмена формальными знаниями.

Согласно выше сказанному о «ментальных технологиях» реакции на возмущения и формализации знаний, ментальные технологии можно рассматривать как отдельные технологии в «общем классе» когнитивных технологий. Как технологии, которые реализуются не на уровне обмена формальными знаниями, а на уровне мышления. В этих представлениях методология ментальных технологий, как правило, в меньшей степени формализуемая, чем методологии всех остальных технологий, и поэтому обычно ментальные технологии являются наиболее неопределенными технологиями.

Вероятно, развитие ментальной технологии обмена знаниями было инициировано не только появлением каких-то объективных возможностей для такого обмена, но и возникновением «острой необходимости борьбы со сложностями тех периодов», – при появлении перед человеком жизненной потребности в обмене пониманием мира.

Используемое Гёделем при выводе теоремы о «неполноте непротиворечивых представлений» предположение о том, что «должен иметь место достаточно богатый язык» (множество слов, аксиом, создаваемых теорий формальной арифметики...), и обозначенное им как «опре-

деленные условия» [12], соответствует развитым ментальным технологиям формализации знаний (обмена знаниями). И если воспроизводимость реакции на возмущения принципиально отличает мышление человека от «мышления» компьютера [16], то наличие развитого «достаточно богатого» языка принципиально отличает его от «мышления» клеток и животных.

## 2 Ограниченные возможности технологий обмена формальными знаниями

Сначала уточним, что понимаем под технологиями управления и технологиями обеспечения управления. Первые технологии управляют (как, например, технологии фрезерования фрезеруют), а вторые – создают нечто, что можно использовать технологией управления. Присутствие или отсутствие человека в структуре технологии для этого понимания не существенно (как и степень участия фрезеровщика в технологии фрезерования).

Современные технологии обеспечения управления, в первую очередь IT, позволяют в принципе управлять любыми сложными детерминированными системами (и любой формализуемой информацией), решать системы уравнений любой сложности и оперировать прочими сложностями. Поэтому сегодня сложность управления определяется возможностью управления такими технологиями активности системы, которые являются не полностью определенными. Ментальное ограничение управления состоит в том, что человек, по «природе и характеру» развития его «мышления для управления», в состоянии эффективно управлять не более 5-7 подчиненными, или не более 5-7 «выделенными главными» технологиями деятельности социальной системы.

Увеличить число управляемых технологий деятельности, и, тем самым, уменьшить влияние ментального ограничения управления на деятельность социальных систем, можно только создав специальные для этого технологии управления. Поскольку коллективное управление эту проблему не решает, так как, условно говоря, коллектив из 10 директоров будет эффективно управлять не 50-70 подчиненными, а всё теми же практически 5-7. Не смотря на то, что коллективное управление может существенно сократить время построения качественного представления и качественного принятия решения. Традиционные формальные технологии (IT, DSS, сетевые IT ...), как «искусственные» технологии обмена формальными знаниями, снизить такое влияние ментального ограничения управления также не могут [10]. Как и не могут увеличить ментальные возможности управления, и тем самым сократить влияние ментальных ограничений на управление социальными системами, любые технологии только обмена формальными знаниями. В рамках которых процесс мышления, как воспроизводимая реакция на возмущения и формализация знаний, реализуется в пределах ментального ресурса одного человека. Даже при коллективном управлении.

С другой стороны, современные академические науки о сложных системах в основном исследуют общие закономерности самоорганизации, зачастую не отделяя качества самоорганизации в среде социальных систем от качества самоорганизации в физической среде и в среде «акторов с только воспроизводимой реакцией на возмущения» (с рефлексией клеток-животных) [1-9]. Отчасти по этой же причине, формальные теории и модели прикладных наук (экономики, политики...), используемые экспертами и лидерами в управлении экономическими процессами, не соответствуют фундаментальным причинам современного сложного кризиса. К примеру, они, как правило, не рассматривают механизмы разрушения самоорганизации, о которых говорилось выше. Поэтому данные прикладные науки также, по сути, не могут предложить действенные способы и средства для сокращения влияния ментальных ограничений на управление социальными системами. Такое состояние дел не просто недоработка наук или результат влияния «политизированных» и клановых ценностей, а в основном это есть следствие современной сложности общества [6-10].

Как частный пример, можно выделить некоторые тенденции в развитии современных, и не только прикладных наук, которые косвенно говорят о существенном влиянии ментальных

ограничений управления на деятельность сложных социальных систем, в том числе в области научной активности. Например, тенденция в том, что современные ученые в своих прогнозах всё чаще стараются не прибегать к существующим формальным теориям. Как правило, они строят прогнозы в форме представлений о трендах развития социальных систем, на основе не полностью детерминированных, но адекватных концепций и моделей реальности [6-10, 16-27]. Другая такая тенденция – рост числа околонаучных теорий, не опирающихся на фундаментальные знания и даже зачастую противоречащих им в угоду объяснений уже свершенных событий (но не прогнозов). Особенно в социально-экономической и политической сфере.

Таким образом, для управления наиболее сложными социальными системами (крупными высокотехнологичными корпорациями и Программами, или при властном управлении экономическими процессами, рынками) сегодня нужны технологии, увеличивающие ментальные возможности человека в управлении. Иначе говоря, в условиях современной сложности обществу нужна «третья глобальная когнитивная технология», которая способна объединять ментальные ресурсы. Однако заставить или обучить объединению ментального ресурса невозможно только средствами формального обмена знанием. Необходимо создавать соответствующие такому объединению условия.

## 3 Когнитивная технология со-управления

Для качественного снижения влияния ментальных ограничений управления на деятельность социальных систем, и для создания эффективного управления нерегулируемых нормами и институтами рыночных или иных технологий активности общества, нами была разработана технология со-управления. Она основана на разделении функций управления на уровне мышления, что позволяет объединять ментальный ресурс двух «равноправных на уровне общения (обмена формальными знаниями)» руководителей. Её методология базируется на анализе составляющих процесса мышления при управлении [17,18]. Равноправие на формальном уровне продиктовано известным обстоятельством, что «руководитель должен конвергировать знания, необходимые для управления конкретной системой, в большей степени, чем кто-либо другой», даже эксперты. Пусть даже не разбираясь в отдельных, интегрируемых им технологиях активности системы, так глубоко, как специалисты.

Одним из ряда основных требований к реализации технологии со-управления является разделение ответственностей руководителей. Разделение на ответственность за принимаемые решения (за варианты решений, за конструирование развития системы), и ответственность за обеспеченность формальных представлений деятельности системы [17]. Это требование исходит из необходимости создания условий, ориентирующих мышление каждого из обоих руководителя на определенные его ответственностью мыслительные функции. То есть выполнение такого требования будет обеспечением выполнения необходимого (но не достаточного) условия для объединения ментального ресурса двух руководителей через разделение функций управления на уровне мышления при одинаковых функциях на уровне общения.

Относительно обеспеченности представлений. Под обеспеченными представлениями системы понимаются интегральные, открытые, системные и адекватные модели её деятельности [17]. Уточним это определение: Интегральные представления означают учет в моделях всех технологий и иных актуальных факторов системы. Открытые – учитывающие при расчетах моделей влияние окружения на систему. Системные – устанавливающие взаимные связи-зависимости. И адекватные модели – соответствующие практическим знаниям, не противоречащие фундаментальным концепциям. Добиться обеспеченности представления можно при конвергенции многих, актуальных для конкретной социальной системы, наук и технологий деятельности в конкретную интегральную технологию управления (но не в универсальную конвергентную науку). Поэтому технология со-управления предъявляет высокий спрос к

уровню знаний второго руководителя и к его способностям и навыкам в междисциплинарной интеграции наук.

Второе из основных требований относится уже к самим интегральным, открытым, системным и адекватным представлениям. Оно состоит в отсутствии ценностей (интересов) в этих обеспеченных представлениях, с тем, чтобы такие представления обеспечивали разделение ментальных функций в рамках технологии со-управления. Это ещё одно необходимое условие объединения ментального ресурса. Оно регламентирует выбор моделей деятельности социальной системы из множества её возможных представлений, как представлений не полностью детерминированной системы. Так как формальное представление неопределенной системы, в отличие от полностью определенной (автоматизированной линии, робота...), может иметь не единственный его вариант, в зависимости от, например, выбранных концепций представления. Кстати, по этой же причине любая социальная система имеет два целостных, относительно самостоятельных, но актуальных для управления, представления – формальное представление (формальные модели, планы, приказы...) и понимание руководителя [18].

Второе основное требование означает, по сути, уход от «интуитивной интеграции знаний» и от приоритета феноменологических концепций при построении моделей. И оно является гарантией устойчивого соответствия формальных обеспеченных представлений деятельности социальной системы пониманию руководителем деятельности этой же системы. Под «соответствием формальной модели пониманию руководителя» полагается совпадение понимания и модели полностью или в части, или приемлемое улучшение этого понимания [18]. Приемлемое улучшение понимания можно интерпретировать как «совпадение понимания и модели после получения новых знаний».

Вопросы организационной и правовой реализации технологии со-управления носят конкретный характер [10]. С другой стороны, суть ни в том, можно ли вообще и как «правильно» её реализовать. А в том, что практическую реализацию технологии со-управления сегодня делать необходимо. Поскольку для управления современной сложностью нужны технологии управления, позволяющие умножать (объединять) ментальный ресурс человека. И технология со-управления, как показано выше, может выступить в качестве такой технологии. А качественно иных реальных вариантов сегодня нет. Но есть неопределенная и разрушительная социально-экономическая перспектива, о которой как об альтернативе технологиям объединения ментального ресурса сказано выше. Управлять такой перспективой прогнозируемым образом невозможно в условиях современной сложности, если пользоваться только технологиями обмена формальными знаниями. Как «искусственными» (DSS, сетевыми IT, многоагентными системами...), так и ментальными (например, интуитивной интеграцией знаний).

## 4 Об отличительном качестве когнитивных технологий управления

Приведем основные качественные различия между активно используемыми сегодня «традиционными технологиями обеспечения управления», и предлагаемыми здесь «когнитивными технологиями управления». И в первую очередь нужно обратить внимание на то обстоятельство, что для традиционных технологий обеспечения управления, в том числе для систем поддержки принятия решений (DSS, PLM или ERP guide modules, Network&Multi-agent systems, как многоагентных IT-систем...), в отличие от когнитивной технологии со-управления, требование «отсутствия ценностей» не критично.

Более того, для технологий обеспечения управления, наоборот, в последнее время перспективным считается междисциплинарное моделирование социальных систем и ситуаций с «приоритетом в них согласования интересов акторов» (предприятий, структур власти, институтов, регуляторов, руководителей...) [8,19,20]. Для чего предлагается «построение интерсубъективных ситуационных теорий и моделей» на основе феноменологических концепций и ценностей [8,19]. С «приоритетом феноменологических социаль-

ных наук» (политики, психологии, «политизированной» экономики...). С «приоритетом поддерживаемой властью риторики», и с «приоритетом уже принятых решений» [8,19,20]. И зачастую такая «интерсубъективная перспектива» развития интеллектуального сопровождения управления обоснована, и практична.

Но до тех пор, пока нет существенного влияния ментальных ограничений управления на деятельность социальных систем. Пока нет существенного влияния принципиально не регулируемых видов деятельности (например, упомянутых выше технологий выкачивания ресурса). Иными словами, пока работают условия эффективной самоорганизации социальных систем, и пока не существенно её разрушение.

То есть «интерсубъективная концепция» обеспечения управления эффективна для принципиально управляемых социальных систем и ситуаций. Когда же указанные условия самоорганизации не выполняются, то можно говорить о принципиально неуправляемых социальных системах, в которых традиционное обеспечение управления, основанное на обмене формальными знаниями, сегодня не работает. И говорить о кризисе управления (как о потере возможности прогнозирования и контроля) [10].

## 5 О практичности применения когнитивных технологий управления

В общем случае когнитивные технологии управления можно, как «достойную альтернативу», использовать при обеспечении управления в любых, даже не очень сложных социальных системах или в их сетевых структурах (полностью автоматизированном заводе Toyota, сети булочных...). Но для таких принципиально управляемых социальных систем они более затратные, чем традиционные технологии обеспечения управления, и как инструмент для руководителя они неустойчивы. Как показывает наш десятилетний практический опыт построения когнитивных технологий управления, руководитель такой «относительно простой социальной системы» активно пользуется когнитивной технологией управления до момента некоторого целостного интуитивного постижения этой технологии [17,18]. В дальнейшем ему в управлении хватает информации от технологий обеспечения управления (которыми оперируют его заместители и специалисты, как прямые функциональные пользователи), и хватает возможностей его интуитивной интеграции знаний. Для управления такой «простой системой» не критично, что формальные модели не всегда устойчиво соответствуют пониманию руководителя. Не полностью формализованное понимание руководителя и его интуитивная интеграция знаний «бегут впереди» формальных представлений при таком несложном управлении.

## 6 О финансовом и экономическом кризисах 2008-2012

Наиболее яркий пример неуправляемых социальных систем и ситуаций демонстрируется при управлении экономическими процессами в США и Европе летом и осенью 2011 года (согласно изложенному выше здесь «неуправляемые» подразумевает «традиционно неуправляемые», то есть неуправляемые с помощью традиционных технологий обеспечения управления, таких, как IT, DSS, сетевые, как институты нормативного регулирования экономики, как коллективные способы и средства, как способы и средства интуитивной интеграции знаний и прочие). При управлении экономическими процессами со стороны правительств, регуляторов и фондов отдельных стран, общеевропейских и мировых структур, саммитов... Где власти и эксперты не успешно пытаются управлять экономикой, а не просто регулировать рынки нормами, не имея для эффективного такого управления инструментов, соответствующих сегодняшней сложности. И где управление, в основном, носит сугубо политический характер.

Понятно, что у конкретных руководителей есть свои политические и иные интересы. Есть интересы слоёв общества, есть клановые, коллективные и личные интересы, как и интересы власти или капитала. Есть конкретные финансово-экономические, социальные и политические проблемы конкретных социальных систем. Есть формальные теории и модели, и есть интуи-

тивная интеграция знаний экспертов и лидеров. Есть коллективный обмен и согласование знаний. И любые управленческие решения, как правило, согласовываются и принимаются в спектре многих ценностей, в том числе и властью, и в поле формальных и интуитивных представлений. Но качество современной сложности требует новых инструментов адекватного прогнозирования и контроля, которые дополняют согласование или умалчивание интересов и влияют на принимаемые решения. Новых инструментов для управляемого существования и развития. Поскольку, как уже говорилось выше, традиционные технологии обеспечения управления, основанные на построении формальных моделей и на обмене формальными знаниями, такими инструментами сегодня не являются. Не способна в качестве такого инструментария сегодня выступать и интуитивная интеграция знаний лидеров и экспертов, по причине большого и растущего влияния ментальных ограничений управления. В отсутствии же адекватного прогнозирования и контроля современная сложность может грозить упомянутым ранее хаосом или разрушающей экономику и социальную атмосферу «длительной апробацией (тестированием) принципиально новых знаний». А уже это грозит общим падением объёмов ресурсов (сильной рецессией), и склонным к «революциям» кризисом ценностей (как потерей возможности согласования интересов).

В современных концепциях и теориях текущие кризисные процессы трактуются как последствия усложнения финансовых инструментов [21]. Как результат инертности роста спроса при замедлении инновационного развития экономики [22]. Как следствие роста дисбалансов спроса, предложения и кредитно-долговых нагрузок по секторам рынка [23]. Как следствия иных реальных финансово-экономических, политических, социальных, «клановых» механизмов, и как следствие накопленных временем проблемных для экономики результатов активности этих механизмов [21-27].

Ясно, что такие финансово-экономические проблемные результаты, «пузыри» сегодня обострились по причине неэффективного управления экономикой в условиях роста её сложности [21,24-26]. Но главное, что принимаемые сегодня меры по экономии, в том числе бюджетных расходов, как «традиционное ожидание оздоровления» экономики, меры по поддержке ликвидности банков и проблемных бюджетов, и иные финансово-экономические и политические шаги носят в основном тактический характер. И они практически не влияют на основу современного финансово-экономического кризиса, – на кризис управления современной сложностью. Поскольку, по сути, не устраняют влияния нерегулируемых нормами технологий рынка и влияния ментальных ограничений управления. Данные меры даже могут усиливать эти влияния.

Например, политика полной (дальнейшей) приватизации, принимаемая рядом стран для оздоровления своего рынка, может не только поднять его конкурентоспособность, но и создать почву для роста нерегулируемой нормами деятельности и увеличить барьеры для развития рынка реального сектора [10,21]. Меры по вливанию финансов в проблемные банки или бюджеты государств, даже путем экономии бюджетных расходов, могут способствовать развитию неконтролируемых финансовых инструментов [27]. Или можно взять на вооружение в борьбе с кризисом какую-нибудь привлекательную модель или концепцию, например, «в экономике сейчас мало не ликвидности, а конкурентности» [26]. Которая, однако же, не является обеспеченным представлением, и в первую очередь является необеспеченным как открытым представлением. И тогда инициированное этой концепцией «повсеместное» развитие инструментов рынка, при неуправляемой его активности, может умножить бесконтрольное развитие технологий, выкачивающих ресурс из реального сектора экономики.

Такой же необеспеченной концепцией может стать концепция «одновременного снижения бюджетных расходов и развития механизмов стимулирования рынков». Полномасштабное её внедрение в реальный сектор может значительно усложнить рыночные, особенно финансовые инструменты. Может усилить развитие слабоконтролируемых нормами технологий на

рынке. Может существенно понизить прогнозируемость экономических и даже социальных процессов.

Конечно же, все эти и иные концепции заслуживают их конкретного открытого анализа, как заслуживают внимания риторика властей и принимаемые решения. Но в условиях современной сложности необходимо, чтобы базовые концепции и предполагаемые к принятию управленческие решения формировались в поле обеспеченных представлений, а, не только исходя из приоритетов согласования интересов. Это одно из основных предназначений предложенной в настоящей работе технологии со-управления.

**Заключение**

Современная сложность управления состоит в существенном падении возможностей контролировать и прогнозировать поведение социальных систем. И в первую очередь поведение в области финансово-экономических процессов, как процессов, лежащих в основе получения и распределения ресурсов, и в этом смысле определяющих существование и развитие общества.

Одна из основных причин данной сложности управления заключается в быстром развитии и в существенном влиянии на деятельность общества таких технологий активности социальных систем, которые принципиально сложно регулировать нормами и институтами регулирования. Эта причина требует совершенствования существующих и, возможно, создания новых институтов управления активностью социальных систем «со стороны общества» (а не только регулирования нормами).

Другая причина состоит в том, что на деятельность наиболее сложных социальных систем сегодня значительно влияет ментальное ограничение индивидуальных возможностей управления, доставшееся человеку в результате эволюции его мышления. Эта вторая причина требует развития когнитивных технологий управления, способных уменьшать влияние ментальных ограничений управления (или совсем снимать такие ограничения). Причем, современная высокая информационно-технологическая насыщенность деятельности общества неизбежно столкнет институты управления активностью социальных систем с влиянием ментальных ограничений, и с необходимостью в деятельности этих институтов тоже развивать когнитивные технологии управления.

В свою очередь эти причины современной сложности управления порождены активностью ментальной технологии обмена знаниями, как ментальной технологии формализации знаний, реализуемой в процессах человеческого мышления.

Данные причины показывают, что ментальная технология обмена знаниями способна не только улучшать самоорганизацию социальных систем, но и может необратимо её разрушать. Этим поведение социальных систем отличается от поведения в неживой нелинейной физической среде и в среде клеток и животных, где не происходит такого разрушения самоорганизации, способного порождать хаос, не приводящий к новому порядку. И где «не развита» ментальная технология обмена знаниями.

Таким образом, сложность управления не есть просто непрогнозируемый результат загадочного поведения мышления человека. Качество современной сложности управления заключается в появлении сегодня очевидной потребности в управлении сложными социальными процессами. А не только в предоставлении социальным системам возможностей и свобод плыть по самоорганизуемому руслу событий, в окружении самоорганизующихся систем и в поле институтов и норм регулирования. Но «появление потребности в управлении» заключается в необходимости управлять не всеми подряд социальными системами, а наиболее сложными. И «потребность в управлении» состоит не просто в обобщенном управлении социальными процессами и системами, а в применении для этого управления междисциплинарных когнитивных технологий.

**Список литературы**


[1] Prigogine I.: Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes, Wiley: New York (1961); // Prigogine I., George C., Henin F., Rosenfeld L. A Unified Formulation of Dynamics and Thermodynamics. Chemica Scripta, (1973), vol. 4, pp. 5-32.; // Prigogine, I. Order through fluctuation: self-organization and social system. In E. Jantsch and C.H. Waddington (eds), Evolution and Consciousness: Human Systems in Transition, Reading, MA: Addison-Wesley, pp 93-133. (1976).;// Nicolis G., Prigogine I. Self-Organization in Nonequilibrium Systems. – N. Y.: John Wiley & Sons, (1977).; // Misra B., Prigogine I., Courbage M. From Deterministic Dynamics to Probabilistic Description.– Physica, (1979), vol 98A, p. 1-26. ;// Prigogine I., Stengers I.. ORDER OUT OF CHAOS. Man's new dialogue with nature. Heinemann. London. p. 432. (1984).

[2] Haken H. Synergetics: An introduction. Nonequilibrium phase transitions and self-organization in physics, chemistry and biology, Springer Verlag, Berlin, 1977.

[3] Shannon C.E. “A mathematical theory of Communication,” The Bell System Technical Journal. **27**, pp. 379-423, 623-656, 1948.

[4] Ross-Ashby W., An Introduction to Cybernetics, Chapman & Hall (London), 1956; // Ross-Ashby W., "Principles of the Self-Organizing Dynamic System". In: Journal of General Psychology (1947). volume 37, pp. 125-128.

[5] Einstein A., Podolsky B. and Rosen N. Can quantum-mechanical description of reality be considered complete? Physical Review, 47, pp. 777–780, 1935.// Анохин П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. в: Принципы системной организации функций. М., «Наука», 1973, с. 5-61.

[6] Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Основания синергетики. Человек, конструирующий себя и свое будущее. Серия: Синергетика. М.: КомКнига; URSS. 2010. 232 с.

[7] Малинецкий Г.Г., Маненков С.К., Митин Н.А., Шишов В.В. Когнитивный вызов и информационные технологии. Экономические стратегии. №9. 2011. http://spkurdyumov.narod.ru/malmatmit.htm.

[8] Johnson J. The Future of the Social Sciences and Humanities in the Science of Complex Systems. The European Journal of Social Science Research Vol. 23, No. 2, 2010, 115-134

[9] Mainzer K. Challenges of Complexity in the 21st Century. An Interdisciplinary Introduction. European Review, Vol. 17, No. 2, 219–236 *r* 2009. // Mainzer K.: Thinking in Complexity. The Computational Dynamics of Matter, Mind, and Mankind, Springer, New York. 5th edition 2007. 381 pp. ISBN 3-540-72227-4

[10] Пунда Д.И. Когнитивная природа современной сложности управления. В журнале: Труды СПИИРАН. 2011. Вып. 18. С. 320–335. // Пунда Д.И. Юсупов Р.М. Когнитивная природа современной сложности управления. В журнале: Экономические стратегии. 2011. №12. стр. 72-79. http://spkurdyumov.narod.ru/puuunnndd.htm.

[11] Рассел Б. История западной философии. М., 1993. 540 с.

[12] Gödel K. F. "Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme, I." Monatshefte für Mathematik und Physik 38: 173–98, 1931. // Успенский В. А. Теорема Гёделя о неполноте. М.: Наука, 1982. 110 с.

[13] Nagarjuna G. Tracing the Biological Roots of Knowledge. 2006. http://cogprints.org/4896/.

[14] Gell-Mann M. “Simplicity and Complexity in the Description of Nature”, Engineering and Science, a publication of the California Institute of Technology, vol. LI, no.3 (Spring 1988), pp. 3-9.

[15] Марков А.В., "Эволюция человека", два тома. Кн. 1. Обезьяны, кости и гены Кн. 2. Обезьяны, нейроны и душа. Издательство Corpus, 2011 г.

[16] Penrose Roger.The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe. xxviii + 1099 pp., ISBN 0-224-04447-8. Alfred Knopf, 2004.

[17] Пунда Д.И. «Инструмент для руководителя» и современная потребность в обеспеченных представлениях деятельности организационных систем. // В трудах «XIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (июнь 2011 г., Самара, Россия), «Офорт», Самара, 2011, стр. 524-538/ http://www.wsni2003.narod.ru/Programs/Punda1.pdf

[18] Пунда Д.И. Две формы представления деятельности, и когнитивная природа происхождения современного понятия «управление сложностью» // В трудах «XIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», «Офорт», Самара, 2011, стр. 512-523/ http://www.wsni2003.narod.ru/Programs/Punda2.pdf.

[19] Виттих В. А. Проблемы управления и моделирования в сложных искусственных системах. Мехатроника, Автоматизация, Управление. №12, 2010. Стр. 17 – 23.// Vittikh V. A. Complex Artificial

Systems: Control and Modeling Problems. In: Mechatronics, Automation, Control, ISSN 1684-6427. №12, 2010. pp. 17-23.
[20] Ржевский Г. А. Теория сложных систем и мультиагентные технологии: методология для практического использования. Мехатроника, Автоматизация, Управление. №12, 2010. Стр. 23 – 32. // Rzevski G. A. Complexity Science and Agent Technology: Methodology for Practical Applications. In: Mechatronics, Automation, Control, ISSN 1684-6427. №12, 2010. pp. 23 – 32.; // Rzevski, G. Using Tools of Complexity Science to Diagnose Current Financial Crises. ISSN 8756-6990, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2010, Vol.46, No. 2.; // Rzevski, G., Investigating Current Social, Economic and Educational Issues using Framework and Tools of Complexity Science. Journal of the World University Forum, Vol. 1, № 2, 2008, pp. 1-13.
[21] Stiglitz J. Markets Can't Rule Themselves. Newsweek, December 31. (2008). http://www.newsweek.com/id/177447.
[22] Полтерович В.М. "Механизм глобального экономического кризиса и проблемы технологической модернизации"., Электронный ресурс, сайт С.П. Курдюмова, http://spkurdyumov.narod.ru/polterovich.htm // Полтерович В.М. (Под редакцией) "Стратегия модернизации Российской экономики." М.: Алетейя, 2010. – 424 с.
[23] Кобяков А.Б., Хазин М.Л "Закат империи доллара и конец Pax Americana", М., Издательство "Вече", 2003. 368 с. // Хазин М.Л. Теория кризиса., в журнале: Экономика и бизнес, №33(588), 08.09.2008, http://www.profile.ru/items/?item=26923.
[24] Mainzer K: Der kreative Zufall. Wie das Neue in die Welt kommt. München: C.H. Beck Verlag. ISBN 978-3-406-55428-5. 2007. – 293 pp.
[25] Krugman P. R. The Return of Depression Economics and the Crisis of 2008. – ISBN 978-0-393-07101-6; W. W. Norton. 2008. – 224 pp.
[26] Roubini N., Mihm St. Crisis Economics: A Crash Course in the Future of Finance. Penguin Press HC. ISBN 1594202508; 2010. – 368 pp.
[27] Chinn M. D. Frieden Jeff. A. Lost Decades. The Making of America's Debt Crisis and the Long Recovery. Hardcover, Sept. 2011, ISBN 978-0-393-07650-9. 284 pp.

# МОДЕЛИ СОГЛАСОВАННЫХ РЕШЕНИЙ В ПРОЕКТИРОВАНИИ

**Н.М. Боргест**[1, 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 аэрокосмический университет имени ак. С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)
443086, Самара, Московское шоссе, 34, корп. 10, Россия
borgest@yandex.ru
тел: +7 (846) 267-46-46

***Ключевые слова:*** *субъекты проектирования, проектирование, самоорганизация, модель*

**Abstract**
Ontological analysis of design situations, collective decision-making allows us to offer a models of coordinated making at different stages of design. As a basic technological solution to the problem are considered tools that use multi-agent toolkit and realize an agreed solution to the network "Demand-Possibility".

## Введение

В докладе на основе онтологического анализа проектных ситуаций рассматриваются сущностные характеристики субъектов и объектов в проектировании. Прослеживается эволюция процессов, начиная от антропосоциогенеза до современных информационных технологий, включая CAD, CALS и др. Отмечается актуальность разработки моделей согласованных решений в проектировании.

Принятие решений при проектировании сложных технических объектов и систем сопряжено с рядом трудностей, обусловленных многогранностью оценки таких систем, с одной стороны, и необходимостью выработки согласованных действий всех участников процесса, с другой. Например, при создании летательного аппарата работают и принимают решения узкие специалисты из разных предметных областей: маркетологи, экономисты, логисты, аэродинамики, прочнисты, конструкторы, дизайнеры, технологи, двигателисты, материаловеды и др. Онтологический анализ проектных ситуаций коллективного принятия решений позволяет предложить модели выработки согласованных решений на различных этапах проектирования. В качестве базового технологического решения проблемы в докладе рассматриваются программные средства, использующие мультиагентные инструментарии и реализующие получение согласованного решения в сети «Потребность-Возможность». Описываются проблемы трансляции требований и ресурсов в указанную ПВ-сеть со стороны участников проектной деятельности. Приведены модельные примеры выработки согласованных решений, декомпозиции и композиции задач и критериев, а также примеры согласования решений с использованием мультиагентной технологии в области проектирования самолетов.

## 1 Истоки согласованности решений

Попытка проследить начало зарождения согласованных решений неизбежно приведет к истокам зарождения самой жизни. По словам профессора Молевича Е.Ф. «в ходе процессов антропосоциогенеза человечество существует … за счет целенаправленного повседневного

приспособления внешней среды к своим, человеческим, конкретным потребностям и интересам» [1]. Следует отметить, что формирование социума привело к потребности «договариваться», когда возможности и ресурсы кланов, сообществ, семей и отдельных личностей привели к необходимости искать согласия и, в итоге, компромисс в жизненных ситуациях. Биологически заложенная, базовая жизненная потребность «*преобладания*» (доминирования, захвата, власти) начинает трансформироваться в потребность «*согласования*», которая, с одной стороны, дает синергетический, революционный, прорывной эффект развития, а, с другой стороны, позволяет эволюционировать, выдерживая достигнутые договоренности. Этими договоренностями являются установленные правила, законы, конституции, регламенты, понятия и прочие «условности», которые вводятся авторитетным сообществом или единолично, и могут служить основанием и руководством для формирования поведения в жизненных ситуациях.

Целенаправленно приспосабливая среду к своим потребностям, человек вышел на новый уровень моделирования и проектирования будущего. Современные САПР и системы, информационно поддерживающие весь жизненный цикл изделия, активно используют процедуры и регламенты по согласованию решений.

## 2 «Неразрешимые» противоречия

Ряду биологических особей, созданных природой, в том числе и Человеку, свойственно коллективное существование. Человек, став на заре цивилизации социальным млекопитающим, породил неразрешимую проблему сочетания своих собственных жизненных интересов, как особи, и интересов своих сородичей. С одной стороны, синергия любых общественных институтов (семья, род, племя, предприятие и т.д.) очевидна, когда их организационная структура и функционирование совпадает с личным интересом каждого участника. Более того, существование вида зависит от близости векторов личного и общественного интересов. С другой стороны, перманентно локально и временно возникают ситуации, когда личный интерес относительно легко может преобладать над общественным и даже не зависеть от него.

Причины и природа такой «независимости» на разных этажах властной общественной (производственной) пирамиды, организационной иерархии – разная и проявляется ситуационно. Налицо как минимум три фактора влияющие на поведение индивида или группы лиц. Это традиционно внешние (социум и среда), внутренние (гены и душа) и накопленный жизненный опыт. Науки, их изучающие, это социология, психология и экспириентология [2], как неотъемлемая часть онтологии, ориентированная на анализ и понимание персонифицированного бытия уникального единичного сущего. Нельзя не вспомнить здесь гениального Пушкина А.С.

О сколько нам открытий чудных
Готовит просвещенья дух,
И *опыт*, сын ошибок трудных,
И *гений*, парадоксов друг,
И *случай*, бог изобретатель…

Возвращаясь к внутренней и внешней борьбе интересов личного и общественного, к борьбе объективно присущей, свойственной человеку в его ипостаси, следует заметить, что в целом, переделывая мир под себя, человек интуитивно ищет согласие с собой, обществом, природой. При этом атомизация, отсутствие интереса и предельный случай – суицид, все это сигналы потери ориентиров в развитии общества, отсутствие мотивации в созидательной деятельности. И напротив, спаеность, нацеленость, самоотдача и коллективизм являют результат позитивного развития общества. Но как всегда, «дьявол» в деталях, в мелочах проявляется суть. Поэтому «и *опыт*,.. и *гений*,.. и *случай*» – всё важно в модели согласованных решений.

Системно и комплексно рассматривая вопросы согласованности решений в любых сферах и отраслях человеческой деятельности, нельзя обойти вопросы общественных (корпоративных, государственных) и личных (частных) интересов. Практика показывает, что упрощен-

ная парадигма «человек-функция» дает сбои, и последствия их могут быть губительными [3]. К сожалению, механизма, способного выявить психические «отклонения» от гениальности, «благих намерений» от «злого умысла», нет. Пока нет.

### 3 Сущности в проектировании

*Объекты проектирования* – реальные и виртуальные сущности, разрабатываемые субъектами проектирования. К объектам проектирования относятся: материальные объекты, системы, машины, механизмы, компьютеры, а также программное обеспечение.

Обобщая и развивая можно сказать, что объекты проектирования, как часть созданной человеком культурной среды в виртуальном воплощении, представляют собой «будущее, представленное в идеальных формах в сознании людей, которое материализуется в развивающихся системах в настоящем» [4].

*Субъекты проектирования* – разумные сущности, участвующие в процессе создания артефакта – объекта проектирования. К ним относятся: специалисты (онтолог, когнитолог, психолог, маркетолог, проектант, конструктор, прочнист, аэродинамик, технолог, экономист, эксплуатационник, исполнитель..), организованная группа специалистов (предприятие, проектное бюро, институт, лаборатория..), заказчик (потребитель, пользователь, клиент..). Субъекты проектирования являются носителями знаний, а также обладают свойствами не только передавать, получать и обрабатывать знания, но и присущей им самоорганизацией и целеполаганием.

Субъекты проектирования фактически являются лицами, принимающие решения (ЛПР), но со своим уровнем влияния и ответственности. Важным качеством или свойством ЛПР является их мотивированность и закрепленная степень ответственности [5], так как место унифицируемого субъекта, по утверждению В.А. Виттиха, занимает человеческая личность [4].

Сотрудник (работник, проектант), как элемент производственного сообщества, должен выполнять определенную функцию, в том числе, осуществлять коммуникативную и самоорганизующую деятельность. Отмеченное внутреннее противоречие между общественными и личными интересами говорит о том, что согласование в большей степени относится к области социологии и психологии, а затем уже к содержательной стороне предмета выбора и согласования решения. Полет на Луну  или Марс, проект ядерной бомбы или iPhone, покупка авиазавода или велосипеда для прогулок – весь этот бесконечный перечень глобальный идей и простых человеческих желаний, воплощение которых в жизнь во многом зависит от анализа соотношения «Потребности-Возможности» и в большей степени исходит из предпочтений и свойств личностей. Отсюда и неразрешимая проблема человеческого фактора в создании, использовании и функционировании артефактов, так как именно содержательная сторона личностей воплощена в созданную им культурную среду [1, 4].

Укрупнено механизмы принятия решения, в том числе, в проектировании можно определить как коллегиальные, авторитарные и смешанные. В ряде случаев, удается формализовать принятие решений и поручить право выбора автомату (компьютеру). Современное проектирование традиционных систем и объектов все в большей степени формализуется и порой больше напоминает производственную логистику, нежели творческий акт. В этом случае можно уже говорить о грядущей роботизации проектной деятельности [6, 7].

В зависимости от содержания и вложенного смысла *согласование* может быть: компромиссом, исполнением требований, разрешением на исполнение.

Уровень «разрешения на исполнение» относится к категориям фактически уже выполненных, разработанных проектов, для которых требуются лишь формальное согласование с контролирующими органами. Согласование требований в процессе разработки проекта – это типовой случай «внутренней» согласованности решений между проектантами по параметрам и характеристикам объектов и комплектующих, в соответствии с установленными требованиями, стандартами, правилами и нормами. Эти два уровни технологичны и в основном без

особых компромиссов, поэтому хорошо формализуются, о чем свидетельствуют бесчисленное количество разработанных систем, реализующих принципы и стандарты качества (системы менеджмента качества).

Уровень согласования, когда компромисс не просто допустим, но единственный способ дальнейшей проработки проекта, – самый сложный, так как плохо формализуем и напрямую зависит от личностных качеств и предпочтений заказчиков и исполнителей (субъектов проектирования). Здесь, конечно, эффективным и обоснованным решением с позиции интерсубъективной теории видятся решения, в которых «соглашение достигается в результате аргументации, а не принуждения» [8]. Что фактически переводит «волевые» решения в плоскость логической обоснованности, в плоскость объективных знаний.

Примером такой аргументации могут являться результаты исследований влияния различных факторов на частные показатели и критерии, характеризующие как исследуемый объект, так и систему в целом. На рисунке 1, в качестве примера показано как влияет изменение параметров двигателя (степень сжатия в компрессоре) и крыла (удлинение крыла) на характеристики этих объектов и на интегральный критерий самолета – его взлетную массу.

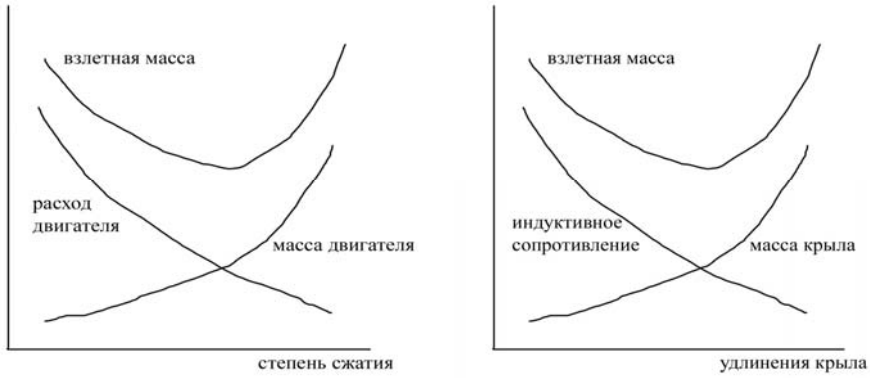



Рисунок 1 – Пример обоснования выбора параметров двигателя и крыла самолета

Из рисунка 1 видно, как формируются оптимальные значения параметров двигателя (степень сжатия в компрессоре) и крыла самолета (удлинение крыла) за счет противоположного влияния их частных показателей (рост массы крыла и двигателя, падение индуктивного сопротивления крыла и расхода топлива в двигателе). Фактически согласование решений по выбору параметров здесь сродни оптимизации этих параметров. Компромиссом (согласованным решениям) между расходом топлива на полет и массой конструкции двигателя, индуктивным сопротивлением крыла и его массой является сформированная физически обоснованная свертка в виде интегрального критерия более высокого в иерархическом плане. В данном случае это взлетная масса самолета. Именно этот критерий комплексно оценивает эффективность функционирования всей системы самолет, согласуя между собой частные показатели объектов, входящих в систему самолет.

## 4 Композиция и декомпозиция задач

Модель согласованных решений не может создаваться в отрыве от онтологического анализа предметной области. Именно он предваряет отработку процедур принятия решений.

Разрабатываемое научное направление *онтология проектирования* включает в себя: исследование понятийного аппарата и разработки на его основе тезауруса, анализ критериев и

моделей проектируемого объекта, методов и сценариев проектирования, сбор и обработку информации об объекте как системы и составляющих его элементах [9].

Проектирование как процесс и область знаний об артефакте является предметом онтологического анализа ученых-исследователей и узких специалистов. Онтология проектирования, ее понятийный аппарат, ее базовые принципы – инвариантны к предметной области, в то время как само проектирование, как деятельность, всегда предметно, всегда объектно-ориентировано. Развиваясь как научная дисциплина, онтология проектирования вбирает и обобщает накопленный опыт из разных предметных областей. Онтологию проектирования можно определить как формализованное описание знаний субъектов проектирования о процессе проектирования новых или модернизаций уже известных артефактов, включая знания о самом объекте проектирования и близких к нему по свойствам артефактов, а также тезаурус предметной области [9].

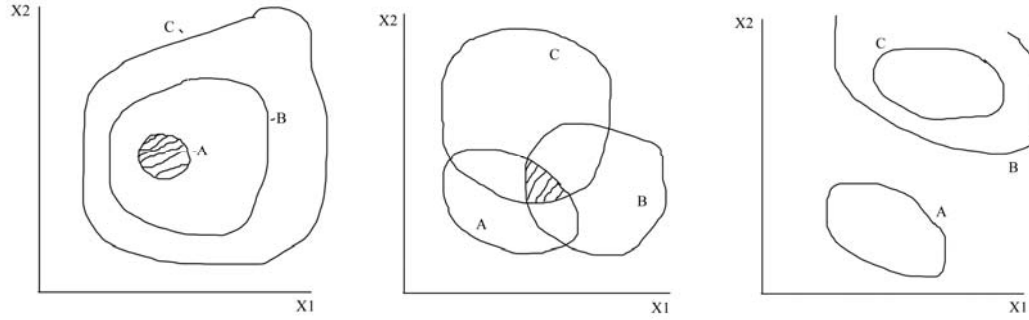
Декомпозиция, ставшая де факто стандартом в проектировании практически любых объектом и систем, базируется на онтологическом анализе и является во многом его результатом. Даже такой интегрированный объект как самолет декомпозируется на агрегаты (крыло, фюзеляж, шасси и др.), его подсистема – авиационный двигатель – на узлы (компрессор, турбина, камера сгорания и др.). В соответствии с декомпозицией сложного объекта или системы формируется и организационная структура самого проектного бюро, в котором создаются соответствующие отделы, лаборатории и бригады. В самолетном конструкторском бюро (КБ) это отделы крыла, оперения, фюзеляжа и др., а в двигательном КБ – отделы компрессора, турбины и др. Помимо отделов, сформированных по объектному принципу, создаются тематические отделы: прочности, аэродинамики, термодинамики, аванпроектов и др.

В отделе аванпроектов или главным конструктором формулируются требования и критерии для подразделений, разрабатывающих агрегаты и узлы. Общие интегральные критерии, оценивающие весь объект или систему целиком, декомпозируются на группу частных критериев. Например, известно, что такие интегральные показатели как себестоимость перевозок, удельные затраты топлива на тонно- или пассажиро-километр хорошо коррелируются с таким техническим параметром как взлетная масса самолета, которая в свою очередь состоит из масс частей самолета. «Борьба» за массу сопровождает весь цикл создания самолета. Потребные тяги и расход топлива, масса и габариты силовой установки для самолета определяют требования для авиационного двигателя. Ставшие для авиационного двигателя критерии далее декомпозируются для «узловиков» в требования не только по массе и габаритам, но в первую очередь в требования к уровню к.п.д. узлов, коэффициентов потерь, надежности и ресурсу.

По мере формализации процессов проектирования и разработки интегрированных предметных и объектных моделей удается совместно решать задачи, которые ранее декомпозировали и решали дифференцированно. Так, например, задачи по прочности и аэродинамике крыла, решаемые по отдельности и итерационно коммуникативно выходя на итоговый результат, используя свои частные критерии по прочности и аэродинамическому качеству, сейчас удается решать, используя критерий более высокого уровня – взлетную массу самолета. Подобные критерии используются также при определении оптимальных параметров рабочего процесса проектируемого двигателя для самолета. Такая интеграция разработанных моделей обычно типична для начального этапа проектирования. Однако стоит отметить, что в композиции моделей участвуют те модели, которые ранее исследовались лишь на частных показателях, т.е. наметившаяся в конце 20 столетия тенденция использования моделей более высокого уровня на ранних стадиях проектирования сохраняется [10].

Фактически происходит процесс обратный декомпозиции – это процесс композиции моделей, когда отработанные, исследованные, изученные предметные модели агрегатов и узлов интегрируются в единую систему, в которой мерой оценки является уже не частные показатели, а показатели самой проектируемой системы.

О сходящихся и расходящихся критериях проектируемой системы писал еще в свое время Дитрих Я. [11]. Графическая интерпретация такой сходимости или в нашем случае согласованности представлена на рисунке 2. Например, можно говорить, что в случае а) и б) на рисунке 2 аналогами критериев А, В и С для самолета могут быть такие критерии, как взлетная масса самолета, удельные затраты топлива на пассажиро-километр и себестоимость перевозок. Здесь проектными переменными Х1 и Х2 могли бы быть, например, нагрузка на крыло и удлинение крыла или стреловидность крыла и крейсерская скорость самолета. Если бы связь, сходимость или согласованность показателя взлетная масса самолета с другими показателями соответствовала бы случаю в), изображенному на рисунке 2, то использовать взлетную массу самолета в качестве критерия было бы, очевидно, нельзя. Так как параметры самолета, соответствующие минимальной взлетной массе самолета не соответствовали бы минимальной себестоимости перевозок и минимальному удельному расходу топлива. А ведь именно эти критерии и являются теми показателями, по которым оценивается эффективность функционирования системы самолет.




а) б) в)

Рисунок 2 – Примеры согласованности (а), частичной согласованности (б) и не согласованности (в)
А, В, С – критерии системы. Х1, Х2 – проектные параметры системы

## 5 Согласование потребности и возможности

Широко используемые мультиагентные технологии, базирующиеся на генерации процесса матчинга в ПВ-сетях, могут найти применение и в проектной деятельности [12]. Рассматривая процесс проектирования как совокупность проектных процедур и операций, результатом выполнения которых должен быть выбор из альтернатив, задав критерии и условия выбора можно применить вышеназванную технологию.

На рисунке 3 приведен один из примеров, решаемых в процессе проектирования самолета, в частности, задача выбора самолета из базы данных готовых проектов. Условием выбора было выполнение требований конкретного технического задания (ТЗ) по дальности полета и числу пассажиров при минимальной взлетной массе самолета. Из рисунка 3 видно, что из рассмотренных в базе данных девяти проектов, три проекта (2, 4 и 7-й) не удовлетворили условиям ТЗ (пунктирные линии между Project_Plane и BD_Plane отсутствуют на рисунке), а из оставшихся 3-й проект имел минимальную взлетную массу (на рисунке эта связь показана сплошной линией). Аналогичным образом осуществляется проектная процедура по выбору двигателя под проектируемый или модернизируемый самолет. Здесь в качестве условий матчинга выступают требования по обеспечению потребной для самолета тяги и ограничений по максимально допустимому расходу топлива на основных режимах полета, в также требования по массе и габаритам двигателя. Помимо функциональных требований формируются эконо-

мические и экологические требования по надежности, межремонтному ресурсу, стоимости, шуму, эмиссии и др.

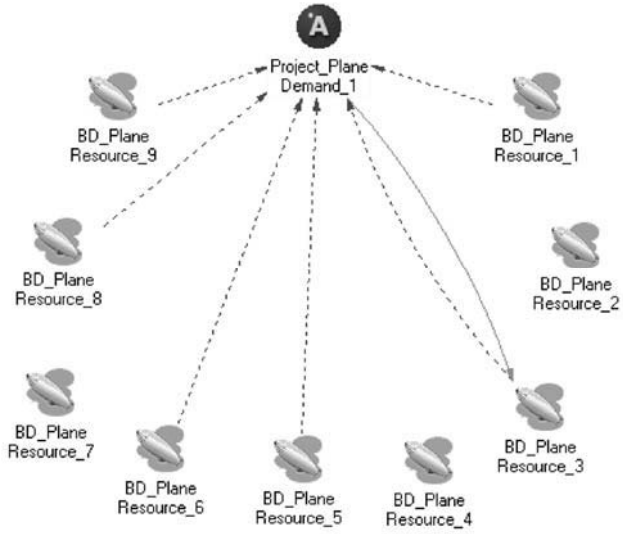



Рисунок 3 – Примеры результата матчинга по выбору самолета под заданное техническое задание [12]

Одной из важных задач в поиске согласованных решений при проектировании является задача трансляции требований и ресурсов в указанную ПВ-сеть со стороны участников проектной деятельности. Эта часть работы ложится на узких специалистов предметников, которые формируют фактически базу знаний проектанта в виде правил и соотношений, определяющих в конечном итоге будущий матчинг.

Согласованные решения не мыслимы также и без профессионального тезауруса конкретной предметной области. Определение понятий, однозначно понимаемых всеми участниками проектной деятельности, реализация корректной идентификации и размерности в используемых компьютерных системах всех циркулирующих в них данных (параметров и характеристик, переменных и функций, показателей и критериев) – не только обеспечат взаимосвязь баз данных, процедур и знаний в модели проектируемого объекта, но и будет способствовать выработке решений по параметрам будущего объекта.

**Список литературы**

[1] Молевич Е.Ф. Общество как система и процесс: социально-философское введение в социологию. – Самара: Издательство «Самарский университет», 2011.

[2] Шведин Б.Я. Онтология предприятия: экспириентологический подход: Технология построения онтологической модели предприятия. – М.: Ленанд. 2010.

[3] Филатов Т.В. Грядущий апокалипсис: обзор основных сценариев эксистенциального упразднения человечества: монография. – Самара: Изд-во СГСА, 2008.

[4] Виттих В.А. Когнитология развивающихся систем: препринт. – Самара: ИПУСС РАН, 2011.

[5] Боргест Н.М. Принципы управления вузом на основе самоорганизации // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIII международной конференции (15-17 июня 2011 г., Самара, Россия). – Самара: Самарский НЦ РАН, 2011. – С. 391-400.

[6] Маслаков М.А., Якимов В.Н. Управление бизнес-процессами как основа построения комплексной системы управления проектированием//Информационные средства и технологии: Труды Международной научно-практической конференции Том 3. – М.: МЭИ, 2007.– С. 216-220.

[7] Боргест Н.М., Шустова Д.В. Роботизация проектной деятельности // Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов 16-й междунар.научной конференции. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011.–180с.
[8] Виттих В.А. Управление ситуациями в сложных развивающихся системах с примененим интерсубъективных теорий: препринт. – Самара: ИПУСС РАН, 2011.
[9] Боргест Н.М. Онтология проектирования: теоретические основы. Часть 1. Понятия и принципы: Учеб. пособие. – Самара: Изд-во СГАУ, 2010.
[10] Боргест Н.М. Автоматизация предварительного проектирования самолета. Учеб. пособие. Самара: САУ, 1992.
[11] Дитрих Я. Проектирование и конструирование: системный подход. – М.: Мир, 1981.
[12] Боргест Н.М., Е.В. Симонова. Использование онтологии при выборе самолета под заданное техническое задание. – Самара: Изд-во СГАУ, 2008.

# МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬЮ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

**Г.Х. Ирзаев**

Дагестанский государственный технический университет
367015, Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия
irzajev@mail.ru
тел: +7 (8722) 62-00-58

***Ключевые слова:*** *технологичность изделия, модель системы управления технологичностью, функциональная структура, функциональное ядро, распределенная совокупность задач*

**Abstract**

The model of function of management by adaptability to manufacture of products on time horizons is offered, classification of control systems by adaptability to manufacture is constructed. Methodological approaches to construction of functional structure of a control system by adaptability to manufacture of products machine - and instrument making are developed. The detailed model of functional structure which is under construction of a specialized functional kernel is offered, sets of nonspecific and specific problems of working off of adaptability to manufacture, distributed on traditional subsystems of the enterprise and structure of functional communications between a kernel and the distributed set of problems.

## Введение

Комплексный характер проблемы обеспечения технологичности конструкций промышленных изделий (далее – технологичности изделий), сложность процессов управления отдельными подсистемами предприятия из-за разнообразия их целей и возрастание их влияния на технологичность, динамизм внешней среды и уменьшение периода ценности принятых решений предопределяют необходимость создания системы управления технологичностью изделий (СУТИ). Такая система сегодня еще не нашла широкого распространения на промышленных предприятиях в силу неразвитости методического аппарата, отсутствия типовой структуры и системности в управлении технологичностью создаваемых изделий, хотя проблема совершенствования системы и механизмов управления технологичностью изделий является попрежнему актуальной и требует серьезной теоретической и методической проработки [1].

СУТИ представляет собой совокупность взаимодействующих управляющих органов, объектов управления и управляющих воздействий, которые направлены на достижение поставленных заранее целей управления в виде придания конструкции такого комплекса свойств, при котором достигаются оптимальные значения затрат всех видов ресурсов при производстве, эксплуатации и ремонте изделия для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ.

СУТИ может быть признана сложной системой с присущими ей признаками робастности, разнообразия межэлементных связей, эмерджентности и должна функционировать непрерывно на всех этапах разработки, изготовления и эксплуатации серийных, вновь создаваемых перспективных изделий и базироваться на совокупности взаимосвязанных научно-методических разработок и нормативно-технических документов [2]. Система должна выполнять планирование программ обеспечения технологичности изделий и доводить их до заданного уровня, вести учет достигнутого уровня технологичности с помощью отраслевой системы показателей, осуществлять технологический контроль конструкторской документации (КД), регулировать

ход выполнения мероприятий по обеспечению технологичности изделия и не допускать постановки на производство нетехнологичных изделий.

## 1 Разработка модели управления технологичностью по временным горизонтам

Одним из важнейших этапов моделирования, построения и анализа СУТИ является их классификация по признакам, характеризующим их цели, показатели деятельности и функции в рамках соответствующих системообразующих элементов предприятия.

Для установления содержания и связей функций управленческого цикла необходимо идентифицировать их относительно контура управления технологичностью изделий, где можно применить показанную на рисунке 1 модель функции управления по всем временным горизонтам, охватывающую стратегический и тактический уровни управления.

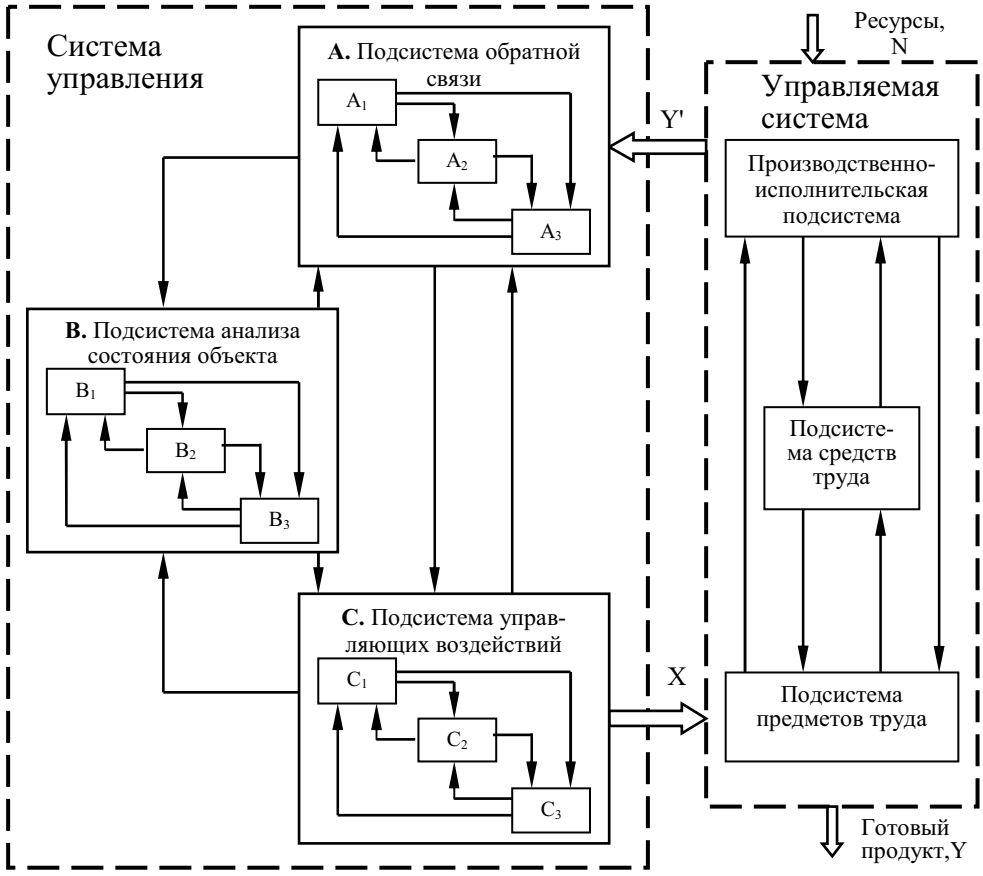



Рисунок 1 – Схема модели функции управления по всем временным горизонтам

В схеме подсистема анализа состояния объекта *B* реализует принятие решений в трех блоках по функциям: $B_1$ − формирование системообразующих элементов предприятия (целей, показателей, методов функционирования и др.); $B_2$ – анализ, прогноз и оценка состояния объектов; $B_3$ – разработка стратегии управления, установление ограничений и результатов.

Функции управляющих воздействий реализуются подсистемой *C* на основе управляющей информации, поступающей из подсистемы *B*, и исходной – из подсистемы *A*. Блоки подсистемы *C* выполняют следующие функции: $C_1$ – структуризация элементов процессов (задач, ре-

сурсов, функционирующих звеньев); $C_2$ – распределение задач и ресурсов, формирование норм и правил функционирования, подготовки всех видов связей; $C_3$ – выбор форм и характеристик управления воздействиями, мотивировки и реализации воздействий.

Подсистема $A$ реализует обратную связь и следующие информационно-контрольные функции: $A_1$ – сбор данных; $A_2$ – обработка и накопление данных; $A_3$ – контроль за состоянием объекта управления. Введенные модели дают возможность идентифицировать управленческие функции. В частности, можно убедиться в том, что расширенная трактовка функции планирования отвечает содержанию подсистемы $B$ и блока $C_1$, а в более узком смысле она совпадает с блоком $B_3$. Функции организации в узком смысле можно поставить в соответствие содержание блока $C_2$, а в более широком смысле – всей подсистемы $C$. Таким образом, все функции управленческого цикла могут быть наложены на блоки $B_i$ и $C_i$ ( $i$ = 1, 2, 3), тем самым между ними будут установлены все прямые и обратные связи в контуре управления.

Построим пространство классификационных признаков в виде трехмерной матрицы, в котором по осям $X$, $Y$, $Z$ представим соответственно признаки горизонтов функционирования $D$ (стратегический, тактический, оперативный), стадий жизненного цикла изделия $G$ (проектирование, изготовление, эксплуатация), характера показателей деятельности $F$ (общепроизводственные, конструкторские, технологические). Трехмерная координата интегрального признака СУТИ определяется пересечением координатных плоскостей. Множество возможных сочетаний классификационных признаков обуславливает полную совокупность классов СУТИ, характеризуемых набором интегральных признаков. Для удобства восприятия представим эту совокупность в виде таблицы 1, на которой явно обозначены три класса СУТИ.

Таблица 1 – Классификация систем управления технологичностью промышленных изделий

| Признак классификации | Класс систем | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| Временные горизонты управления | Стратегический, тактический, оперативный | Тактический, оперативный | Оперативный |
| Стадии жизненного цикла изделия | Проектирование, изготовление, эксплуатация | Проектирование, изготовление | Изготовление |
| Характер показателей | Общепроизводственные, конструкторские, технологические | Общепроизводственные, конструкторские | Технологические |

Из таблицы видно, что системы 1 класса предназначены для достижения целей управления технологичностью разрабатываемых и осваиваемых в производстве изделий, классифицированных по всем признакам пространства 0$XYZ$ при разных степенях полноты и сложности их отношений. Системы 2 класса предназначены для управления технологичностью на тактическом и оперативном горизонтах на стадиях проектирования и изготовления продукции с целью достижения заданных значений общепроизводственных и конструкторских показателей деятельности в этой области. Системы 3 класса реализуют процессы управления технологичностью на стадии изготовления по технологическим показателям изделий.

Используя целевой подход, можно сделать следующие заключения по классам СУТИ. Системы 1 класса должны использовать все механизмы управления технологичностью, т. е. воздействовать на технологичность продукции не только путем решения специфических задач управления, но и через формирование и развитие внутрипроизводственного потенциала, структуры потребления и связей с поставщиками, повышение организационно-технического уровня производства. Система такого класса дает возможность создания изделий высокого

технического уровня, является необходимым условием рационального использования ресурсов, снижения трудоемкости и себестоимости выпускаемой продукции.

Системы 2 класса являются средством реализации общеспецифических и узкоориентированных механизмов управления. Они базируются на сформированных в рамках предприятия функциональной и организационной структурах управления технологичностью, включающих принципиально новые элементы, обеспечивающие целостность созданных структур и новые виды специфической деятельности в области управления технологичностью, а также прежние элементы, модернизированные с учетом внешних и внутренних требований.

Системы 3 класса, охватывая сравнительно узкую сферу деятельности предприятия, базируются на узкоспецифических механизмах управления технологичностью продукции.

Для более детальной классификации действующих и разрабатываемых систем в рамках общих признаков, приведенных в таблице, был разработан структурированный перечень целей управления и показателей деятельности по обеспечению технологичности продукции на предприятии. Этот перечень является основой для выбора типовой или индивидуальной совокупности целей, согласно которой строятся все остальные системообразующие элементы. В свою очередь, выбор целей должен отвечать общему назначению предприятия, перспективным и текущим требованиям к уровню технологичности изделий.

## 2 Разработка метода построения функциональной структуры системы управления технологичностью промышленных изделий

Установленная структура системы целей в области управления технологичностью и введенные представления о механизмах управления позволяют разработать методологические подходы к построению функциональной структуры (ФС) СУТИ, близкие к системотехническому методу системного анализа [3].

1. Формулирование требований к формированию ФС СУТИ.

ФС СУТИ есть часть функциональной структуры предприятия, поэтому она должна содержать элементы, подсистемы, задачи, предназначенные для достижения внешних и внутренних целей его развития в области обеспечения технологичности выпускаемой продукции, экономного использования материальных, энергетических и трудовых ресурсов при создании, применении и обновлении современных сложных изделий, обеспечения выполнения заданных требований к качеству процессов функционирования предприятия и их результатов. В то же время ФС СУТИ должна обладать необходимыми разнообразием и полнотой адекватных по составу и сложности характеристик технологичности управляемых объектов, т. е. включать организационное и методическое управления, дифференцированные по временным горизонтам и контурам функционирования предприятия.

Разнообразие механизмов управления технологичностью должно быть отражено в качественно различных элементах ФС, а именно: традиционные задачи, дополненные параметрами технологичности; новые задачи управления технологичностью, дополняющие традиционные. В ФС СУТИ должны органически входить и быть связаны в контурах управления такие специфические и узкоспецифические функции управления технологичностью, как анализ, прогнозирование, оценка, планирование технологичности, организация управления технологичностью, контроль, стимулирование и др.

Целостность ФС СУТИ, содержащей разнородные элементы, должна быть обеспечена введением механизмов их интеграции и координации как между собой, так и относительно других систем ФС предприятия. ФС должна обладать гибкостью и упреждающей адаптивностью основных элементов к изменениям во внешней и внутренней средах.

2. Выбор принципа построения ФС СУТИ согласно установленным требованиям.

Как вытекает из анализа этих требований, ФС СУТИ нельзя строить ни как структуру отдельной подсистемы в рамках ФС предприятия, ни как совокупность связанных задач, распре-

деленных по традиционным подсистемам. Удовлетворить сформулированным требованиям можно, если ввести интегративный принцип конструирования. ФС СУТИ должна состоять из трех взаимосвязанных частей: специализированного функционального ядра, обладающего собственной внутренней структурой; распределенной по традиционным подсистемам совокупности неспецифических и специфических задач, связи между которыми формируются в рамках ФС предприятия; структуры внутренних функциональных связей между ядром и распределенной совокупностью задач.

Функциональное ядро предназначено для обеспечения целостности и жизнеспособности СУТИ, изменения, сохранения и воспроизводства специфических механизмов управления технологичностью. Таким образом, по нашему мнению, в его состав должны войти взаимоувязанные в контурах организационного и методического управления задачи интеграции, перспективной и текущей координации всех сфер деятельности предприятия в области технологичности продукции, а также узкоспецифические задачи управления технологичностью, носящие координационно-интеграционный характер.

Неспецифические и общеспецифические задачи управления технологичностью, распределенные по традиционным подсистемам управления, концентрируются в процессах их основной деятельности, организационного и методического управления. Связи между задачами ФС СУТИ, а также между этими задачами и другими элементами ФС предприятия являются объектами вертикальной и горизонтальной координации.

3. Построение обобщенной модели состава ФС СУТИ.

Описанная конструкция ФС СУТИ создает основу для формирования различных программно-целевых механизмов управления.

Задачи стратегического горизонта образуют цикл от сбора и упорядочения внешней и внутренней информации, необходимой для выработки стратегии развития предприятия, до принятия долгосрочных программ и планов ее научно-технического, экономического и социального развития, в рамках которых предусмотрены работы по обеспечению и повышению технологичности выпускаемых изделий. Воздействие решений стратегического горизонта охватывает временной интервал, который может быть связан со сменой одного или нескольких поколений разрабатываемых, осваиваемых и выпускаемых изделий при коренной реконструкции материально-технической базы производства. В соответствии со структурой контура управления при решении задач информационно-контрольной подсистемы формируются данные об эффективности функционирования предприятия, тенденциях развития сферы потребления и т. п. В подсистеме принятия решений реализуются задачи анализа и оценки деятельности предприятия в области технического уровня и технологичности продукции, прогнозирования повышения и изменения требований в сфере потребления, выбора концепции развития предприятия, установления основных целей и стратегий их достижения, формирования целевых программ. Задачи подсистемы управляющих воздействий направлены на создание долгосрочных планов, содержащих целевые показатели, сбалансированные планы работ и развития ресурсов. Реализация этапов долгосрочных планов связана с достижением целей тактического горизонта управления, к которому можно отнести цикл: принятие решения о разработке, освоении и последующем производстве нового вида продукции (или модернизация выпускаемой) – установление показателей технологичности, себестоимости изделия и требований к процессам его производства и эксплуатации – выбор форм обеспечения технологичности, технологий реализации производства – планирование и организация разработки и производства – создание программ обеспечения технологичности – конструкторская и технологическая подготовка производства – выпуск изделий – анализ и оценка результатов эксплуатации – стимулирование повышения технологичности.

Поскольку в рамках описанных контуров управления возникают новые задачи, связанные с дифференциацией процессов управления и производства по параметрам технологичности, то для обеспечения их согласованности относительно контуров и горизонтов управления, стадий

жизненного цикла продукции и т. д. должна быть введена их временная, пространственная и технологическая интеграция. Суть ее заключается в регулярном установлении и поддержании связей между задачами управления технологичностью, распределенными в традиционных подсистемах и входящими в состав функционального ядра. Следовательно, выполнение задач интеграции обеспечивает создание и последующую адаптацию ФС СУТИ к внешним и внутренним изменениям и тем самым формирует основу организации управления технологичностью продукции.

Согласованное решение взаимосвязанных задач управления технологичностью достигается путем введения специальных задач их долгосрочной, среднесрочной и краткосрочной координации. На стратегическом и тактическом горизонтах координация может быть реализована в форме создания и осуществления комплексных программ, а на оперативном – в форме регулирования функциональных, информационных и организационных связей как в рамках этих программ, так и в соответствии с возникающими внештатными ситуациями.

4. Формирование детализированной модели ФС СУТИ.

На основе анализа и обобщения передового опыта, а также введенных выше требований и принципов построения ФС и с учетом содержания контуров управления, задач интеграции и координации структуру функционального ядра представим в виде, показанном на рисунке 2.

В разработанном варианте ФС предусмотрена дифференциация контуров всех горизонтов для организационного управления. В то же время состав подсистем в контуре каждого горизонта управления сформирован так, чтобы их функционирование обеспечивало интеграцию, скоординированность и специфичность процессов достижения долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных целей предприятия в области обеспечения технологичности разрабатываемой, осваиваемой продукции. В схему заложены принципы интеграции, координации и специализации деятельности по управлению технологичностью изделий внутри предприятия, что в целом увеличивает и динамическую устойчивость его функционирования. Наиболее важные функции управления технологичностью (планирование, прогнозирование, нормирование, контроль, учет) на рассматриваемой схеме размещены и идентифицированы по позициям определенных функциональных подсистем контура управления (см. рисунок 1). Это устанавливает общие требования к составу, внутренней структуре и связям, закладывает принцип преемственности структурного развития функций управления технологичностью.

5. Анализ возможных принципов действия ФС СУТИ на основе модели.

В зависимости от уровня решаемых задач можно варьировать выбор схемы определенными вариантами структур подсистем и их связей. Так, например, если отключить связи блоков стратегического и тактического управления, получим схему, основанную на принципе координации текущей деятельности предприятия по управлению технологичностью изделий и выполнения автономных узкоспецифических функций управления технологичностью (например, оперативная оценка показателей технологичности, поэлементная отработка технических решений, оперативная корректировка программ обеспечения технологичности изделий и др.). Если же отключить в схеме, наоборот, оперативный горизонт управления технологичностью, то обеспечивается централизация организационно-технической подготовки обеспечения технологичности изделий и децентрализация по стадиям жизненного цикла текущего регулирования технологичности продукции.

Таким образом, варьируя выбор схем в зависимости от прогнозной или текущей производственной ситуации, можно обеспечить динамическую адаптацию системы управления технологичностью к складывающейся на предприятии и вне его обстановке, требованиям заказчиков, потребителей.

Согласно приведенной ранее в таблице классификации СУТИ, функциональная структура систем 1 класса должна основываться на концепции функционального ядра, совокупности неспецифических и специфических задач, структуры внутренних функциональных связей между ними.

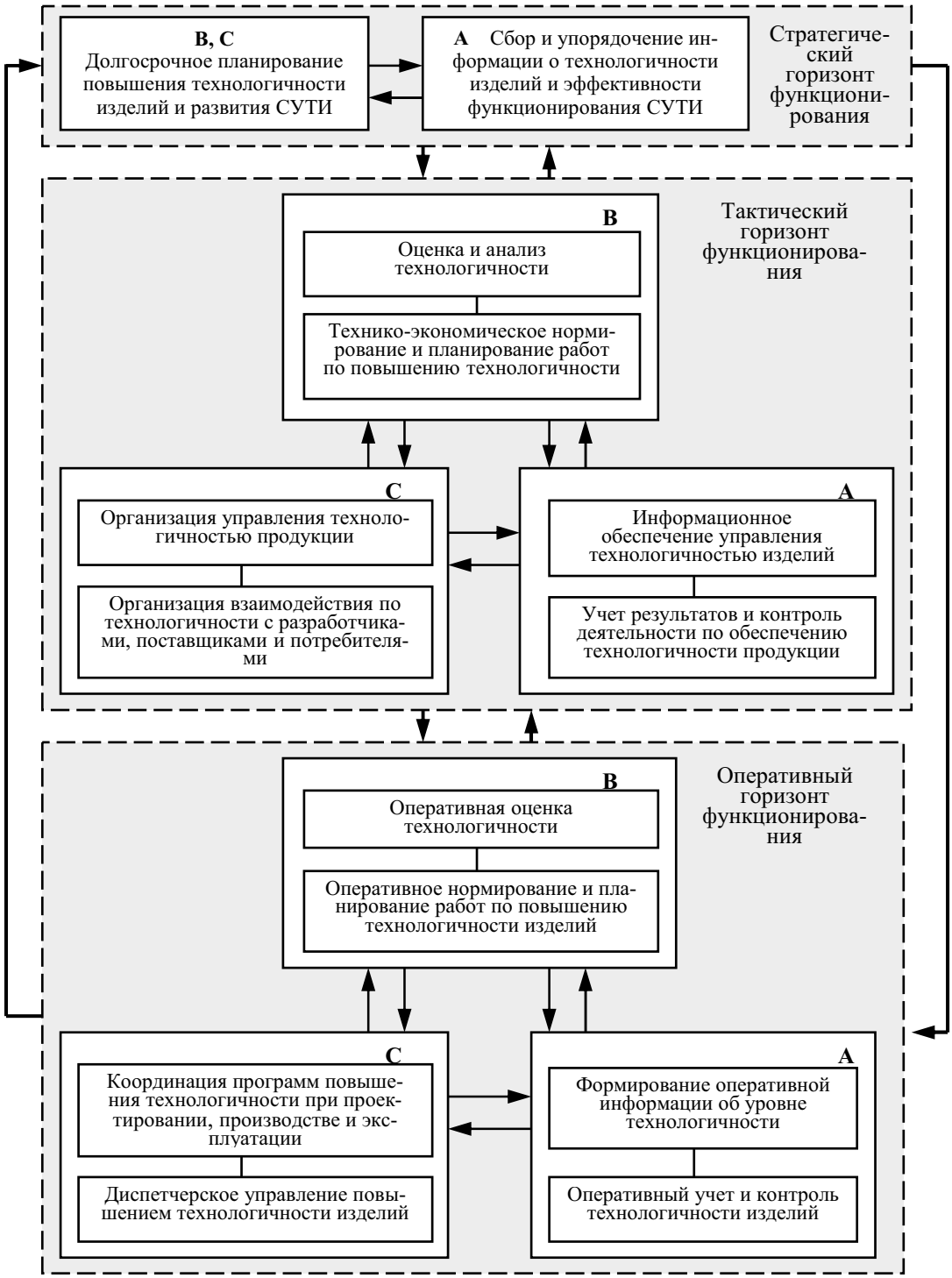



Рисунок 2 − Схема функциональной структуры СУТИ

Она охватывает все горизонты управления и все виды деятельности по управлению технологичностью на предприятии. ФС систем 2 класса базируется на общих и линейных подсистемах с использованием программно-целевой схемы по отдельным подсистемам организационного и технико-методического управления при автономном выполнении необходимых специфических функций управления технологичностью на тактическом горизонте. ФС систем 3 класса должна ориентироваться на применение программно-целевой схемы при оперативном управлении необходимыми специфическими функциями СУТИ.

Схема СУТИ в виде функционального ядра обеспечивает устойчивое функционирование и гибкую адаптивность, расширяет набор возможных вариантов и их качество за счет осознанного выбора различных сочетаний принципов построения и действия, создает предпосылки для рационализации организационных структур в пределах заданных ограничений.

**Заключение**

Предложенный конструктивный способ построения ФС отражает существенные свойства систем управления сложными объектами и принципы их действия.

С помощью системного проектирования становится возможным принципиальное изменение стратегии совершенствования и развития СУТИ, рассмотрение производственной подсистемы обеспечения технологичности изделий как особой самоорганизующейся системы, которая фактически тесно взаимодействует с другими подсистемами производства. Разнообразие типов предприятий предопределяет разнообразие схем построения систем управления технологичностью. В работе проведена классификация систем управления технологичностью путем упорядочения свойств основных системоорганизующих элементов. За исходную базу их классификации приняты определяющие признаки, среди которых цели и горизонты функционирования, показатели деятельности и стадии жизненного цикла в рамках соответствующих системообразующих элементов предприятия. Множество возможных сочетаний классификационных признаков обуславливает полную совокупность классов систем управления технологичностью, характеризуемых набором интегральных признаков. Разработан структурированный перечень целей управления и показателей деятельности по обеспечению технологичности продукции на предприятии, прямо или косвенно связанных с задачами обеспечения и повышения технологичности изделий.

Построена ФС СУТИ, которая базируется на выделении трех основных частей: специализированного функционального ядра, обладающего собственной внутренней структурой; распределенной по традиционным подсистемам совокупности неспецифических и специфических задач, связи между которыми формируются в рамках ФС предприятия; структуры внутренних функциональных связей между ядром и распределенной совокупностью задач.

Разработанная модель функциональной структуры могут успешно применяться при построении систем и организационных схем управления технологичностью выпускаемых и осваиваемых изделий на предприятиях машино- и приборостроения.

**Список литературы**


[1] Адамов А.П., Ирзаев Г.Х., Адамова А.А. Методологические основы обеспечения технологичности электронных средств: модели, алгоритмы, программные комплексы, механизмы реализации, прогнозирование. – СПб.: Политехника, 2008.

[2] Технологичность конструкций изделия: справочник / под общей ред. Ю.Д. Амирова. – М.: Машиностроение, 1990.

[3] Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.

[4] Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении : учеб. пособие / под ред. А.А. Емельянова. – М.: Финансы и статистика, 2007.

# УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЛОЖНЫХ РЕЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

**А.А. Левков**

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия
projekctor@gmail.com
тел: +7 (917) 441-76-51

***Ключевые слова:*** *управление данными, семантическая эквивалентность, иерархизация, нормализация, реляционная модель данных*

**Abstract**
A method of relational data schema constructing by semantic equivalence criterion is offered. Offered method expands normalization theory and allows non-loose recomposition of relations. Also it significantly reduces information systems data schema redundancy.

## Введение

В настоящее время происходит стремительная информатизация всех областей деятельности человека, приводящая как к росту объемов хранимой и обрабатываемой информации, так и росту сложности и связности этой информации [1]. Традиционным средством хранения и обработки информации являются SQL базы данных (БД), основанные на реляционной теории организации данных[1] и функционирующие как конкурентные мультиагентные системы, эффективность которых зависит от сложности обслуживаемой схемы данных.

В рамках реляционной теории вопросы организации структуры данных (вопросы декомпозиции и синтеза реляционных отношений), направленные на повышение надежности и снижения избыточности хранения данных, решаются на основе методики нормализации отношений [2,3]. Теория нормализации является хорошо проработанной частью реляционной теории, основанной на декомпозиции отношений по транзитивным функциональным зависимостям[2], которая позволяет гарантированно избежать аномалий обработки зависимых данных. Ограничением теории нормализации является рассмотрение вопроса структуризации данных с точки зрения единственного критерия функциональной зависимости, чего недостаточно для эффективной структуризации сложной информации [4,5].

В данной работе предлагается новый взгляд на структуризацию реляционных отношений, основанный на их декомпозиции по критерию семантической эквивалентности. Данный подход приводит к построению древовидных схем реляционных отношений и может быть назван иерархизацией. Следует отметить, что принципы иерархизации не противоречат принципам нормализации и оба метода могут быть использованы совместно позволяя создавать эффективные схемы данных, свободные от аномалий и имеющие низкую избыточность.

## 1 Понятие семантической эквивалентности

Относительно реляционной теории понятие эквивалентности формулируется на заголовках отношений (на атрибутах отношений) и называется семантической эквивалентностью, что

[1] Следует отметить, что сами sql-БД являются «псевдореляционными» системами, т.к. могут допускать нарушения некоторых ключевых реляционных аксиом.

[2] В высших нормальных формах декомпозиция осуществляется по многозначным зависимостям, частным случаем которых являются функциональные зависимости.

отражает применение отношения не к самим данным, а к их значению в контексте БД. Семантическая эквивалентность обозначается символом «~».

Само понятие семантической эквивалентности может быть определено следующим образом: пусть заданы отношения $R$ и $P$, и пусть $X$ является подмножеством заголовка $R$, а $Y$ является подмножеством заголовка $P$. В этом случае $X$ семантически эквивалентен $Y$ в том и только том случае, если для каждого $x_i \in X$ найдется $y_j \in Y$, такой, для которого ($x$ определен на том же домене, что и $y$), и наоборот, для каждого $y_i \in Y$ найдется $x_j \in X$, такой, для которого ($y$ определен на том же домене, что и $x$).

Если рассмотреть замыкание множества семантических эквивалентностей, то минимальный набор правил следует из определения отношения эквивалентности:

- Рефлексивность: $X \sim X$.
- Симметричность: если $X \sim Y$, то $Y \sim X$.
- Транзитивность: если $X \sim Y$ и $Y \sim Z$, то $X \sim Z$.

Из этих правил следуют правила:

- Пополнения: если $X \sim Y$, то $XZ \sim YZ$. Доказательство тривиально – по определению эквивалентности $D_x = D_y$ и очевидно, что $D_z = D_z$.
- Композиции: если $X \sim Y$ и $Z \sim Q$, то $XZ \sim YQ$. Из правила пополнения следует, что $XZ \sim YZ$ и $YZ \sim YQ$. Из правила транзитивности следует, что $XZ \sim YQ$.

Следует отметить, что с формальной точки зрения семантическая эквивалентность говорит об одинаковой смысловой нагрузке, которую несут подмножества кортежей отношений по семантически эквивалентным атрибутам. Это позволяет говорить, что семантически эквивалентные атрибуты отличаются только названием, что говорит о семантической избыточности именования атрибутов.

## 2 Иерархизация отношений по критерию семантической эквивалентности

На основе отношения семантической эквивалентности возможно проведение декомпозиции отношений. Такая декомпозиция должна быть обратимой и предоставлять возможность произвести композицию исходных отношений при помощи операторов реляционной алгебры, т.е. декомпозиция должна выполняться без потерь и артефактов (появления новых данных, отсутствующих в исходных отношениях).

Для выполнения декомпозиции без потерь новые отношения должны строится на основе операций проекции и объединения. Обратная композиция возможна при помощи использования операции натурального соединения.

Пусть заданы отношения R с заголовком {A,X,Z} и P с заголовком {B,Y,Q}, где A и B – первичные ключи отношений R и P (FD A → XZ, FD B → YQ) соответственно, и X~Y. Тогда процесс иерархизации может быть определен с помощью формирования вспомогательной сущности C с первичным ключом W, содержащей кортежи C(W)={{1},{2}} следующим образом:

(1) $R^*$ = (($R$) PROJECT ({$A,Z$})) TIMES (($C$) WHERE ($W$=1))

(2) $P^*$ = (($P$) PROJECT ({$B,Q$})) TIMES (($C$) WHERE ($W$=2))

(3) $O^3$ = (($R$) PROJECT ({$A,X$})) TIMES (($C$) WHERE ($W$=1))

(4) $O^5$ = ((P) PROJECT ({$B,Y$})) TIMES (($C$) WHERE ($W$=2))

(5) $O^6$ = ($O^5$ RENAME ($B,A$)) RENAME ($Y,X$)

(6) $O = O^3$ UNION $O^6$

Процесс обратной композиции в этом случае может быть представлен следующим образом:

(7) $R$ = ($R^*$ NATURAL JOIN $O$) PROJECT ({$A,X,Z$})

(8) $P^1$ = (($P$* NATURAL JOIN $O$) PROJECT ({$A,X,Q$}))

(9) $P$ = ($P^1$ RENAME ($A,B$)) RENAME ($X,Y$)

Необходимость в переименовывании атрибутов возникает в связи с существующей семантической избыточностью именования исходных отношений. При проведении иерархизации не имеет значения выбор основных именований атрибутов (за основу могли браться имена {$B,Y$}, в этом случае понадобилось бы переименовывать атрибуты отношения $R$).

Докажем, что такая декомпозиция была проведена без потерь и артефактов. Для этого необходимо доказать теорему «о разбиении»: пусть задано отношение $R${$A,X,Z$} и выполняется функциональная зависимость $FD$ $A \rightarrow XZ$ ($A$ – первичный ключ отношения $R$) и задано отношение $C$, для которого выполняется условие $|C| = 1$ (тело отношения $C$ содержит один кортеж), тогда

$R$ = (($R$ PROJECT ({$A,X$}) ) TIMES $C$) NATURAL JOIN (($R$ PROJECT ({$A,Z$})) TIMES $C$) PROJECT ({$A,X,Z$})

Т.к. операция декартова произведения дистрибутивна относительно операции натурального соединения, то это выражение можно записать следующим образом:

$R$ = (($R$ PROJECT ({$A,X$})) NATURAL JOIN ($R$ PROJECT ({$A,Z$}))) TIMES $C$) PROJECT ({$A,X,Z$})

Исходя из теоремы Хита ($R$ PROJECT ({$A,X$})) NATURAL JOIN ($R$ PROJECT ({$A,Z$})) = $R$. Тогда исходное выражение можно представить в следующем виде:

$R$ = ($R$ TIMES $C$) PROJECT ({$A,X,Z$})

Т.к. $|C| = 1$, значит, операция декартова произведения не изменяет количество кортежей в отношении ($R$ TIMES $C$) относительно $R$, а только расширяет заголовок отношение $R$ атрибутами отношения $C$, в то время как следующая операция проекции выделяет из множества атрибутов отношения ($R$ TIMES $C$) атрибуты отношения $R$.

Таким образом, утверждение доказано.

Теперь докажем, теорему «о соединении с объединением»: $R$ NATURAL JOIN $S$ = $R$ NATURAL JOIN ($S$ UNION $T$), если $R$ NATURAL JOIN $T = \varnothing$.

Воспользуясь свойством дистрибутивности натурального соединения относительно объединения, раскроем скобки, что даст следующее отношение:

$R$ NATURAL JOIN ($S$ UNION $T$) = ($R$ NATURAL JOIN $S$) UNION ($R$ NATURAL JOIN $T$) = ($R$ NATURAL JOIN $S$) UNION ($\varnothing$) = $R$ NATURAL JOIN $S$

Таким образом, утверждение доказано.

Если рассмотреть процесс декомпозиции и синтеза отношений при иерархизации, объединив формулы (1, 3-9), то выполняемые преобразования можно записать следующим образом:

$R$ = ((($R$ PROJECT ({$A,Z$}) TIMES $C$*) NATURAL JOIN (($R$ PROJECT ({$A,X$}) TIMES $C$*) UNION $O^6$)) PROJECT ({$A,X,Z$})

Т.к. $W$ является первичным ключом отношения $C$ и входит в состав первичного ключа отношений $O^6$ и ($R$ PROJECT ({$A,Z$})) TIMES $C$*, и в соответствии с формулами (1-2) ограничение отношения $C$ производится по строгому равенству значений $W$, то (($R$ PROJECT ({$A,Z$})) TIMES $C$*) NATURAL JOIN ($O^6$) = $\varnothing$ (т.к. $O^6.W = 2$, а (($R$ PROJECT ({$A,Z$})) TIMES $C$*).$W = 1$)).

Отсюда, согласно теореме «о соединении с объединением», в данном контексте ((($R$ PROJECT ({$A,Z$})) TIMES $C$*) NATURAL JOIN ((($R$ PROJECT ({$A,X$})) TIMES $C$*) UNION $O^6$))) = ((($R$ PROJECT ({$A,Z$})) TIMES $C$*) NATURAL JOIN (($R$ PROJECT ({$A,X$})) TIMES $C$*))

Согласно теореме «о разбиении»

((($R$ PROJECT ({$A,Z$})) TIMES $C$*) NATURAL JOIN ((($R$ PROJECT ({$A,X$})) TIMES $C$*)))) PROJECT ({$A,X,Z$}) = R.

Таким образом, доказано, что декомпозиция отношений и последующий их синтез при иерархизации отношений произведены без потерь и артефактов.

### 3 Пример иерархизации отношений по критерию семантической эквивалентности

Рассмотрим процесс ограниченной иерархизации на простом примере двух отношений, представленных на рисунке 1.

ПРИХОД_НАКЛАДНАЯ

| *Номер* | *Дата* | *Сумма* | *Отправит* |
|---|---|---|---|
| 11 | 13.03.2011 | 142,25 | ООО «РГ» |
| 1011 | 14.03.2011 | 594,32 | ОАО «ЗТ» |

РОЗНИЧНЫЙ_ЧЕК

| *Номер* | *Дата* | *Сумма* | *Номер_ККМ* |
|---|---|---|---|
| 1011 | 14.05.2011 | 253,00 | 73528 |
| 1012 | 14.05.2011 | 421,50 | 74649 |
| 1013 | 14.05.2011 | 850,90 | 73528 |

Рисунок 1 – Исходные реляционные отношения

Если принять что выполняются следующие семантические эквивалентности:
«ПРИХОД_НАКЛАДНАЯ.Номер» ~ «РОЗНИЧНЫЙ_ЧЕК.Номер»
«ПРИХОД_НАКЛАДНАЯ.Дата» ~ «РОЗНИЧНЫЙ_ЧЕК.Дата»
«ПРИХОД_НАКЛАДНАЯ.Сумма» ~ «РОЗНИЧНЫЙ_ЧЕК.Сумма»
В качестве вспомогательного отношения *C* будем использовать отношение «ТИП_ДОКУМЕНТА».

| *Тип* | *Наименование* |
|---|---|
| 1 | ПРИХОД_НАКЛАДНАЯ |
| 2 | РОЗНИЧНЫЙ_ЧЕК |

Рисунок 2 – Вспомогательное отношение «ТИП_ДОКУМЕНТА

При осуществлении иерархизации происходит формирование новых сущностей «ПРИХОД_НАКЛАДНАЯ*», «РОЗНИЧНЫЙ_ЧЕК*» и «АБСТРАКТ_ДОКУМЕНТ» (эквивалент отношения *O*).

ПРИХОД_НАКЛАДНАЯ*

| *Номер* | *Тип* | *Отправитель* |
|---|---|---|
| 11 | 1 | ООО «РГ» |
| 1011 | 1 | ОАО «ЗТ» |

РОЗНИЧНЫЙ_ЧЕК*

| *Номер* | *Тип* | *Номер_ККМ* |
|---|---|---|
| 1011 | 2 | 73528 |
| 1012 | 2 | 74649 |
| 1013 | 2 | 73528 |

АБСТРАКТ_ДОКУМЕНТ

| *Номер* | *Тип* | *Дата* | *Сумма* |
|---|---|---|---|
| 11 | 1 | 13.03.2011 | 142,25 |
| 1011 | 1 | 14.03.2011 | 594,32 |
| 1011 | 2 | 14.05.2011 | 253,00 |
| 1012 | 2 | 14.05.2011 | 421,50 |
| 1013 | 2 | 14.05.2011 | 850,90 |

Рисунок 3 – Иерархизация реляционных сущностей

Предложенный вариант иерархизация может быть использован для любых реляционных отношений, однако он обладает существенными недостатками: требует создания отдельного служебного отношения *C* («ТИП_ДОКУМЕНТА») и введения нового атрибута *W* («Тип») в иерархизованные отношения. На практике, служебное отношение можно определить в качестве переменной, а не хранимого отношения, что позволит не учитывать его в схеме БД, однако

дополнительный атрибут становится неотъемлемой частью предложенного варианта иерархизации отношений.

Как можно видеть, выполнение иерархизации существенно упрощает схему данных, группируя семантически эквивалентные атрибуты в рамках одного промежуточного отношения. В перспективе, это позволяет использовать промежуточные отношения для выполнения аналитических запросов (подобно тому, как используются таблицы фактов в OLAP-схемах «звезда» и «снежинка»), подобным образом декомпозировать алгоритмы обработки данных в реляционных БД, снижая их избыточность и т.д.

**Выводы**

В данном материале предложено расширение реляционной теории понятием семантической эквивалентности, которое определяется на основе доменов атрибутов различных отношений и позволяет проводить структуризацию (иерархизацию) схемы БД на основе семантических связей между различными отношениями.

Рассмотрен ограниченный варианты иерархизации отношений, доказано отсутствие потерь и артефактов при проведении данных операций.

Совместное использование методов иерархизации и нормализации реляционных отношений позволяет снизить избыточность и сложность схемы данных и позволяет реализовывать структуры более точно соответствующие объектам моделируемой области.

**Список литературы**


[1] И. М. Макаров, В. М. Лохин, С. В. Манько, М. П. Романов // Создание интеллектуальных систем автоматизации и управления на основе современных информационных технологий // Мехатроника, автоматизация, управление, 2007 №4, с. 13-20.

[2] B. Motik, I. Horrocks, U. Sattler // Bridging the gap between owl and relational databases // In Proceedings of the 16th international conference on WWW2007, ACM Press, 2007.

[3] Y. An, A. Borgida, J. Mylopoulos // Inferring complex semantic mappings between relational tables and ontologies from simple correspondences // Proc. OMT Conf., Agia Napa, Cyprus, 2005, с. 1152-1169.

[4] Khalilov A. I., «Data base organization in complex management information systems», Cybernetics and Systems Analysis, 02.02.2005.

[5] Cong Yu, H. V. Jagadish, «Querying complex structured databases», VLDB 2007.

# ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ОБЪЕДИНЕНИЯ ОНТОЛОГИЙ В РЕЛЯЦИОННЫХ БАЗАХ ДАННЫХ

**И.Д. Виноградов, С.В. Смирнов**

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
vid@svptus.ru, smirnov@iccs.ru
тел: +7 (8462) 332-39-27, факс: +7 (8462) 333-27-70

***Ключевые слова:*** *анализ формальных понятий, формальная онтология, реляционная база данных, концептуальное шкалирование, неполнота формального контекста, объединение онтологий*

**Abstract**

The article discusses the possible basis for the ontological engineering. The specific topic is the information support of the merging of ontologies in relational databases. The proposed method is based on a Formal Concept Analysis.

## Введение

Анализ формальных понятий (АФП) [1] позволяет извлекать из данных знания о предметной области (ПрО) в форме онтологий – см., например, [2, 3]. Этот подход пригоден и для анализа информации в реляционных базах данных (РБД) [4]. Анализ данных в РБД возможен в различных срезах, или *«измерениях»* в терминах OLAP-технологий. Возникающая вследствие этого *многомерность* исходной информации способна стать причиной построения различных онтологий ПрО, которые, основываясь на одном источнике данных, оказываются, тем не менее, несогласованными и противоречивыми. Преодолеть подобные проблемы и существенно повысить эффективность процесса извлечения и использования знаний за счет их интеграции способны средства *объединения* онтологий (*ontology merging*), которыми обычно оснащаются системы концептуального информационного моделирования.

Известные методы объединения онтологий на базе АФП имеют схожий алгоритм действий – см., например, [5, 6]. Он включает три основных этапа: *реконструирование* формальных контекстов (ФК) исходных онтологий, *формирование* объединенного ФК и *вывод* на его основе интегрированной онтологии. Если первый и третий этапы алгоритма полностью автоматизированы, то формирование объединенного ФК обычно представляет собой *человеко-машинную процедуру*, содержание которой существенно зависит от возможности получения дополнительной информации о ПрО и ее конкретного вида. Это обстоятельство вызвано тем, что в общем случае в объединяемых ФК недостаточно фактов, подтверждающих семантическое сходство или различие представляемой реальности. Игнорирование неполноты информации, возникающей в объединенном ФК при примитивном теоретико-множественном формировании элементов этого ФК из реконструированных ФК исходных онтологий, способно привести к весьма грубой, «обедненной» знаниями результирующей онтологии.

В данной работе рассматривается обеспечение информационной поддержки процесса объединения онтологий, которая способна практически полностью автоматизировать формирование объединенного ФК. Идея состоит в устранении неопределенности, возникающей в синтезируемом ФК, за счет извлечения дополнительной информации из РБД при допущении, что эта РБД служила информационным источником при построении обеих объединяемых онтологий.

## 1 Информационная поддержка процесса объединения онтологий

В основе технологии извлечения онтологий из РБД с помощью АФП лежит метод *концептуального шкалирования* (*conceptual scaling*) [7, 8]. Реляционные отношения базы данных рассматриваются как многозначные ФК (*many-valued context*), которые посредством применения концептуальных шкал приводятся к обычному виду (*one-valued context*) – матрице инцидентности «объекты-свойства». Всякое специальное концептуальное шкалирование извлекает *некоторую* онтологию из множества значений одного или более атрибутов реляционного отношения. Однако при необходимости получения целостной картины о ПрО, которую представляют хранимые в РБД данные, необходимо построение интегрированных онтологий. Для этого применяют операцию объединения онтологий. Рассмотрим алгоритм данной операции, представленный в [6].

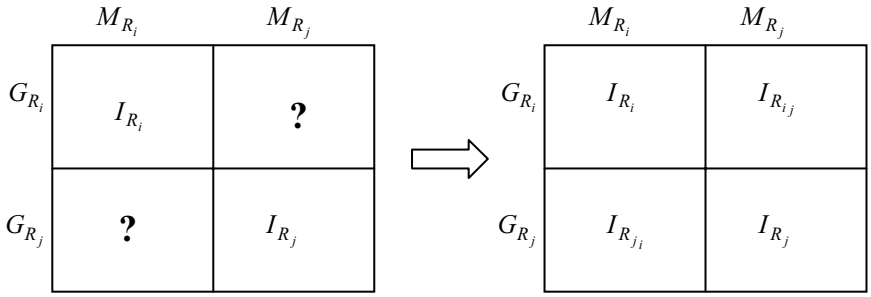
Для начала зафиксируем, что $\Omega_{R_i}$ и $\Omega_{R_j}$ – две исходные онтологии, извлеченные соответственно из реляционных отношений $R_i$ и $R_j$ некоторой РБД.

В общем виде процесс объединения двух корректных онтологий состоит из следующих этапов:

- реконструирование формальных исходных онтологий:
  $\Omega_{R_i} \to K_{R_i}(G_{R_i}, M_{R_i}, I_{R_i})$ и $\Omega_{R_j} \to K_{R_j}(G_{R_j}, M_{R_j}, I_{R_j})$;
- формирование объединенного ФК из реконструированных ФК исходных онтологий:
  $K = K_{R_i} \oplus K_{R_j} = (G_{R_i} \cup G_{R_j}, \quad M_{R_i} \cup M_{R_j}, \quad I_{R_i} \otimes I_{R_j})$;
- построение интегрированной онтологии $\Omega$ на основе объединенного контекста: $K \to \Omega$.

Операция построения объединенного ФК отличается от операции теоретико-множественного объединения тем, что дополнительно анализируется семантика объединяемых ФК. Подобный анализ необходим не только для устранения *избыточности* в общем контексте, но и для устранения возникающей в нем *неполноты*. Суть данной проблемы ясна из рисунка 1а, где знаком вопроса обозначены *зоны неопределенности*, возникающие при объединении реконструированных контекстов онтологий. Причина их возникновения лежит в отсутствии в исходных онтологиях фактической информации о наличии или отсутствии инцидентности между объектами одного ФК и свойствами другого ФК (см. рисунок 1б):

$$I_{R_{ij}} \subset G_{R_i} \times M_{R_j}, \quad I_{R_{ji}} \subset G_{R_j} \times M_{R_i}.$$




а) б)

Рисунок 1 – Возникновение зон неопределенности при объединении контекстов (упрощенно)

***Утверждение.*** Ситуация неопределенности при объединении контекстов есть сочетание следующих факторов:

(1) $$\left(\left(M_{R_i} \neq M_{R_j}\right) \wedge \left(G_{R_i} \not\subset G_{R_j}\right) \wedge \left(G_{R_j} \not\subset G_{R_i}\right)\right) \vee \left(\left(G_{R_i} \neq G_{R_j}\right) \wedge \left(M_{R_i} \not\subset M_{R_j}\right) \wedge \left(M_{R_j} \not\subset M_{R_i}\right)\right).$$

Таким образом, процесс объединения онтологий требует дополнительной информации для снятия неопределенности объединенного ФК. Как правило, данная задача решается путем непосредственного участия в процессе объединения экспертов ПрО, что не позволяет сделать данный процесс полностью автоматизированным. Однако реализовать информационную поддержку процесса объединения в нашем случае можно опираясь на актуальную фактическую информацию, хранимую в базе данных. Представим зоны неопределенности объединенного ФК в виде нечетких формальных контекстов, со значением инцидентности равным 0.5, что означает полную неопределенность вопроса о наличии или отсутствии у объектов соответствующих свойств. Следовательно, задачу по снятию неопределенности можно сформулировать как приведение нечеткого контекста к четкому виду. Решим эту задачу путем извлечения из базы данных дополнительных однозначных контекстов по концептуальным шкалам, принадлежащим исходным онтологиям, причем применяя концептуальную шкалу одной онтологии для извлечения недостающего ФК на множестве объектов другой онтологии.

***Определение.*** Под информационной поддержкой будем понимать извлечение из реляционных отношений базы данных однозначных формальных контекстов, соответствующих зонам неопределенности при выполнении условия (1):

$$K_{R_{ij}} = (G_{R_i}, M_{R_j}, I_{R_{ij}}) \text{ и } K_{R_{ji}} = (G_{R_j}, M_{R_i}, I_{R_{ji}}).$$

Формирование объединенного ФК исходных онтологий при такой информационной поддержке может быть реализовано уже с помощью теоретико-множественной операции объединения:

$$K = K_{R_i} \oplus K_{R_j} = (K_{R_i} \cup K_{R_{ij}}) \cup (K_{R_j} \cup K_{R_{ji}}). \quad (2)$$

## 2 Пример объединения онтологий с информационной поддержкой

Рассмотрим в качестве предметной области базу данных кабельных линий связи.

Реляционные отношения $R_1$ и $R_2$, представленные таблицами 1 и 2, обозначают выборки данных по внутризоновым и магистральным кабельным линиям связи соответственно.

Таблица 1 – Отношение «Внутризоновые кабельные линии связи» ($R_1$)

| Номер | Имя КЛС | Тип кабеля | Год прокладки | Длина кабеля, км |
|---|---|---|---|---|
| 05212052К | Бавлы-Поповка | МКССтШп | 1978 | 53 |
| 05212042К | Кротовка-Поповка | МКСАПБ | 1975 | 348,2 |
| 05212073К | Новокуйбышевск-Покровка | МКБ | 1970 | 144,3 |
| 05212082К | Покровка-Сызрань | ТЗАВБ | 1967 | 25 |

Таблица 2 – Отношение «Магистральные кабельные линии связи» ($R_2$)

| Номер | Имя КЛС | Тип кабеля | Год прокладки | Длина кабеля, км |
|---|---|---|---|---|
| 05211372К | Альметьевск-Самара | МКСБ | 1969 | 256,5 |
| 05211192К | Лазарево-Клин | МКСБпШп | 1988 | 346,6 |
| 05211142К | Лопатино-Никольское | МКБ | 1965 | 1305,18 |
| 05211042К | П.Михайловка-Кузмичи | МКТСБ | 1977 | 178,5 |

Применяя концептуальное шкалирование для значений атрибута «Длина кабеля, км» реляционного отношения $R_1$ (см. таблицу 3), извлекаем формальный контекст $K_{R_1}$ и соответствующую ему онтологию $\Omega_{R_1}$. Формальный контекст представлен в таблице 4, а онтология (здесь и далее *таксономия* понятий) на рисунке 2.

По аналогии получены формальный контекст $K_{R_2}$ и онтология $\Omega_{R_2}$ из реляционного отношения $R_2$ по концептуальной шкале атрибута «Тип кабеля» (см. таблицы 5, 6 и рисунок 3).

Таблица 3 – Концептуальная шкала для атрибута отношения $R_1$ «Длина кабеля, км»

| | Малая протяженность | Средняя протяженность | Большая протяженность |
|---|---|---|---|
| до 100 км | **x** | | |
| от 100 до 300 км | | **x** | |
| свыше 300 км | | | **x** |

Таблица 4 – Формальный контекст $K_{R_1}$

| | Малая протяженность | Средняя протяженность | Большая протяженность |
|---|---|---|---|
| Бавлы-Поповка | x | | |
| Кротовка-Поповка | | | x |
| Новокуйбышевск-Покровка | | x | |
| Покровка-Сызрань | x | | |

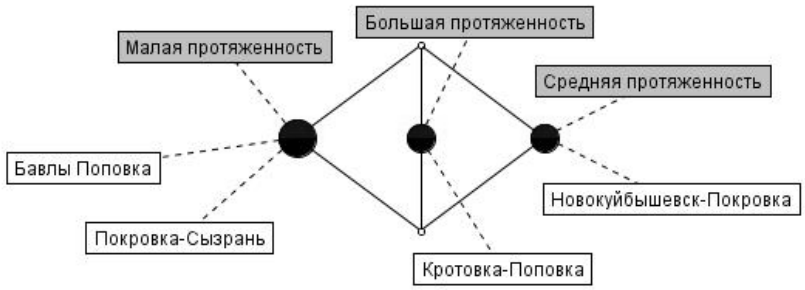



Рисунок 2 – Онтология $\Omega_{R_1}$

Таблица 5 – Концептуальная шкала для атрибута отношения $R_2$ «Тип кабеля»

| | Алюминиевая оболочка | Стальная оболочка | Свинцовая оболочка |
|---|---|---|---|
| МКСБ | | | **x** |
| МКСБпШп | | | **x** |
| МКБ | **x** | | |
| МКТСБ | **x** | | |
| МКССтШп | | **x** | |
| МКСАПБ | | | **x** |
| ТЗАВБ | **x** | | |

Таблица 6 – Формальный контекст $K_{R_2}$

| | Алюминиевая оболочка | Стальная оболочка | Свинцовая оболочка |
|---|---|---|---|
| Альметьевск-Самара | | | x |
| Лазарево-Клин | | | x |
| Лопатино-Никольское | | x | |
| П.Михайловка-Кузмичи | x | | |

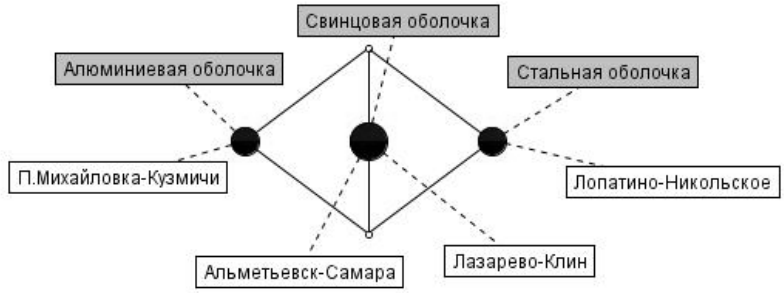



Рисунок 3 – Онтология $\Omega_{R_2}$

Полученные онтологии представляют два отдельных аналитических среза ПрО. Для получения общей картины по данным срезам необходимо эти онтологии объединить. В ходе реконструирования и объединения их ФК получаем общий контекст с зонами неопределенности (таблица 7) поскольку выполняется условие (1). При теоретико-множественном подходе неопределенность в объединенном ФК снимается путем наилучшего приближения нечеткого отношения [9] – обнуления нечетких значений 0.5. Тогда в результате объединения получим «обедненную» знаниями результирующую онтологию (рисунок 4).

Таблица 7 – Объединенный формальный контекст до информационной поддержки

| | Малая протяженность | Средняя протяженность | Большая протяженность | Алюминиевая оболочка | Стальная оболочка | Свинцовая оболочка |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Бавлы-Поповка | x | | | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Кротовка-Поповка | | | x | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Новокуйбышевск-Покровка | | x | | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Покровка-Сызрань | x | | | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Альметьевск-Самара | 0,5 | 0,5 | 0,5 | | | x |
| Лазарево-Клин | 0,5 | 0,5 | 0,5 | | | x |
| Лопатино-Никольское | 0,5 | 0,5 | 0,5 | | x | |
| П.Михайловка-Кузмичи | 0,5 | 0,5 | 0,5 | x | | |

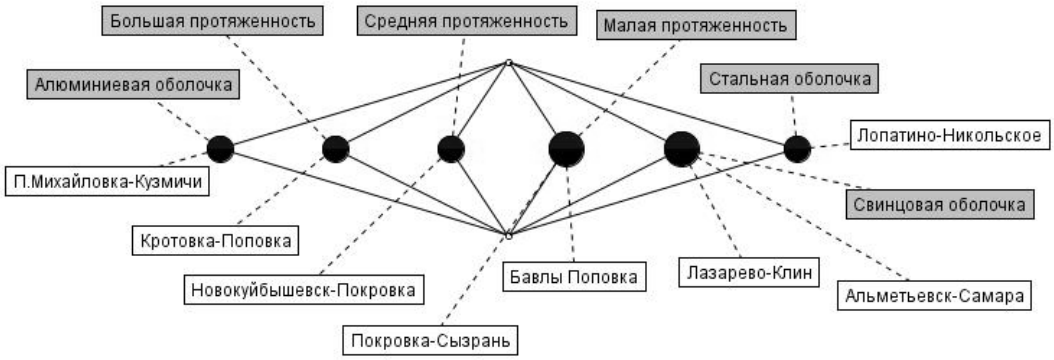



Рисунок 4 – Результирующая онтология после теоретико-множественного объединения контекстов

Теперь согласно определению информационной поддержки, извлечем дополнительные ФК $K_{R_{12}}$ и $K_{R_{21}}$ (см. таблицы 8 и 9). Тогда в результате объединения получаем общий контекст, представленный в таблице 10. Соответствующая интегрированная онтология, представлена на рисунке 5.

Таблица 8 – Формальный контекст $K_{R_{12}}$

| | Малая протяженность | Средняя протяженность | Большая протяженность |
|---|---|---|---|
| Альметьевск-Самара | | x | |
| Лазарево-Клин | | | x |
| Лопатино-Никольское | | | x |
| П.Михайловка-Кузмичи | | x | |

Таблица 9 – Формальный контекст $K_{R_{21}}$

| | Алюминиевая оболочка | Стальная оболочка | Свинцовая оболочка |
|---|---|---|---|
| Бавлы-Поповка | | x | |
| Кротовка-Поповка | | | x |
| Новокуйбышевск-Покровка | x | | |
| Покровка-Сызрань | x | | |

Таблица 10 – Объединенный формальный контекст после информационной поддержки

| | Малая протяженность | Средняя протяженность | Большая протяженность | Алюминиевая оболочка | Стальная оболочка | Свинцовая оболочка |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Бавлы-Поповка | x | | | | x | |
| Кротовка-Поповка | | | x | | | x |
| Новокуйбышевск-Покровка | | x | | x | | |
| Покровка-Сызрань | x | | | x | | |
| Альметьевск-Самара | | x | | | | x |
| Лазарево-Клин | | | x | | | x |
| Лопатино-Никольское | | | x | | x | |
| П.Михайловка-Кузмичи | | x | | x | | |

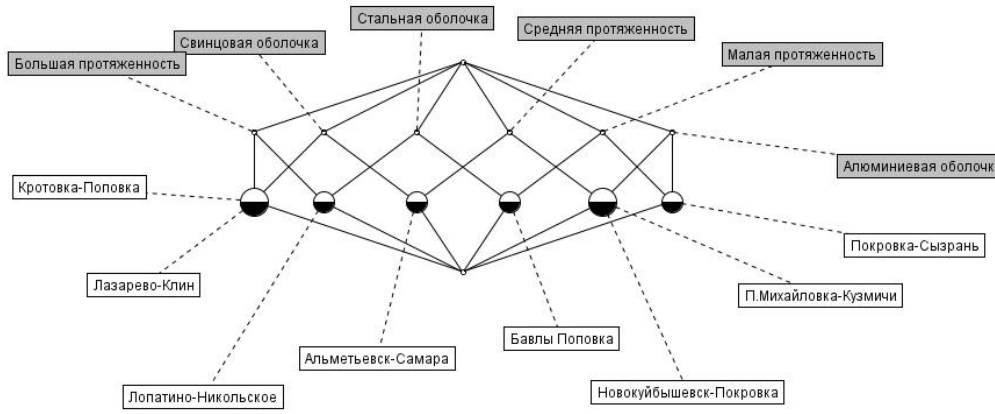



Рисунок 5 – Результирующая онтология при информационной поддержке объединения онтологий

Как видно из рисунка 5 полученная результирующая онтология при информационной поддержке отражает знания, которые не были выявлены при «механическом» объединении онтологий.

**Заключение**

Информационная поддержка процесса объединения онтологий в реляционных базах данных дает возможность извлечения знаний, которые при теоретико-множественном объединения онтологий получить не удается. Построение интегрированных онтологий в значительной

степени автоматизируется, однако требует непосредственного участия экспертов предметных областей при концептуальном шкалировании данных.

Полученные результаты могут быть применены в средствах концептуального информационного моделирования таких как, ToscanaJ, Anaconda и др., которые позволяют работать с реляционными базами данных. Дальнейшее продвижение работ в направлении развития метода объединения онтологий видится в расширении его средствами *реляционного концептуального анализа*, который предназначен для извлечения *структурных отношений* между объектами онтологий с помощью их концептуального шкалирования.

### Список литературы


[1] Ganter B., Wille R. Formal Concept Analysis. Mathematical foundations. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1999.

[2] Смирнов С.В. Онтологический анализ предметных областей моделирования // Известия Самарского научного центра РАН. 2001. Т.3. №1. – С. 62-70.

[3] Obitko M., Snasel V., Smid J. Ontology Design with Formal Concept Analysis // Proc. of the CLA 2004 International Workshop on Concept Lattices and their Applications (Ostrava, Czech Republic, September 23-24, 2004). V. Snasel, R. Belohlavek (Eds.). – P. 111-119.

[4] Виноградов И.Д. Реализация анализа формальных понятий в реляционных базах данных // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIII международной конф. (15-17 июня 2011 г., Самара, Россия). – Самара: СамНЦ РАН, 2011. – С. 409-414.

[5] Stumme G., Maedche A. FCA Merge: Bottom-Up Merging of ontologies // Proc. 17th Int. Conf. on Artificial Intelligence - IJCAI'01 (Seattle, WA, USA, August 4-10, 2001). - P. 225-230.

[6] Виноградов И.Д., Смирнов С.В. Алгоритм объединения концептуальных схем на основе реконструкции их формального контекста // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды III международной конф. (4-9 сентября, 2001 г., Самара, Россия) – Самара: СамНЦ РАН, 2001. – С. 213-220.

[7] Vogt F., Wille R. TOSCANA – A graphical tool for analyzing and exploring data // Graph Drawing'94 LNCS 894. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1995. – P. 226-233.

[8] Stumme G., Wille R., Wille U. Conceptual knowledge discovery in databases using formal concept analysis methods // LNCS 1510. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1998. – P. 450-458.

[9] Смирнов С.В.Нечеткие формальные контексты при построении онтологий на основе анализа формальных понятий: происхождение и использование // 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.

# МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ РАНЖИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ТРАФОВЫХ МЕТОДОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

**В.Д. Ивченко, Г.А. Филимонов**

Московский государственный университет приборостроения и информатики
107996, Москва, ул. Стромынка, 20, Россия
professor55@rambler.ru
тел/факс: +7 (499) 269-46-96

***Ключевые слова:*** *задачи многокритериального ранжирования, балльные шкалы, частично упорядоченные множества, отношение доминирования по Парето, кластеризация многокритериальных объектов, графовые методы кластеризации, ранжирование сотрудников по профилю компетенций*

**Abstract**

The problems of multicriteria ranking of objects are discussed. It appears with statistical analysis of data in different applied areas. All the objects are divided into clusters on the degree of preference in ranking process. Solutions of ranking problems based on graphing methods of clusterization are proposed.

## Проблема многокритериального ранжирования

Ранг – категория, разряд каких-либо предметов, явлений или лиц. Ранжирование – процедура упорядочения объектов по степени выраженности какого-либо качества. На основе этого в итоге осуществляется выбор одного или нескольких наиболее предпочтительных объектов. Объекты ранжирования могут иметь различную природу. Ранги присваиваются по некоторой шкале. Ранговая (порядковая) шкала строится на отношении тождества и порядка. Будем полагать, что процедуры шкалирования основаны на балльных оценках.

Пусть задано множество объектов $P$. Результатом ранжирования должно стать разбиение объектов на множество непересекающихся классов:

$$\Omega = \{\omega_1, \omega_2, ..., \omega_K\},$$

упорядоченных по степени предпочтительности (от лучших к худшим), исходя из заданных критериев качества.

В процедурах *однокритериального* ранжирования задан единственный критерий качества $\varphi$, который измеряется по балльной шкале и используется для построения линейно упорядоченного множества (цепи):

(1) $\omega_1 \succ \omega_2 \succ ... \succ \omega_K$.

Объекты внутри каждого класса $\omega \in \Omega$ равноценны между собой, т.е. имеют одинаковую балльную оценку $\varphi(\omega)$, а порядок (1) означает, что

$$\varphi(\omega_1) > \varphi(\omega_2) > ... > \varphi(\omega_K).$$

Однако во многих прикладных задачах качество объектов представляется совокупностью нескольких критериев. В этих условиях возникает проблема *многокритериального* ранжирования [1, 2].

Будем полагать, что качество объектов $p \in P$ оценивается посредством совокупности частных критериев $q_1, q_2, ..., q_n$, которые измеряются по единой балльной шкале.

Один из наиболее распространенных подходов к решению задач многокритериального ранжирования заключается в их сведении к однокритериальным задачам. Для этой цели вводится некоторый *обобщенный* (агрегированный) критерий $R$, являющийся сверткой частных критериев:

(2) $R = \sum_{i=1}^{n} w_i q_i$,

где $w_i > 0$ – весовые коэффициенты, учитывающие важность критериев.

Критерий (2) можно использовать для конструирования ранговой шкалы, т.е. присвоения рангов объектам. В итоге можно сформировать цепь классов (1) с ранговой упорядоченностью.

Однако такой подход имеет ряд принципиальных недостатков. Во-первых, выбор весовых коэффициентов субъективен. Во-вторых, дифференциация балльных оценок посредством весовых множителей искажает структуру частных оценок: малые веса занижают вклад соответствующих высоких балльных оценок, а высокие веса завышают вклад низких балльных оценок. В-третьих, частные критериальные показатели характеризуют различные аспекты качества объектов, т.е. являются *взаимодополняемыми*, но не взаимозаменяемыми. Следовательно, внутреннее перераспределение балльных оценок в суммарной оценке может существенно искажать картину реальных свойств объектов, поскольку вклад отдельных критериев в конечный результат может иметь прямо противоположный характер при неизменной суммарной оценке.

Таким образом, агрегирование частных критериев в единый обобщенный критерий не всегда допустимо. В связи с этим представляют интерес более тонкие подходы к построению схем многокритериального ранжирования, базирующиеся на *нелинейном* упорядочении объектов.

**Многомерное критериальное пространство**

Положим, что для ранговой оценки объектов принят обобщенный критерий качества (2). Однако, он не может служить единственной основой построения ранговых рядов. Необходима дополнительная информация, отражающая многокритериальную структуру оценок качества.

Образуем из частных критериев качества векторный критерий:

(3) $\mathbf{q} = (q_1, q_2, ..., q_n)$.

Его возможные значения составляют многомерное критериальное пространство $\mathbf{Q}$, которое будем рассматривать как подмножество $n$-мерного векторного пространства.

Введем в данном пространстве метрику:

(4) $\mathrm{dist}(\mathbf{q}, \mathbf{q}') = \sum_{i=1}^{n} w_i \, |q_i - q_i'|$

для $\forall \mathbf{q} = (q_1, q_2, ..., q_n), \mathbf{q}' = (q_1', q_2', ..., q_n') \in \mathbf{Q}$.

Введем также отношение доминирования по Парето [3]:

(5) $\mathbf{q}' \succ \mathbf{q}$,

означающее, что все компоненты вектора $\mathbf{q}'$ не меньше соответствующих компонент вектора $\mathbf{q}$ и по крайней мере одна из них больше. Заметим, что множество $\mathbf{Q}$ с введенным отношением порядка является решеткой [4].

Пусть $F : P \to \mathbf{Q}$ – отображение, ставящее в соответствие объектам $p \in P$ векторные оценки (3):

$$\mathbf{q} = F(p).$$

Рассмотрим множество всех векторных оценок $Q_0 = F(P)$.

Как известно, каждое конечное частично упорядоченное множество (ЧУМ) можно представить диаграммой Хассе [5] – орграфом, вершины которого представляют элементы ЧУМ, дуги – отношение порядка, причем из графа удалены петли и транзитивно замыкающие дуги. Заметим, что дуги связывают два элемента ЧУМ, один из которых покрывает другой (непосредственно следует за ним). Рассматриваемое множество векторных оценок $Q_0$ с отношением доминирования (5) представим таким взвешенным орграфом оценок $G$. Метрика (4) определяет расстояние между вершинами графа.

Граф $G$ отражает нелинейный порядок элементов множества $Q_0$. Приписывая каждой его вершине ранговую оценку (2), получим ранговую иерархическую структуру.

Максимальные элементы ЧУМ $Q_0$ образуют множество Парето – множество недоминируемых элементов.

Проблема многокритериального ранжирования включает также вопросы группировки объектов в кластеры и формирования иерархии кластеров. Для решения данных вопросов интерес представляют алгоритмы кластеризации, основанные на аппарате теории графов.

**Графовые алгоритмы кластеризации**

Суть таких алгоритмов [6, 7] заключается в том, что выборка объектов представляется в виде графа

$$G = (V, H),$$

вершинам которого соответствуют объекты, а ребра $h \in H$ имеют вес $\rho(h)$, равный «расстоянию» между объектами. Основными здесь являются три метода: построения минимального покрывающего (остовного) дерева, выделения связных компонент и послойной кластеризации.

***Метод минимального покрывающего дерева.*** На графе $G$ строится минимальное покрывающее дерево, из которого затем последовательно удаляются ребра с наибольшим весом. В результате получаем лес деревьев малого диаметра. Отметим, что диаметр взвешенного графа – это максимальное расстояние между всеми парам его вершин. Узлы каждого дерева образуют отдельный кластер.

***Метод выделения связных компонент.*** В графе удаляются все ребра с длиной, превышающей заданный порог $\delta$. Соединенными остаются только наиболее близкие пары вершин. В итоге граф распадется на несколько связных компонент, которые и есть кластеры.

***Метод послойной кластеризации.*** Метод основан на выделении связных компонент графа, расстояния между вершинами которых ограничены заданными порогами.

Формируется последовательность подграфов графа $G$, отражающая иерархические связи между кластерами:

(6) $G_0 \subseteq G_1 \subseteq ... \subseteq G_L$.

Здесь $L$ – количество уровней иерархии, $G_l$ – граф на $l$-м уровне:

$$G_l = (V, H_l), \quad H_l = \{h \in H : \rho(h) \le \delta_l\},$$

$\delta_l$ – порог расстояния для этого уровня, причем

$$G_0 = (V, \varnothing),$$

где $\varnothing$ – пустое множество ребер графа, а

$$G_L = G.$$

Посредством изменения порогов $\{\delta_0, \delta_1, ..., \delta_L\}$ можно контролировать глубину иерархии получаемых кластеров.

### Кластеризация многокритериальных объектов

В проблематике многокритериального ранжирования неизбежно обращение к задачам кластеризации, в которых заданную выборку объектов $P$ необходимо разбить на кластеры по степени предпочтительности. При решении данных задач естественно опираться на итог ранжирования объектов – орграф векторных оценок $G$, построение которого осуществляется по описанной выше алгоритмической схеме. Данный граф распадается на несколько связных компонент, к каждой из которых применимы рассмотренные выше графовые методы кластеризации с учетом специфики задач многокритериального ранжирования.

Для прикладных исследований особый интерес могут представлять кластеры древовидной структуры. В этом случае размер кластера определяется как высота дерева, каковым является кластер. Отметим, что процедуры агломерации кластеров в соответствии с иерархией (6) можно формализовать с помощью понятия гомоморфизма графов [4].

### Ранжирование сотрудников по профилю компетенций

Рассмотренный круг вопросов актуален для систем информатизации кадровых служб (HRIS – Human Resources Information System) – имеются ввиду задачи ранжирования сотрудников организации по профилю компетенций.

В современных организациях политика и практика управления персоналом строится на основе *компетентностного* подхода [8].

Результаты оценки компетенций служат базой для ряда направлений кадровой работы:

- поиска наиболее подходящих кандидатов на вакантную должность;
- анализа соответствия сотрудников занимаемой должности;
- планирования развития персонала.

Анализ качества персонала и формирование стратегий управления персоналом целесообразно основывать на разбиении работников на кластеры с близкими показателями компетенций. Задачи кластеризации данного типа с учетом векторной структуры оценки уровня компетенций должны базироваться на концепции многокритериального ранжирования [9] и современных методах кластерного анализа.

### Список литературы


[1] Петровский А.Б. Многокритериальное ранжирование объектов по противоречивым данным // Штучний інтелект. 2006. № 2. – С. 215-221.

[2] Сафронов В.В. Основы системного анализа: методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования. Саратов: Научная книга. 2009. – 329 с.

[3] Лотов А.В., Поспелова И.И. Многокритериальные задачи принятия решений. М.: МАКС Пресс. 2008. – 197 с.

[4] Новиков Ф.А. Дискретная математика для программистов. СПб.: Питер. 2003. – 304 с.

[5] Хаггарти Р. Дискретная математика для программистов. М.: Техносфера. 2005. – 400 с.

[6] Jain A., Murty M., Flynn P. Data Clustering: A Review // ACM Computing Surveys. 1999. Vol. 31. No. 3. – P. 264-323.

[7] Воронцов К.В. Алгоритмы кластеризации и многомерного шкалирования: курс лекций. М.: Изд-во МГУ. 2007. – 18 с.

[8] Уиддет С., Холлифорд С. Руководство по компетенциям. М.: Hippo 2003. – 228 с.

[9] Джабраилова З.Г., Нобари С.Р. Метод многокритериального ранжирования для решения задач управления персоналом // Штучний інтелект. 2009. № 4. – С. 130-137.

# УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ РОЗНИЧНЫХ БАНКОВСКИХ ПРОДУКТОВ

**А.М. Кистанов**

Самарский государственный технический университет
443071, Самара, Молодогвардейская, 244, Россия
plast@solid.ru

***Ключевые слова:*** *структура, жизненный цикл, управление, банковский продукт, рынок, порядок, наименование, банковские карты, цифровой макет*

**Abstract**
Banks retail product's live cycle management are considered in this article. PLM for banks showed as management of digital representation of structured information. In article defined needed based terms and any structure for banks products. PLM includes management of all banks product-related information from requirements, through design, manufacturing, and deployment.

## Введение

Считается, что понятие «жизненный цикл продукта» впервые ввел в 1965 году известный специалист по маркетингу Теодор Левитт. Термин оказался удачным, и был принят ряд стандартов, как в России, так и за рубежом, например[1-4]. В конце прошлого века во многом благодаря усилиям организации CIMData [5], специализирующейся на разработке ПО для управления промышленными предприятиями, в практику прочно вошла аббревиатура PLM (Product Live Circle Management) – «управление жизненным циклом продукта». CIMData дает этому следующее определение: «стратегический бизнес-подход, использующий связный набор бизнес-решений для обеспечения совместного создания, управления, распространения и использования информации, определяющей продукт через расширенное производство от концепции до завершения жизненного цикла – интегрируя людей, процессы, бизнес-системы и информацию» [6]. По мнению аналитиков, PLM становится стратегической бизнес-инициативой более важной, чем, например, ERP (enterprise resource planning), CRM (customer relationship management) и SCM (supply chain management).

Указанные выше решения в подавляющем большинстве случаев относятся к сфере материального производства. Опыт работы автора в банковской сфере позволяет сделать вывод, что направление PLM всецело можно отнести к деятельности кредитной организации в части управления жизненным циклом розничных банковских продуктов. Имеющиеся в этом направлении работы, как правило, акцентируются на проблемах организации продаж, управления ликвидностью, формирования тарифной политики розничных банковских продуктом [7,8,9] и не затрагивают процесс управления жизненным циклом. Интегративной основой такого процесса в производстве, по словам профессора М. Айгнера, «служит единая модифицируемая наращиваемая структура изделия, которая применяется на всех этапах его разработки и выпуска. Это означает, что вся информация об изделии формируется в виде компонентов такой структуры, преобразовываясь в процессе разработки и выпуска…» [10].

Заметим, что решения PLM (PLM solutions) не управляют непосредственно созданием того или иного изделия или продукта. Они управляют информацией об изделии на протяжении всего жизненного цикла от зарождения до утилизации. Можно характеризовать PLM как информационную магистраль организации, ключевую роль в которой играют методики и технологические решения по выстраиванию и интеграции бизнес-процессов и бизнес-систем.

Исторически, когда вопросы управления процессами материального производства рассматривались в самом широком плане, об управлении банковскими продуктами не было и речи. Еще два десятка лет назад было два вида вклада: срочный и до востребования. Безусловно, управлять их жизненным циклом не было необходимости. В настоящее время кредитные организации могут предложить несколько десятков, если не сотен зачастую взаимосвязанных банковских продуктов, каждый из которых определяется десятками параметров. Растущая рыночная конкуренция увеличивает, с одной стороны, сложность и номенклатуру банковских продуктов (различные каналы продаж, дополнительные сервисы, требования безопасности), а с другой – требует минимального времени выхода на рынок новой услуги. В этих условиях PLM-технологии, используемые в материальном производстве, могут с успехом применяться и в банковской деятельности.

Как отмечается в [10] «…ни один из ведущих мировых поставщиков пока не может предложить полнофункциональную систему PLM. Сегодня управление жизненным циклом изделия – это некоторая «философия», или, если хотите, набор решений, позволяющий объединять новые внедряемые системы с уже существующими и освоенными на предприятии.»

С этой точки зрения в статье рассматривается подход к решению задачи управления жизненным циклом банковских розничных продуктов: кредитов, депозитов, но в первую очередь, банковских пластиковых карт.

**Основные определения и подходы**

С содержательной стороны розничные банковские услуги – это сфера рыночных отношений, складывающихся по поводу удовлетворения потребностей физических лиц в услугах кредитных организаций.

Определим ***розничный банковский продукт*** как совокупность взаимосвязанных документов, определяющих экономические, юридические, финансово-учетные, технологические, организационные, потребительские условия его существования на протяжении всего жизненного цикла.

Информация о продукте, содержащаяся в PLM-системе, является цифровым макетом (digital representation) этого продукта. С технической точки зрения система PLM обеспечивает интеграцию всей этой информации в единой структуре. Итак, ***объектом управления*** является структурированный цифровой макет розничного банковского продукта от его зарождения до утилизации. Однако PLM не ограничивается только технологическим объединением данных из систем автоматизации разных этапов жизненного цикла – подход и решения PLM направлены на упорядочение бизнес-процессов, объединение всех разрозненных подразделений [10]. Изменения в цифровом макете продукта влекут изменения содержания. Если в структуре появился новый элемент, например, тарифы за пользование новой услугой или новым каналом, то новый текст тарифов должен появиться на сайте, в комплекте договоров, в подразделениях. Должны быть сгенерированы новые инструкции для персонала, работающего с клиентами и т.д. Система должна проверить новые тарифы на предмет коллизий с действующими продуктами. В общем случае должна работать связка PLM-PDM(Product Data Management). Управление жизненным циклом неизбежно ведет к управлению данными о продукте.

Рассмотрим пример продукта «Банковская кредитная карта». На практике, чтобы его создать (в зависимости от кредитной организации возможны различные подходы), необходимо разработать:

- карточку продукта, описывающую название, потребительские свойства, целевую аудиторию, экономическую эффективность, условия предоставления и т.д. Это своего рода техническое задание на разработку;
- типовую договорную документацию, включающую договоры (в том числе и договоры оферты), правила пользования, безопасности, справочники;

- тарифы и процентные ставки;
- бухучет операций, включая управление рисками;
- технологические настройки в IT–среде;
- инструкции операторам, обучающие материалы, изменения должностных обязанностей.

Формально продукт $P=\{p_i\}$, где $p_i$ – $i$-е описание продукта. Цифровым макетом продукта $L(P)$ является структурированное описание продукта, где каждое $p_i$ имеет также свою структуру, хранящуюся в информационной системе организации. Это может быть граф, решетка, дерево, прямоугольная таблица (гиперкуб).

Внешние воздействия требуют создания новых и модификации действующих продуктов в кратчайшее время. Отметим лишь некоторые из них:

- изменения в российском законодательстве;
- изменения в банковском законодательстве;
- изменения в правилах международных платежных систем;
- постоянно изменяющиеся требования рынка и растущие запросы клиентов;
- действия мошенников, особенно по отношению к банковским картам;
- увеличение мощности и производительности IT – инфраструктуры;
- изменения в типовых производственных процессах;
- изменения в структуре самой организационной системы (ОС).

Согласно[11] «…лишь 52% первоначально установленных требований к продукту находят свое отражение в его окончательной версии. Согласно традиционному эмпирическому правилу определения требований, следует рассчитывать на то, что каждый месяц будут меняться от 1 до 3% всех требований. Таким образом, в проекте, запланированном на два года, меняется (добавляется, удаляется или модифицируется) свыше 30% требований». Не обладая структурированной информацией о множестве взаимосвязанных продуктов и возможности менять эту структуру в зависимости от случайных внешних воздействий, невозможно решить эту задачу быстро и должным образом.

На рисунке 1 показана взаимосвязь банковского продукта и его цифрового макета. Подобные взаимосвязи формируются для всех розничных банковских продуктов.

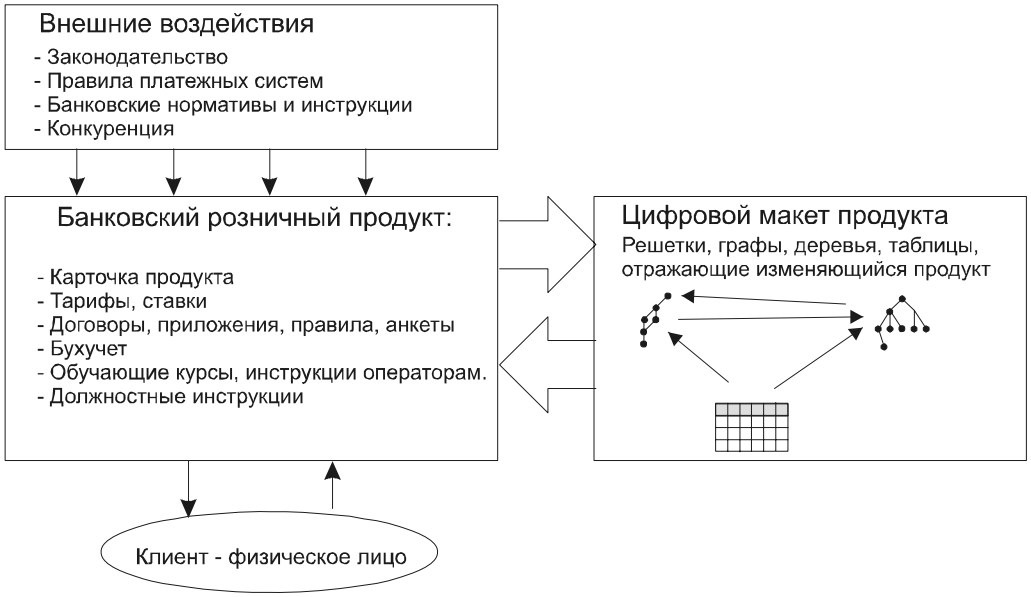



Рисунок 1 – Взаимосвязь продукта и его цифрового макета

Теория управления организационными системами [12], к которым, несомненно, относятся и кредитные организации, рассматривает управление ОС, как воздействие на управляемую систему с целью обеспечения требуемого ее поведения.

Исходя из изложенного, определим ***цель управления*** жизненным циклом розничных банковских продуктов как достижение максимальной экономической эффективности кредитной организации от предоставления взаимосвязанной совокупности продуктов на протяжении всего их жизненного цикла в условиях постоянного изменения требований к ним.

Несколько слов об устойчивости PLM. Система должна иметь возможность изменять параметры продукта. Если в процессе эксплуатации продукт перестал быть эффективным, то в описание продукта необходимо внести изменения и трансформировать эти изменения на все составляющие продукта: юридические, информационные и т.д. Воздействуя на информацию об определении продукта, на структуру взаимодействия мы возвращаем продукт в устойчивое состояние, когда он снова начинает приносить прибыль, либо этот продукт закрывается. К другим видам системных задержек можно отнести время на обучение, которое с учетом размера филиальной сети, может достигать нескольких недель.

Отметим, что речь не идет об управлении традиционными составляющими системы продуктов: процентными ставками, остатками, денежными потоками и т.д. Все изменения, которые вносят профильные подразделения, должны пройти сквозь всю информационную магистраль структуры продукта за приемлемое время, на которое могут накладываться различные ограничения, в том числе юридические. Например, информировать клиента об изменении ряда тарифов необходимо не позднее, чем за месяц до их вступления в силу. С недавнего времени по законодательству вообще запрещено менять ставки по кредиту по заключенным договорам.

**Разработка элементов структуры розничного банковского продукта**

Из множества описаний продукта рассмотрим в первую очередь структуру имени продукта или с его цифровой идентификатор. Безусловно, может присутствовать и звучный псевдоним (alias) для использования в рекламных целях, но для идентификации имени в информационной среде оно должно иметь строгое структурное наименование. Говоря о наименовании, приведем несколько цитат А.Ф. Лосева. «… имя вещи есть сила самой вещи. Поэтому я прямо утверждаю, что имя неотделимо от вещи, что оно есть оформление самой вещи в ее объективном существовании». [13 стр. 27]. «Тут-то мы и подходим к вскрытию природы имени. Ибо это мышление, восприятие, ощущение, чувствование и т.д. вещей только и возможно при помощи их имен, через эти имена» [13, стр. 43]. Например, продукт, имеющий краткое имя «пенсионная карта», на самом деле в системе представлен именем «debit visa electron rur пенсионная». По сути имя продукта – это пятибуквенное слово в некоторой формальной грамматике или допустимый на практике элемент $n_j$ декартова произведения $a_1 \times a_2 \times a_3 \times a_4 \times a_5$, где $a_1$={debit, credit}, $a_2$={visa, master card, jcb}, $a_3$={electron, classic, gold, platinum, infinity}, $a_4$={rur, usd, eur}, $a_5$={Ø, пенсионная, зарплатная, розничная, студенческая, социальная}. Однажды присвоенное имя уже не меняется на протяжении всего жизненного цикла продукта. Если в процессе деятельности кредитной организации при заданной структуре имени возникает необходимость создать новый продукт, то имя выбирается как элемент $n_j \in \times a_i$. Если внешние обстоятельства таковы, что требуют изменения самой структуры имени, то слово будет более, чем из пяти букв. Например, ко всем пяти признакам надо будет добавить $a_6$={реальная, виртуальная}, что именно и происходит в настоящий момент. Лет десять назад вопрос о виртуальных банковских картах вообще не стоял. Сейчас это практическая необходимость. Мы также не знаем, что потребуется в последующие десять лет, но мы должны быть готовы к изменениям. Что касается всей информационной магистрали, структурное имя бан-

ковского продукта фигурирует в карточке продукта, тарифах, WEB-банке, на внешнем и внутреннем сайте, меню программной оболочки специалиста.

Лица, принимающие решения оперируют терминами своего уровня управления. Содержательные высказывания необходимо транслировать в структуру, чтобы обеспечить функционирование PLM-системы. Рассмотрим основные типы банковских карт VISA в порядке повышения их престижности: electron, classic, gold, platinum, infiniti. Формальное описание в карточке продукта: «для держателей VISA infiniti разрешается выпускать неограниченное число линкованных карт VISA platinum и VISA gold» трансформируется в системе в цепочку $IP^kG^k$. Соответственно для других типов это могут быть, например, цепочки: PGC, GCE, CE. Необходимо также построить систему отношений S(I)>S(P)>S(G), указывающую на отношения в одноименных тарифах.

**Заключение**

В статье поставлена задача и рассмотрены подходы к управлению жизненным циклом розничных банковских продуктов. Отмечено, что принципы PLM-решений, возникшие как объективная необходимость для управления в сфере материального производства, могут с успехом применяться в сфере нематериального производства, в частности в кредитных организациях. Это вполне соотносится с диалектикой развития управления, по которой «…История развития технологий обеспечения управления… была историей смены приоритетов между построением методологий управления… и созданием информационным обеспечением управления. [14]. Именно созданием информационного обеспечения управления и посвящена данная статья.

**Список литературы**


[1] ГОСТ Р 50-605-80-93 Р 50-605-80-93 Система разработки и постановки продукции на производство. Термины и определения.
[2] ГОСТ 34.601-90. ЕКС АС. Автоматизированные системы. Стадии создания.
[3] IEEE 12207.0-1996 - Standard for Information Technology - Software Life Cycle Processes.
[4] IEEE 1074-1997 - Standard for Developing Software Life Cycle Processes.
[5] http://www.cimdata.com
[6] http://www.cimdata.com/publications/reports_complimentary/white_papers.html
[7] http://bankir.ru/obuchenie/s/upravlenie-bankovskim-produktom-razrabotka-organizatsiya-prodazh-monitoring-i-otsenka-effektivnosti-459/#ixzz1qgXCG2XH «Управление банковским продуктом: разработка, организация продаж, мониторинг и оценка эффективности»
[8] http://www.dedegkaev.ru/index.php/bankmarketing/137-tcikl.html
[9] http://www.ifbsm.ru/ Международная московская финансово-банковская школа: «Управление банковским продуктом: разработка, организация продаж, мониторинг и оценка эффективности».
[10] Мартин Айгнер. Быть ли PLM в России? Computerworld Россия, № 33, 2008.
[11] Кристофер Эберт Жизненный цикл продукта: основные методики инженерии требований. Открытые системы №7 2006 г.
[12] Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Введение в теорию управления организационными системами / Под ред.чл.-корр. РАН Д.А. Новикова. – М.: Либроком, 2009. – 264 с.
[13] Лосев А.Ф. Вещь и имя. Самое само. – СПб.: «Издательство Олега Абышко», 2008, 576 с.
[14] Пунда Д.И. Две формы представления деятельности и когнитивная природа происхождения современного понятия «Управление сложностью». Труды XIII международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара, 15-17 июня 2011 г.

# РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ИНТЕРНЕТ - РЕКЛАМЫ НА ОСНОВЕ КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ

**И.А. Минаков[2], С.И. Вольман[2], Д.А. Ёлкин[2]**

[1]Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
cscmp@iccs.ru
тел: +7 (8462) 32-39-27, факс: +7 (8462) 33-27-70

[2]ООО НПК «Максифаер Девелопмент»
443125, Самара, ул. Ново-Садовая, 349, Россия
dmitry.yolkin@maxifier.com
тел: +7 (846) 342-51-74; 342-51-75

***Ключевые слова:*** *Интернет реклама, рекламная кампания, ключевые слова, оптимизация по ключевым словам, пара ключ/значение*

**Abstract**
The article describes last trends in Internet advertisement area - keyword/key-value terms and optimization methods used based on keyword statistics. Article covers technical process of ad-deliveries, different optimization methods and their comparative analysis on real life scenarios.

## Введение

В настоящее время в области оптимизации Интернет – рекламы наблюдаются новые тенденции, не проявлявшиеся еще несколько лет назад. Среди таких трендов можно отметить стремление рекламодателей оценивать эффективность рекламных кампаний [1] не по количеству доставленных показов или кликов, а эффективности действий, которые конечный пользователь совершил с каждой конкретной кампанией, например, уровень интерактивного взаимодействия с рекламным баннером или регистрация на сайте рекламодателя, не говоря уже о приобретении товара или услуги.

Кроме того, все чаще и чаще в последнее время рекламодатели стремятся показать рекламу не просто на конкретной странице или в конкретной стране или городе, и именно конкретному пользователю или хотя бы целевой аудитории – т.е. тем, кто по предварительной оценке должен быть наиболее восприимчив к конкретной рекламе. Например, если мы говорим о рекламе автомобилей, то данную рекламу целесообразно показывать пользователям, которые, к примеру, посещали сайт автомобильных новостей больше, чем несколько раз за последнюю неделю.

С технической точки зрения для реализации этого стремления используются ключевые слова. Рекламодатели и медийные агентства конструируют сложные сематические конструкции путем формирования булевского выражения, описывающего на основе ключевых слов целевую аудиторию, что дает им большую гибкость при управлении своими рекламными кампаниями. Какие преимущества предоставляет использование ключевых слов?

- с помощью ключевых слов, пользователю может показываться в первую очередь та реклама, которая наиболее точно соответствует запросу, введенному пользователем в поисковую систему (напр., google, yandex и т.д.), и тем самым, которая наиболее релевантна текущим потребностям пользователя;
- с помощью ключевых слов и выражений, заданных для рекламных кампаний, можно установить семантическое соответствие со страницами, семантическими дескрипторами или

иными способами описания семантики страниц, на которых может быть показана данная кампания. Семантические дескрипторы могут строиться автоматически в фоновом режиме с помощью специальных утилит и приложений. В простейшем же случае веб-мастер при верстке каждой страницы может вставлять в запрос на получение рекламы от рекламного сервера некоторый семантический дескриптор (например, перечень ключевых слов, описывающих семантику страницы), на основе которого и возвращаются кампании, наиболее релевантные данной странице.

- с помощью ключевых слов можно более гибко управлять собственным инвентарем (т.е. перечнем сайтов, страниц, которые доступны пользователю, и на которых может быть показана реклама). Так, например, если на некотором сайте все страницы динамические и каждая новая статья имеет свой уникальный адрес в интернете в пределе данного сайта, то гораздо проще не вносить каждую статью в общий регистр доступных страниц, а просто разметить ее необходимыми ключевыми словами, описывающими содержание статьи, и уже привязывать рекламу к странице на основе этих ключевых слов.

Учитывая тот фактор, что использование ключевых слов – мощный инструмент, который относительно недавно стал активно использоваться, на текущий момент задача оптимизации по ключевым словам приобретает всю большую и большую актуальность.

**Примеры ключевых слов и выражений**

Прежде, чем приступить к описанию конкретных примеров ключевых слов, хотелось бы отметить, что общий термин ключевые слова можно разделить на несколько категорий:

1) непосредственно *ключевые слова*, которые представляют собой отдельные слова или фразы, написанные на понятном человеку языке и наделенные некоторым семантическим смыслом. Как правило, когда рекламная кампания описывается с помощью ключевых слов, то оператор может указать, что именно он хочет:
   - чтобы все или хотя бы одно из указанных ключевых слов или фраз присутствовало /отсутствовало на странице, на которой должна быть показана реклама; В качестве примеров можно привести следующие выражения:
   - *makeup,eye+makeup,eyeshadow,eye+shadow,lip+gloss,mascara* – т.е. данный набор ключевых слов объединен через логическое ИЛИ и значит, что кампания может быть показана на странице, если хотя бы одно из этих слов/фраз встретится на этой странице;
   - *bmw,audi,!porshe,!opel* – данный набор ключевых слов означает, что реклама будет показана на страницах, которые описывают такие марки как BMW и Audi, но не будет показана на страницах, посвященных описанию Porshe и Opel. Заметим, что синтаксис, в котором представляются конкретные ключевые слова и выражения, зависит от выбранного рекламного сервера, который и занимается физической доставкой рекламы на страницы для отображения ее конкретному пользователю.
2) *пара ключ-значение и булевые выражения*, составленные из различных ключей и их значений. Основное отличие от ключевых слов заключается в том, что в данном случае у нас один какой-то ключ может принимать множество всевозможных значений. В качестве примеров можно привести следующие выражения:
   - *((CAR_MAKE=nissan) AND (CAR_LOC~lo))* – данное выражение обозначает, что рекламная кампания может быть показана только на страницах, имеющих отношение к автомобильной марке nissan, которые продаются/сдаются в аренду в городах, содержащих в своем названии символы lo, например, London. Стоит отметить, что это реальное ключевое выражение, взятое от кампании, рекламирующей сдачу автомобилей в аренду.

- Не все ключевые выражения такие тривиальные и легко понятные пользователю, так например, существуют выражение вида:
  (((CAR_MAKE=hyundai))AND((CAR_AGE=1)OR(CAR_AGE=2)OR(CAR_AGE=3)OR(CAR_AGE=4)OR(CAR_AGE=5)OR(CAR_MIN=5000)OR(CAR_MIN=6000)OR(CAR_MIN=7000)OR(CAR_MIN=8000)OR(CAR_MIN=9000)OR(CAR_MIN=10000)OR(CAR_MIN=11000)OR(CAR_MIN=12000)OR(CAR_MIN=13000))))
  В данном выражении используется уже больше ключей и их значений, и при показе рекламы пользователю принимается во внимание не только марка автомобиля, но и его возраст и минимальная стоимость. Зачастую, для того? чтобы пользователю был более понятен смысл данного выражения, такие выражения требует упрощения за счет выполнения над ними правил булевой алгебры.

Физический механизм сопоставления рекламной кампании, описанной с помощью ключевых слов и выражений, со страницей, на которой может быть показана реклама, происходит следующим образом (Рисунок 1):

- когда пользователь заходит на какую-то страницу, то загружается содержимое этой страницы, в том числе рекламному серверу посылаются запросы на получение рекламных баннеров;
- в момент формирования запроса к рекламному серверу, определяется список ключевых слов или пар ключ-значение, которые описывают семантическое содержимое данной страницы и уже этот список вставляется в запрос к рекламному серверу. Что именно посылать рекламному серверу - отдельные ключевые слова или пары ключ-значение - зависит от того, как именно они ищутся на странице.
  - Если в качестве ключевых слов используется содержимое cookie пользователя, то целесообразнее посылать ключевое выражение, составленное из пар ключ-значение.
  - Если список ключевых слов определяется с помощью частотного анализа вхождения тех или иных слов на странице (например, этим занимается компания Grapeshot), то проще сформировать ключевое выражение, состоящее из отдельных слов.
- После того, как запрос отправлен рекламному серверу, он определяет, какому именно ключевому выражению, которое используется для описания рекламной кампании, больше соответствует этот запрос. И уже на основе этой информации выбранный рекламный баннер отдается на страницу пользователя.

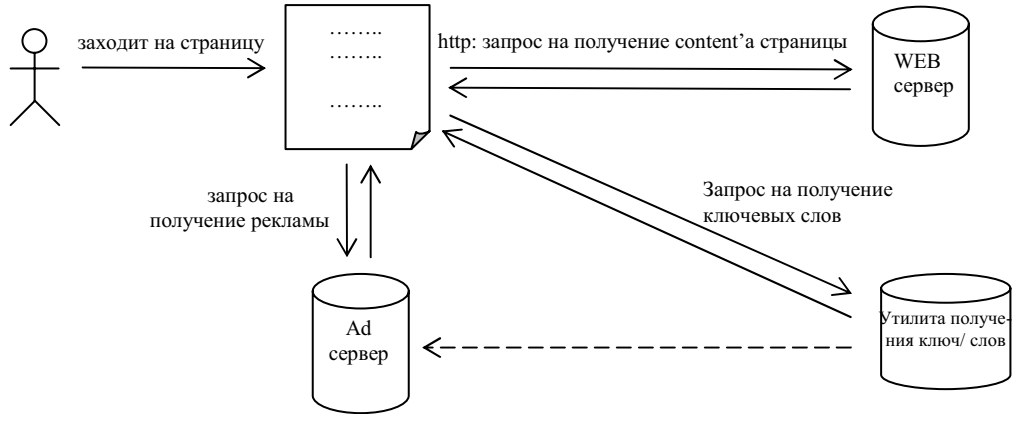



Рисунок 1 – Диаграмма процесса отображения пользователю html – страницы, содержащей рекламу с ключевыми словами

**Основные шаги оптимизации по ключевым словам**

Оптимизацию по ключевым словам можно разделить на несколько этапов:

- преобразование исходного булевого выражения, составленного с помощью ключевых слов и связанного с некоторой рекламной кампанией, к некоторому выбранному базису, в котором может работать ваша система. Приведение исходного выражения к выбранному базису необходимо, потому что разные клиенты могут составлять исходные булевые ключевые выражения разной степени сложности и оптимальности. Преобразование к выбранному базису позволит вам иметь внутри системы ключевое выражение в одном постоянном формате, что облегчит работу и понимание данного выражения в дальнейшем.
- получение статистической информации по каждому ключевому слову, по значению каждого отдельного либо совокупности интересующих вас ключей;
- на основе имеющейся статистической информации делаем вывод, как именно будет происходить оптимизация, и какие подходы будут использоваться [2]:
  - отдельно по каждому ключу и его значениям (например, рассматриваем только все значения ключа $key_1$ независимо от статистики, набранной другими ключами и значениями)
  - не выделять отдельный ключ либо семантическую категорию и оптимизировать по всем ключам и значениям сразу (например, за раз можно исключить от кампании наименее эффективные значения ключей $key_1$, $key_2$, …, $key_n$)
  - рассматривать и удалять не отдельные значения отдельных ключей, а наименее эффективную комбинацию тех или иных значений. Например, если значения $key_1=value_1$ и $key_2=value_2$ часто используются совместно, т.е. по ним обоим есть одинаковая статистика, и при этом эта комбинация значений наихудшая среди прочих аналогичных комбинаций, то предлагать исключать за раз не отдельную пару $key_1=value_1$ или $key_2=value_2$, а всю комбинацию $key_1=value_1$ и $key_2=value_2$ целиком.
- На основе статистической информации и выбранного оптимизационного подхода получить новое булевое выражение, которое по сравнению с первоначальным выражением будет содержать меньше неэффективных элементов, либо не будет содержать их вообще, либо, наоборот, будет содержать новые более эффективные с точки зрения выбранного оптимизационного подхода ключевые слова и их значения.

**Выбор и построение ключевого базиса**

В зависимости от задач и потребностей могут использоваться различные базисы и алгоритмы приведения к ним. В рамках тех задач, которые нам приходилось решать, использовался следующий подход для построения базиса:

- по исходному ключевому выражению первоначально определялась совокупность базовых форм, где базовая форма представляла собой ключ, значение и операцию между ними;
- затем формировалось нормированное выражение, которое представляло собой дизъюнктивную нормальную форму исходного выражения (дизъюнкцию конъюнкций базовых выражений)
- затем строилась "осевая" форма выражения – это представление нормированного выражения в виде конъюнкций, причем аргумент любой конъюнкции зависит только от одного ключа. Именно с этой осевой формой, если она могла быть построена, осуществлялась дальнейшая работа с точки зрения оптимизации. Алгоритм построения «осевой» формы на основе нормальной формы следующий:
  - берем все ключи и для каждого выполняем следующие шаги:
    - для каждой конъюнкции базовых выражений исключаем выбранный ключ, получаем набор выражений без заданного ключа;

- если все полученные выражения эквивалентны, то выносим все исключенные базовые выражения в отдельный операнд нового конъюнктивного выражения и выполняем предыдущий шаг для другого ключа, иначе считаем выражение неприводимым к осевой форме.

Для того чтобы описанный алгоритм стал более понятен и очевиден, приведем пример. Допустим, у нас есть исходное ключевое выражение вида:

*car=bmw and type=sedan, car=bmw and type=hatchback, car=bmw and type=cuf, car=bmw and type=offroad, car=bmw and type=cabriolet, car=bmw and type=moto, car=bmw and type=premium*

В данном случае исходное выражение представляет собой нормированное выражение (дизъюнкцию конъюнкций). По нормированному выражению строим «осевую» форм, используя алгоритм, описанный выше. Для данного выражения она будет равна:

*car=bmw and type in (sedan, hatchback, cuf, offroad, cabriolet, moto, premium)*

Именно с этой осевой формой будет осуществляться дальнейшая работа. Приведение к «осевой» форме осуществляется по нескольким причинам:

- она проще для понимания конечным пользователем
- если мы говорим об оптимизации, то основные приемы, используемые в оптимизации для улучшения CTR или доставки кампании, это удаление неэффективных или добавление более эффективных ключей и их значений. Но прежде, чем что-то удалить из выражения, необходимо убедиться, что кампания идет на данном элементе и что удалить желаемый элемент из исходного булевого выражения в принципе возможно. Аналогичная проверка характерна и для добавления элементов. А сделать проверки, описанные выше, на основе «осевой» формы гораздо проще, чем на основе исходного выражения.

**Методы и результаты оптимизации по ключевым словам**

В качестве методов оптимизации по ключевым словам могут использоваться статистические методы оптимизации, применяемые для оптимизации и других параметров рекламной кампании (например, страниц, часов, дней недели, браузеров, операционных систем, гео информации и т.д.). Более детально данные методы описаны в статьях [3, 4]. Если говорить кратко, то для оптимизации по CTR используются статистические методы, работающие на основе исторической статистики за последние 2-3 недели и предлагающие удалить наименее эффективные ключи и их значения, т.е. элементы, на которые приходится достаточное количество показов, но при этом реакция пользователей в виде кликов невелика. Стратегия поиска неэффективных элементов определяется конкретным выбранным оптимизационным алгоритмом.

Если мы говорим об улучшение доставки кампании, то в первую очередь наша задача – это расширить таргетинг по ключам, т.е. чтобы наша рекламная кампания показывалась на максимально возможном количестве ключей и их значений. Чтобы сделать это, в первую очередь, надо добавить те значения ключей, на которых кампания еще не идет и которые семантически совместимы с данной рекламой. Во-вторых, если в ключевом выражении есть ограничения, чтобы кампания не шла на каких-то ключах, надо постараться убрать эти ограничения, если это не противоречит контракту с рекламодателем.

Основное отличие ключевых слов от других параметров рекламной кампании заключается в том, что ключевые слова могут быть наделены семантическим смыслом. Т.е. даже не имея никакой статистической информации по ключевым словам и значениям, потенциально, используя методы контекстной оптимизации [2], можно показывать пользователю релевантную рекламу и увеличивать показатели эффективности этой рекламы, такие как доставка и CTR. Авторами статьи ранее были разработаны методы контекстной оптимизации по ключевым словам, суть которых заключалась в том, что:

- для каждой страницы, на которой уже идет или потенциально может идти рекламная кампания, мы должны получить дескриптор, описывающий семантику данной страницы.
  - Данный дескриптор в простейшем случае может представлять собой набор ключевых слов, наиболее часто встречающихся на данной странице (за исключением всевозможных стоп-слов и слов, не несущих семантической нагрузки)
  - В более сложном варианте для каждой страницы строится семантический дескриптор, который представляет собой некоторую онтологическую сеть, и построенный с помощью методов морфологического, синтаксического и семантического анализа [5]. По сравнению с методами частотного анализа, данный подход позволяет не просто определить наиболее часто встречающиеся слова и фразы, но и выстроить семантические отношения между ними. Что позволяет осуществлять сравнение таких семантических дескрипторов между собой гораздо эффективнее.

Построенный семантический дескриптор может быть использован несколькими способами:

- Если семантический дескриптор представляет собой набор наиболее часто встречающихся ключевых слов на странице, на которой может идти рекламная кампания, то необходимо добавить эти ключевые слова в параметры таргетинга данной рекламной кампании. Т.е. кроме того, что кампания будет непосредственно запланирована на конкретные страницы, она будет запланирована и на ключевые слова. Это позволит показывать данную рекламу более эффективно. За счет того, что когда пользователь в некотором поисковике введет ключевые слова, на основе которых ему будет показана одна из страниц, на которых идет наша реклама. То именно наша рекламная кампания будет показана в первую очередь, по сравнению с другими рекламными кампаниями, также запланированными на данную страницу, но не имеющими ключевых слов в параметрах таргетинга. Это происходит потому, что у большинства рекламных серверов рекламные кампании с таргетингом по ключевым словам имеют более высокий приоритет доставки, по сравнению с кампаниями, не имеющими ключевого таргетинга. И в результате данного подхода мы сможем улучшить доставку и эффективность нашей кампании.
- Когда семантический дескриптор представляет собой онтологическую сеть, то:
  - необходимо построить аналогичные семантические дескрипторы для всех страниц, на которых в настоящий момент не идет выбранная рекламная кампания.
  - для данной рекламной кампании на основе описания, поставляемого для данной рекламы в виде понятного человеку текста, построить аналогичный семантический дескриптор в виде онтологической сети.
  - после того как дескрипторы для кампании и для всех страниц построены, необходимо произвести сравнение – какие именно семантические дескрипторы страниц наиболее близки дескриптору рекламной кампании. И на основе результатов сравнения выбрать наиболее подходящие страницы и запланировать на них рекламную кампанию

В рамках ООО НПК «Максифаер Девелопмент» было разработано собственный программный продукт, который представляет собой систему поддержки принятия решений, направленный на оптимизацию рекламных кампаний по ключевым словам. Пример рекомендации, которая дается пользователю для улучшения CTR выбранной рекламной кампании, можно увидеть на Рисунок 2. На данном рисунке показано, что для конкретной рекламной кампании генерируется рекомендация, которая на основе статистической информации, накопленной за последнее время, предлагает удалить 3 наименее эффективных с точки зрения CTR элемента (помечены красным). В результате применения данной рекомендации CTR кампании должен возрасти на ~11%.

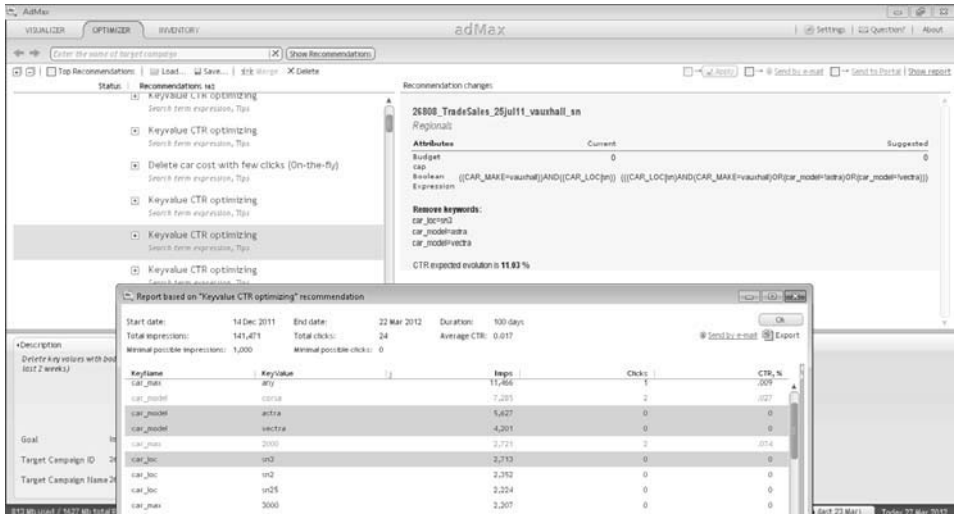



Рисунок 2 – Пример системы поддержки принятия решений, используемой для оптимизации рекламных кампаний по ключевым словам

В рамках исследования, запущенного с целью выявление потенциального прироста CTR кампаний, в результате применения оптимизации по ключевым словам, было выявлено, что в среднем ожидаемый прирост варьируется от 10 до 20%. Что, в совокупности с другими методами оптимизации, может существенно увеличить эффективность хода рекламных кампаний. Детальное сравнение приведено в Таблица 1. Данное исследование проводилось на выборке, состоящей из 30 рекламных кампаний, каждая из которых наблюдалась в течение месяца. Каждая рекламная кампания была разделена на 5 подкампаний, имевших изначально одинаковые параметры таргетинга. Далее к первой группе кампаний применялись только методы статистической оптимизации по страницам, ко второй методы статистической оптимизации по страницам и эвристические методы. Аналогично к третьей, четвертой и пятой группам применялись соответствующие методы, приведенные в таблице. Анализ показывает, что чем большее количество методов  применимо при оптимизации, тем выше потенциальный прирост эффективности.

Таблица 1 – Сравнение эффективности различных оптимизационных подходов

| **Метод оптимизации** | **Прирост по доставке** | **Прирост по CTR** |
|---|---|---|
| Статистическая оптимизация по страницам | 5-7% | 5-10% |
| Статистическая оптимизация по страницам + эвристические методы (Frequency Capping, распределение в течение дня) | 7-10% | 10-13% |
| Оптимизация по страницам + оптимизация по ГЕО – информации, браузеру, операционной системе | 10%-13% | 13%-18% |
| Оптимизация по страницам + ГЕО (включая браузеры, ОС) + статистическая оптимизация по ключевым словам | 13%-18% | 18%-23% |
| Оптимизация по страницам + ГЕО (включая браузеры, ОС) + статистическая и контекстная оптимизация по ключевым словам | 18%-22% | 23%-28% |

## Заключение

В рамках данной статьи рассмотрены основные шаги, которые выполняются в рамках оптимизации по ключевым словам - дано определение ключевого слова, пары ключ/значения и булевых выражений, которые применяются для описания таргетинга рекламной кампании по ключевым словам, рассмотрен физический процесс доставки рекламной кампании на страницу, которую посетил пользователь, с учетом специфики данной страницы с позиции ключевых слов и различные подходы к оптимизации по ключевым словам.

Анализ подходов оптимизации ключевых слов показал, что их использование позволяет дополнительно повысить CTR рекламных кампаний в среднем на 10-20%.

Использование таргетинга по ключевым словам дает возможность гибко настраивать рекламные кампании, чтобы добиться наибольшей эффективности и в то же время упростить процесс управления инвентарем владельца сайтов.

## Список литературы


[1] Plummer Joe, Rappaport Steve, Hall Taddy, Barocci Robert The Online advertising playbook. //Wiley 2007, John Wiley & Sons, Inc, 2007, p. 28-32

[2] Минаков И.А., Елкин Д.А., Вольман С.И. Обзор подходов оптимизации Интернет-рекламы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XI Междунар. конф., Самара, 22 июня – 24 июня 2009. Самара: СНЦ РАН, 2009. С. 634-643.

[3] Елкин Д.А., Минаков И.А., Вольман С.И. Использование методов статистической оптимизации для улучшения эффективности показа интернет рекламы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XII Междунар. конф. Самара, 21 – 23 июня 2010.– Самара: СНЦ РАН, 2010. С.577-585.

[4] Д. Елкин , И. Минаков, С. Вольман Автоматическая оптимизация Интернет-рекламы // Вестник Самарского гос. техн. ун-та, #3 (31) 2011. Сер. «Технические науки». Самара: СамГТУ, стр. 228-232

[5] Минаков И.А. Алгоритм кластеризации семантических дескрипторов документов // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. «Технические науки». Самара: СамГТУ, 2009.

# КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ОЦЕНКЕ СОТРУДНИКОВ ПРЕДПРИЯТИЙ

**А.З. Асанов, И.Ю. Мышкина**

Казанский (Приволжский) федеральный университет
423812, Набережные Челны, пр. Сююмбике, 10А, Россия
mirinau@mail.ru
тел: +7 (8552) 38-34-05, факс: +7 (8552) 58-88-94

***Ключевые слова**: когнитивная карта, нечеткая логика, моделирование, профессиональные знания*

**Abstract**
In this article models of the professional knowledge of the specialist are considered. Models are based on cognitive maps. In the article the comparative analysis of offered models is considered.

## Введение

Задача оценки персонала предприятий является важной составляющей его кадровой политики и необходима при организации различных мероприятий кадровой работы [1]: отбор и найм персонала, сокращение штата сотрудников, принятие решений о целесообразности и возможности организации повышения квалификации, принятие решений о кадровых перестановках и т.д.

Основной целью проводимого исследования стало построение и сравнение моделей специалиста, позволяющих представить его профессиональные знания с учетом их взаимосвязей и стадий формирования, а также разработка интеллектуального (обучающегося) алгоритма оценки соответствия специалиста должности.

Одним из недостатков существующих подходов к оценке профессиональных знаний является невозможность учета уровней развития профессионального знания на основе учета наличия базовых знаний (в смысле преемственности) у оцениваемого специалиста. С другой стороны данные об имеющихся у специалиста профессиональных знаниях позволяют с некоторой вероятностью вычислять оценку наличия у соискателя сопутствующих знаний. Учет таких данных делают оценку соответствия специалиста некоторой должности более адекватной.

В качестве модели профессиональных специалиста в данной работе выбрана когнитивная модель (когнитивная карта), в качестве концептов которой выбраны профессиональные знания с учетом их детализации, связи между концептами интерпретированы как связи в смысле преемственности соответствующих знаний (компетенций).

В работе была осуществлена реализация и проверка на соответствие целям проводимой работы различных типов когнитивных карт (в том числе четких, нечетких продукционных); проведен их сравнительный анализ; изучены вопросы, связанные с возможностью обучения карт на основе статистической выборки путем моделирования импульсного процесса на карте.

## 1 Постановка задачи

Пусть $Z = \{Z_i\}$, $i = \overline{1, N}$ – множество профессиональных знаний, определяющих портрет специалиста некоторой должности, включающих базовые знания, являющиеся этапом освоения основных. На множестве $Z$ построен ориентированный граф $G =< Z, E >$, где $Z$ – мно-

жество вершин, $E = \{e_{ij}\}$, $i = \overline{1,N}$, $j = \overline{1,N}$, – множество дуг, которые отражают взаимосвязи между вершинами $Z_i$ и $Z_j$. Причем $e_{ij} = 1$, если специалист владеет знанием $Z_i$, то с некоторой «вероятностью» специалист владеет знанием $Z_j$; $e_{ij} = 0$, если связь между знаниями $Z_i$ и $Z_j$ отсутствует.

Рассматривалась задача в следующей постановке: на основе построенного графа, а также сведений о наличии/отсутствии или оценок знаний специалиста, оценок значимости профессиональных знаний для занятия должности получить оценку соответствия соискателя вакансии. Важными подзадачами данной задачи является необходимость выбора вида представления указанных оценок (четких/нечетких).

## 2 Четкая когнитивная карта

Когнитивная модель имеет вид [2]:

$$\Phi =< G, V, F >,$$

где $G =< X, E >$ – ориентированный граф, где $X$ – множество вершин (концептов), причем $X = \{X_j\} = \{Z_i\} \cup \{S\}$, $i = \overline{1,N}$, $S = X_{N+1}$ – вершина (концепт) «соответствие требованиям вакансии»; $E = \{e_{ij}\}$, $i, j = \overline{1, N+1}$ – множество дуг, причем $e_{i,N+1} = 1$ (т.е. все «концепты-знания» связаны с концептом $S$ = «соответствие требованиям вакансии»);

$V = \left\{V^{X_i}\right\}$, $i = \overline{1, N+1}$ – множество параметров вершин $X$;

$F = F(V, E) = f(v_i, v_j, e_{ij})$ – функционал преобразования дуг, ставящий в соответствие каждой дуге весовой коэффициент $w_{ij}$.

Под влиянием различных возмущений (импульсов) значения переменных в вершинах когнитивной модели могут изменяться. Правило, по которому происходит изменение значений вершин (импульсное моделирование), имеет вид:

$$v_i(t+1) = v_i(t) + \sum_{j=1}^{N+1} w_{ji} \cdot p_j(t),$$

где $w_{ji}$ – вес связи между вершинами (знаниями) $X_i$ и $X_j$ (если $i = 1 + N$, то $w_{ji}$ – сила влияния j-го знания на оценку соответствия требованиям вакансии); $p_j(t) = v_j(t) - v_j(t-1)$ – величина изменения j-ой вершины на шаге моделирования t. В поставленной задаче значение вершины $v_i$ может быть интерпретировано либо как наличие $v_i = 1$ (отсутствие $v_i = 0$) знания $Z_i$, $i = \overline{1,N}$; либо как уровень сформированности знания $Z_i$, $v_i \in [0;1]$ у соискателя.

В условиях решаемой задачи данное правило с учетом ограничения примет вид:

$$v_i(t+1) = v_i(t) + \sum_{j=1}^{N+1} w_{ji} \cdot p_j(t) \cdot H(v_i(0)),$$

где $H(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \le 0 \\ 0, & \text{если } x > 0 \end{cases}$. Ограничение введено для того, чтобы вершины с заданными в начальный момент импульсами не изменяли в процессе моделирования своих значений (значения этих вершин изначально уже известны).

Алгоритм:

1) Составление когнитивной карты экспертами. Каждая вершина-знание имеет дугу к результирующей вершине «соответствие требованиям вакансии». Веса дуг к результирующей вершине растут при удалении от нее.

2) Импульсное моделирование для каждого соискателя. Если оцениваемый специалист владеет некоторым набором знаний, то в соответствующие вершины добавляется единичный импульс (либо импульс соответствующий уровню сформированности знания [0;1]).
3) Чем больше будет значение результирующей вершины (концепта), тем больше соискатель соответствует вакансии.

Максимальное значение в результирующей вершине $v_{N+1}$ достигается, если $p_i(0)=1$ (т.е. соискатель обладает всеми знаниями, представленными в модели), $\forall i=\overline{1,N}$. Данное значение может быть использовано для приведения оценок соискателей к значениям из отрезка [0;1].

Пусть для соискателя $S_1$ в результате моделирования получены значения вершин $\{v_1^1, v_2^1, ..., v_N^1, v_{N+1}^1\}$, для соискателя $S_2$ – $\{v_1^2, v_2^2, ..., v_N^2, v_{N+1}^2\}$, причем $v_{N+1}^1 < v_{N+1}^2$. Допустим, впоследствии на практике оказалось, что уровень соответствия вакансии у специалиста $S_1$ в действительности выше. В этом случае можно провести настройку весов дуг, связывающих концепты-знания, которыми владеет *только* первый и второй соискатель $\left(Z^1 \setminus Z^2\right) \cup \left(Z^2 \setminus Z^1\right)$, с результирующей вершиной.

Веса настраиваются с целью минимизации функции

$$F = \frac{1}{2} \cdot \left( \left( \sum_{j=1}^{N} w_{j,N+1} \cdot p_j^1 - v_{N+1}^2 \right)^2 + \left( \sum_{j=1}^{N} w_{j,N+1} \cdot p_j^2 - v_{N+1}^1 \right)^2 \right).$$

Настройку весов можно осуществить с помощью метода градиентного спуска.

Рассматривалась возможность применения правила, по которому происходит изменение значений вершин построенной когнитивной карты, в следующем виде [3,4]:

$$v_i(t+1) = f\left( \sum_{j=1}^{N+1} w_{ji} \cdot v_j(t) \right),$$

где f() – нелинейная, монотонно возрастающая функция, преобразующая сумму входов, втекающих в i-ый узел, в некоторое число из интервала [0;1].

Так как все веса дуг положительные, то использование данного правила приведет к неоправданному увеличению результирующего концепта даже в случае низкого уровня знаний, что делает невозможным применение данного правила для решения поставленной задачи.

### 3 Нечеткая продукционная когнитивная карта

В данных когнитивных картах (Rules Based Fuzzy Cognitive Maps – нечеткие когнитивные карты, основанные на правилах) для описания влияний между концептами используются нечеткие продукционные правила [3]. В этих картах концепты представлены в виде нечетких множеств, определяемых функциями принадлежности к базовому множеству. Причинно-следственные отношения между двумя концептами выражены в виде нечеткого продукционного правила со структурой «один вход-один выход»:

ЕСЛИ «увеличение концепта $X_j$ малое», ТО «уменьшение концепта $X_i$ среднее»

Для объединения отдельных влияний на выходном концепте применяется специальная операция «нечеткого аккумулирования с переносом» (Fuzzy Carry Accumulation) [3,5,6]. Этот вид аккумулирования позволяет обрабатывать нечеткие числа по двум «координатам» (принадлежности и базовому множеству) и учитывать аддитивный характер влияний отдельных концептов.

Применительно к поставленной задаче причинные связи между концептами имеют некоторые особенности. Продукции, задающие связи между концептами-знаниями $X_j$ и $X_i$

($i = \overline{1, N}$), описывают увеличение концепта $X_i$ в зависимости от значения приращения концепта $X_j$.

Влияния же концептов-знаний на результирующий концепт $X_{N+1}$ могут приводить как к его увеличению, так и уменьшению (например, низкий уровень знаний, имеющих высокую значимость для занятия вакансии, может значительно снизить итоговую оценку соответствия соискателя вакансии).

Значения концептов-знаний, известные на начальном этапе, в процессе моделирования не меняются.

Процедура настройки параметров карты на основе накопленных статистических данных достаточно сложна из-за значительного количества этих параметров. Один из возможных выходов в данной ситуации видится в построении нейронной сети на основе выборки оценок всех концептов в различных ситуациях, получаемых по карте. Впоследствии эта нейронная сеть может быть обучена на статистической выборке. В случае добавления новых концептов (включения в модель специалиста новых знаний) обучающая выборка для нейронной сети снова может быть получена с помощью соответствующей когнитивной карты.

## 4 Сравнительный анализ

На основе модели специалиста по ИТ, предложенной в [7], была построена когнитивная карта, фрагмент которой представлен на рисунке 1. Для проверки представленных методов оценки специалистов, основанных на когнитивном анализе, были проведены эксперименты и получены соответствующие результаты. Проверка работоспособности моделей на контрольных примерах, описывающих различные характерные ситуации, показали адекватность разработанных моделей и алгоритмов.

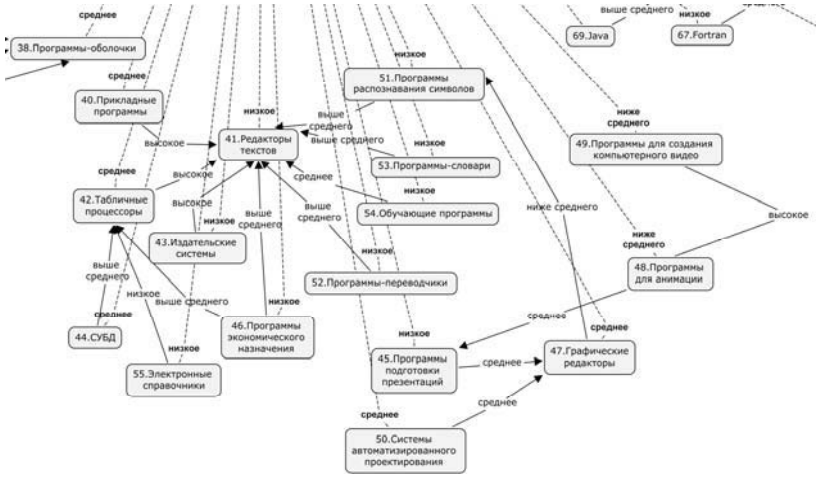



Рисунок 1 – Фрагмент орграфа профессиональных знаний специалиста по ИТ

В следующей таблице приводятся результаты сравнения моделей на основе четких когнитивных и нечетких продукционных карт.

Таблица 1 – Результаты сравнения моделей на основе четких когнитивных и нечетких продукционных карт

| ***Четкая когнитивная карта*** | | ***Нечеткая продукционная карта*** | |
|---|---|---|---|
| + | - | + | - |
| Простота составления и моделирования импульсного процесса | | Более качественное «извлечение» экспертных знаний | Сложность составления и моделирования импульсного процесса |
| Малое время моделирования | | | Большое время моделирования |
| | Использование четких оценок | Использование нечетких оценок | |
| Простота настройки весов дуг | | | Сложность настройки карты |
| | Выход оценок соответствия из интервала [0;1] | | Не на 100% нечеткие существуют ограничения на используемые функции принадлежности в нечетких продукциях [5,6]:, используется дефаззификация промежуточных нечетких оценок концептов |

Применение представленных подходов, основанных на когнитивном анализе, позволяет:

1) Соответствующим образом построенный орграф позволяет при оценке соответствия соискателя вакансии учитывать не только основные знания (в случае, если соискатель в полном объеме ими не владеет), но и базовые знания, необходимые для освоения основных.
2) В случае наличия сведений о наличии (оценке) основных знаний, можно получить примерные оценки базовых знаний.
3) Использование нечетких продукционных карт способствует наиболее точному и эффективному извлечению знаний эксперта. Использование правил структуры «один вход-один выход» значительно упрощает работу эксперта и позволяет избежать случайных ошибок, обеспечивает согласованность мнений эксперта.

**Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-08-00311).

**Список литературы**

[1] Асанов А.З. Оценка соответствия специалиста требованиям работодателя на основе нечетких вычислений / А.З. Асанов, И.Ю. Мышкина // Вестник компьютерных и информационных технологий. −М., 2010. – №11. – С. 23-32.

[2] Мельник Э.В. Применение основанного на когнитивном анализе метода обработки документов для повышения эффективности их поиска в сети Интернет / Э.В. Мельник, С.А. Радченко, И.С.Герасименко // Вестник компьютерных и информационных технологий. −М., 2010. – №11. – С. 33-40.

[3] Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. – М.:Горячая линия–Телеком, 2007.

[4] Kosko B. Fuzzy Thinking: The New Science of Fuzzy Logic. Hyperion, 1993.

[5] Carvalho J.P., Tome J.A. Rule-based fuzzy cognitive maps and fuzzy cognitive maps – a comparative study // In Proc. of the 18th International Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society. NAFIPS'99: New York, 1999. P.115-119.

[6] Carvalho, J.P., and Jose A.B. Tomè. Fuzzy Mechanisms for Causal Relations. In Proceedings of the 8th International Fuzzy Systems Association World Congress, IFSA '99, Taiwan.
[7] Кравец А. Г., Камаев В. А. Согласованное управление региональными ресурсами рынка труда и качеством подготовки специалистов. Информационная модель специалиста : монография. Москва ; Волгоград : Исслед. центр проблем качества подготовки специалистов ; Волгоград. гос. тех. университет, 2004.

# РАСШИРЕННАЯ ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ СПЕЦИФИКАЦИЯ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ ЗАДАЧИ БАЗИРОВАНИЯ ДЕТАЛИ

**Г.П. Драгунова, С.В. Смирнов**

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:*** *базирование детали, онтология геометрии поверхностей детали, скрытые базы поверхности, роль поверхности детали в базировании, аксиомы онтологии базирования*

**Abstract**

Constructed in [1] Ontology of machine-piece surfaces suitable for locating, and Ontology of the locating charts are expanding. The First merges with the ontology of virtual geometrical objects, which are “hidden bases” of the surfaces, the Second is complemented by the axioms of roles surface's in machine-piece locating chart.

## Введение

В [1] на примере *задачи базирования детали* [2] была продемонстрирована результативность метода *онтологического анализа данных* [3], в основе которого лежит относительно новая ветвь теории решеток - *анализ формальных понятий* [4].

Вопрос ставился в [1] следующим образом: дать объективное обоснование *экспертному варианту* объектно-ориентированной модели данных, который был использован ранее при построении интеллектуальной системы для решения задачи базирования детали [5]. Поэтому онтологии, теоретически обоснованные в [1], специфицируют именно *модель данных созданной ранее системы*.

Однако рассматриваемая интеллектуальная система в своей работе не ограничивалась знаниями о предметной области (ПрО), отраженными в модели данных. *База продукционных правил* интеллектуальной системы, во-первых, дополняла эти знания в части порождения допустимых комплектов баз детали (речь идет о правилах выявления допустимых ролей поверхности детали, включая правила образования «скрытых баз» поверхности) и, во-вторых, отражала опыт технологов по отбору и ранжированию комплектов баз, пригодных для практической реализации [5].

Поскольку парадигма применения онтологий в разработке систем, основанных на знаниях, предполагает интеграцию в онтологиях *всех* используемых знаний о ПрО, то резонно поставить вопрос о *расширении* построенных в [1] онтологий ПрО задачи базирования детали с целью введения в онтологические спецификации знаний, отраженных ранее в правилах продукционной базы знаний.

Статья представляет расширение двух онтологий, построенных в [1]: онтологии геометрии поверхностей, используемых при базировании детали, и онтологии ролей поверхностей в образовании кинематических связей. Расширение произведено в части *первой* группы правил, которая ответственна за порождение множества допустимых *комплектов баз детали*. Вторая группа правил, связанная с ранжированием порожденного множества, на *той же методической основе* должна расширять онтологию ролей поверхностей в жизненном цикле детали [1]. Поэтому в силу методологической направленности нашей работы анализ этого расширения в статье представляется излишним.

## 1 Расширение онтологии геометрии поверхностей, используемых при базировании детали

Реализация закрепления детали может быть осуществлена не только за счет кинематических связей с помощью системы опорных точек на ее поверхностях, но и благодаря явлениям или процессам иной физической природы (трение, электромагнетизм и т.д.). Вместе с тем, в теоретическом плане любые подобные случаи целесообразно описывать по-прежнему как наложение на деталь кинематических связей. При этом в роли объектов приложения этих связей выступают уже не реальные поверхности детали, а определенным образом спряженные с ними *виртуальные* сущности – *сечения* и *оси* поверхностей; эти сечения и оси при базировании детали могут формировать *«скрытые базы»* [2].

Феноменологический характер предпринятого в [1] онтологического анализа данных о поверхностях деталей не был ориентирован на фиксацию в онтологическом описании виртуальных сущностей, проявляющих себя как скрытые базы. Поэтому возникает задача расширения *онтологии геометрии поверхностей, используемых при базировании детали* (ГПБД-онтологии) [1], соответствующими знаниями.

Понятийная структура, описывающая *геометрию потенциальных скрытых баз поверхностей детали*, приведена на рисунке 1.

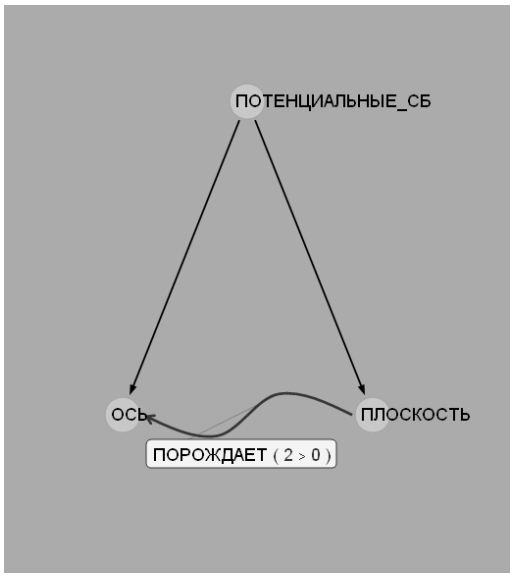



Рисунок 1 – Онтология геометрии потенциальных скрытых баз детали

Поскольку действуют все допущения, сделанные относительно геометрии реальных поверхностей детали, пригодных для базирования [1], то положение в трехмерном пространстве виртуального объекта класса ОСЬ или класса ПЛОСКОСТЬ полностью определяется координатами *точки привязки* $O_п$ и ориентацией *опорной оси* $O_пz$ «собственной системы координат» данного объекта и ось $O_пz$ коллинеарна какой-либо из осей опорной системы координат детали. Фактически, можно считать, что $O_пz \in L = \{x, y, z\}$, где $x, y, z$ – факты коллинеарности $O_пz$ координатным осям опорной системы координат детали $Ox$, $Oy$ и $Oz$ соответственно. Координаты точки привязки и ориентация опорной оси – атрибуты обобщенного класса *потенциальных скрытых баз*, а отличительными атрибутами объектов класса ОСЬ и ПЛОСКОСТЬ служат ковалентности [3] структурного отношения *«порождает»*: всякая ось порождается двумя плоскостями (есть их пересечение).

Слияние ГПБД-онтологии из [1] и онтологии геометрии потенциальных скрытых баз детали (рисунок 1) с помощью метода композиции, основанного на применении анализа формальных понятий [6], дает искомую расширенную *онтологию геометрии объектов, используемых при базировании детали* (ГОБД-онтологию, см. рисунок 2).

Фактически рисунок 2 целиком включает представление ГПБД-онтологии, и *обобщения* 3, 2, 1 суть суперклассы ОТКЛОНЕНИЕ_РАСПОЛОЖЕНИЯ, ОТКЛОНЕНИЕ_ФОРМЫ и ПОВЕРХНОСТЬ соответственно [1]. Однако теперь Обобщение1 утратило по сравнению с соответствующим ему в ГПБД-онтологии суперклассом ПОВЕРХНОСТЬ [1] роль корневого класса, наследуя от суперкласса Обобщение4, который естественно считать классом *объектов, используемых при базировании*.

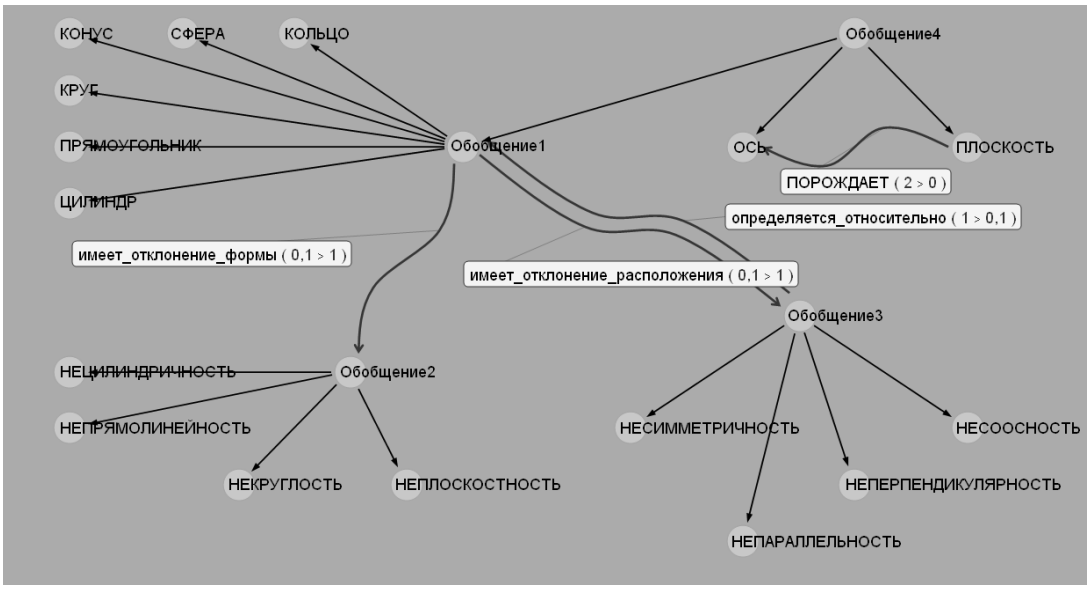



Рисунок 2 – Онтология геометрии объектов, используемых при базировании детали (ГОБД)

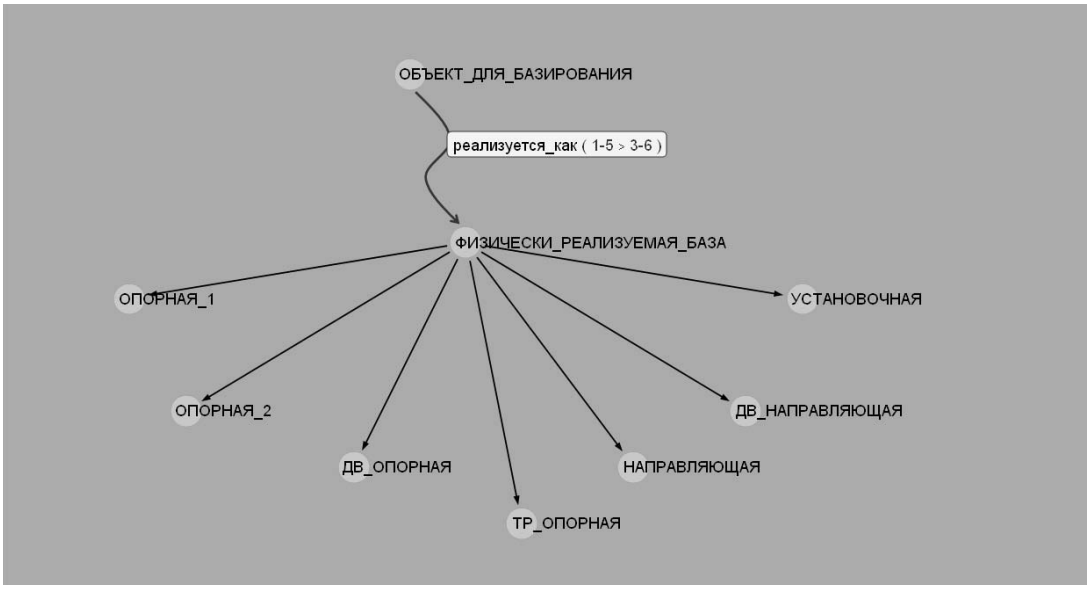



Рисунок 3 – Онтология ролей объектов, используемых при базировании детали,
в образовании кинематических связей детали (РОКС)

## 2 Расширение онтологии ролей поверхностей в образовании кинематических связей детали

Графическое представление расширения *онтологии ролей поверхностей в образовании кинематических связей* (РПКС-онтологии) [1] представлено на рисунке 3.

### 2.1 Учет потенциальных скрытых баз поверхностей

При расширении РПКС-онтологии необходимо было учесть возможность использования для базирования *скрытых баз поверхностей*, что удалось достичь элементарной модификацией в исходной онтологии определения класса ПОВЕРХНОСТЬ.

«Геометрическое содержание» класса ПОВЕРХНОСТЬ в РПКС-онтологии включает координаты *точки привязки* $O_{\text{п}}$, параметр ориентации *опорной оси* $O_{\text{п}}z$ и характеристика *взаимного расположения поверхности и тела детали* [1]. Нетрудно видеть, что при отбрасывании последней характеристики получаем описание класса, который представляет все объекты, пригодные для базирования, включая оси и секущие плоскости поверхностей, которые могут быть использованы как скрытые базы. На рисунке 3 этот класс *объектов, используемых при базировании детали,* обозначен как ОБЪЕКТ_ДЛЯ_БАЗИРОВАНИЯ.

Представленную на рисунке 3 *онтологию ролей объектов, используемых при базировании детали, в образовании кинематических связей детали* (РОКС-онтологию), определяют известные в теории базирования дефиниции *физически реализуемых баз* [2]. Это *опорная*-1 $\{a\}$, *опорная*-2 $\{\hat{}a\}$, *двойная опорная* $\{a, b\}$, *тройная опорная* $\{a, b, c\}$, *направляющая* $\{a, \hat{}b\}$, *двойная направляющая* $\{a, b, \hat{}a, \hat{}b\}$ и *установочная* $\{a, \hat{}b, \hat{}c\}$ базы. Здесь $a, b, c \in L = \{x, y, z\}$, $a \neq b$, $a \neq c$, $b \neq c$ – отличительные атрибуты соответствующих классов баз, а $x, y, z$ – факты связывания перемещения детали в направлениях одноименных координатных осей, тег «^» - указывает вращение детали вокруг оси. Единственным отличительным атрибутом суперкласса *физически реализуемых баз* в РОКС-онтологии служит *валентность* «~реализуется как», характеризующая способность всякой такой базы к ассоциации либо с поверхностью детали, либо с осью/плоскостью при реализации скрытой базы, т.е. с объектом класса ОБЪЕКТ_ДЛЯ_БАЗИРОВАНИЯ. И именно эта ассоциативная связь определяет роль каждого такого объекта в образовании кинематических связей детали.

### 2.2 Внедрение аксиом предметной области

Использованные в интеллектуальной системе [5] *правила выявления допустимых ролей* поверхности детали и ее потенциальных скрытых баз в образовании кинематических связей, естественно рассматривать как проверку истинности соответствующих *аксиом* корректности ролей объектов, используемых при базировании.

Первая из этих аксиом определяет *динамику* формирования *полной схемы* кинематических связей $B = \{x, y, x, \hat{}x, \hat{}y, \hat{}z\}$ при ее последовательном построении виде разложения на непересекающиеся подмножества, каждое из которых описывает физически реализуемую схему связей, например, $B = \{x, \hat{}y, \hat{}z\} \cup \{y, \hat{}x\} \cup \{z\}$. Очевидно, что при формировании допустимого разложения $B$ при последовательном переборе поверхностей детали и назначении им ролей в базировании на каждом шаге должно выполняться условие (интересующая нас аксиома)

(1) $B_t \cap B_{t-1} = B_{t-1}$ , $B_t \subset B$,

где $B_{t-1}$ - схема связей, сформировавшаяся *к моменту*, а $B_t$ - *после* назначения роли.

Далее, при действующих *допущениях относительно геометрии реальных поверхностей детали* [1] выбор ролей объектов, используемых при базировании, жестко зависит от ориентации этих объектов в трехмерном пространстве.

Так, если роль поверхности $S$ (или ее плоского сечения $S$, которое является потенциальной скрытой базой) как опорной базы направлена на связывание перемещения вдоль оси опорной системы координат детали, то такой осью может быть лишь ось, перпендикулярная к плоскости $S$, т.е. имеем аксиому

(2) $\{a\} \rightarrow a = \mathbf{dir}(S)$,

где функция **dir**, принимающая значения из $L$, указывает опорную ось поверхности $S$, т.е. $\mathbf{dir}(S) = O_S z$ (см. раздел 1).

Если же роль $S$ состоит в связывании вращения (и только вращения) вокруг оси опорной системы координат, то следует соблюдать аксиому

(3) $\{\hat{}a\} \rightarrow a \in L\backslash\{\ \mathbf{dir}(S)\ \}$.

Аналогично формулируются другие аксиомы выбора роли объектов, используемых при базировании (т.е. различных видов поверхностей и их «скрытых баз»), в образовании различных явных и скрытых кинематических связей детали:

(4) $\{a, \hat{}b\} \rightarrow a = \mathbf{dir}(S)$;

(5) $\{a, \hat{}b, \hat{}c\} \rightarrow a = \mathbf{dir}\ (S)$;

(6) $\{a\} \rightarrow (\ a \in L\backslash\{\ \mathbf{dir}\ (S)\ \}\ ) \wedge (\ \{\hat{}a\} \rightarrow a \neq \mathbf{dir}\ (S)\ )$;

(7) $\{a, \hat{}b\} \rightarrow (\ a \in L\backslash\{\ \mathbf{dir}\ (S)\ \}\ ) \wedge b \neq \mathbf{dir}\ (S)$;

(8) $\{a, b\} \vee \{a, b, \hat{}a, \hat{}b\} \rightarrow a, b \in L\backslash\{\ \mathbf{dir}\ (S)\ \}$.

Добавление аксиом в онтологическую спецификацию может быть осуществлено в *объектно-фреймовом* стиле [7]. Аксиома ПрО в таком случае интерпретируется как проверочная процедура-*демон*, дополнительно (т.е. помимо типа, размерности и др.) атрибутирующая потенциально *все свойства* ПрО, *изменение* которых способно данную аксиому *нарушить*. Такие свойства приобретают в онтологии статус *«активных»*. Прагматически это создает информационную основу того, что в *денотативной модели* ПрО любая транзакция, вызывающая изменение активного свойства, будет отменена при нарушении хотя бы одной из ассоциированных с этим свойством аксиом.

С учетом сказанного внедрение аксиом (1)-(8) в РОКС-онтологию (см. рисунок 3) требует придания статуса активных следующим атрибутам:

- свойству *«опорная ось* $O_{\text{п}}z$*»* объектов класса ОБЪЕКТ_ДЛЯ_БАЗИРОВАНИЯ;
- ковалентностям *«реализуется как»* объектов класса ОБЪЕКТ_ДЛЯ_БАЗИРОВАНИЯ и ФИЗИЧЕСКИ_РЕАЛИЗУЕМАЯ_БАЗА.

**Заключение**

Устранение сложностей, возникающих при информационном моделировании слабо формализуемых систем и ситуаций, как правило, вызывает разнообразные расширения соответствующих онтологических моделей.

В статье исследовался случай одновременного введения в модель представления «первичного» *реального объекта* и сопряженной с ним *виртуальной сущности*, свойства которой «раскрывают» потенциальные возможности реального объекта (фактически речь идет о свойствах объекта, которые по каким-либо причинам неудобно, нелогично и т.п. агрегировать в его оригинальное содержание).

Более общей и важной задачей является введение в онтологическую спецификацию *аксиом предметной области*, или условий «целостности» модели. В статье предлагается решать этот вопрос в соответствии с объектно-фреймовой парадигмой представления знаний путем введения понятия *активных атрибутов* онтологических моделей.

Анализ обозначенных тем проведен на примере задачи базирования деталей. Расширяются построенные в [1] онтология геометрии поверхностей, используемых при базировании детали, и онтология ролей поверхностей в образовании кинематических связей детали. Первая сливается с онтологией виртуальных геометрических объектов, которые представляют «скрытые базы» поверхностей, во вторую добавляется аксиоматика, устанавливающая допустимость ролей поверхностей и ее «скрытых баз» при базировании детали.

**Список литературы**


[1] Нитипанова Г.П., Смирнов С.В. Онтологический анализ предметной области задачи базирования детали // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIII международной конф. (15-17 июня 2011 г., Самара, Россия). – Самара: СамНЦ РАН, 2011. – С. 85-94.

[2] Балакшин Б.С. Теория и практика технологии машиностроения: Кн. 2. Основы технологии машиностроения. - М.: Машиностроение, 1982.

[3] Смирнов С.В. Онтологический анализ предметных областей моделирования // Известия Самарского научного центра РАН. 2001. Т. 3. № 1. – С. 66-71.

[4] Ganter B., Wille R. Formal Concept Analysis: Mathematical foundations. - Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1999.

[5] Vittikh V.A., Smirnov S.V. Intelligent System for the Selection of Locating Chart // Proc. of the 8-th Int. Conf. on the Application of Artificial Intelligence in Engineering AIENG/93 (29 June - 2 July, 1993, Toulouse, France). Vol. 2: Application and Techniques. – London-N.Y.: CMP and Elsevier, 1993. - P. 827-834.

[6] Виноградов И.Д., Смирнов С.В. Алгоритм объединения концептуальных схем на основе реконструкции их формального контекста // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды III международной конф. (4-9 сентября, 2001 г., Самара, Россия) – Самара: СамНЦ РАН, 2001. – С. 213-220.

[7] Смирнов С.В. О модели данных для приложений, основанных на объектно-ориентированном представлении знаний // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды X международной конф. (23-25 июня 2008 г., Самара, Россия). – Самара: СамНЦ РАН, 2008. – С. 529-540.

# КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ О МАРШРУТИЗАЦИИ В ГЛОБАЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ

**К.А. Стуликова, Д.Ю. Полукаров**

Поволжский государственный университет телекоммуникация и информатики
443010, Самара, ул. Льва Толстого, 23, Россия
plkw@mail.ru

***Ключевые слова:*** *компьютерные сети, маршрутизация, модель представления знаний, протоколы маршрутизации, алгоритмы маршрутизации*

**Abstract**

Overview of the routing domain was conducted. Diagrams showing the relationship of components of the routing were created. A conceptual knowledge representation model about routing in global computer networks was given.

## Введение

На современном этапе развития глобальных компьютерных сетей в связи с непрерывным усложнением сетевой инфраструктуры, расширением сферы применения и повышением мобильности глобальных сетей все большие требования предъявляются к эффективности управления процессами передачи потоков данных между участками глобальной сети.

Совершенствование процессов управления информационными потоками в глобальных компьютерных сетях связано в первую очередь с дальнейшим развитием теоретических основ и методов сетевого планирования, реализацией, автоматизацией и интеллектуализацией систем сетевого управления. Однако современные глобальные компьютерные сети являются сложным объектом, управлять которым достаточно трудно. Поэтому возникает необходимость в построении некоторой модели представления знаний, которая бы объединяла основные понятия предметной области, непосредственно связанные с процессами сетевого управления, современные технологии в области сетевого планирования и управления информационными потоками данных.

Основным понятием, связанным с управлением и планированием сети, является понятие «сетевой маршрутизации», поэтому структура модели представления знаний концентрируется вокруг этого понятия. Сетевая маршрутизация анализируется с двух сторон – математической и технической. Кроме того, принимается во внимание взаимосвязь маршрутизации с понятиями, тесно связанными с ней, – элементами сетевой архитектуры, характеристиками и требованиями к сети, сетевыми стандартами и моделями взаимодействия, механизмами адресации, элементами теории графов и общей алгебры.

Итак, в данной работе демонстрируется общая модель представления знаний о маршрутизации в глобальных компьютерных сетях, рассматриваются составные части этой модели и приводятся схемы, раскрывающие связь данного понятия с исследуемой областью.

Описанная в работе концептуальная модель может быть использована при разработке новых методов и технологий в области сетевого управления и планирования для облегчения понимания проектировщиками данной предметной области и устранения неясностей, возникающих вследствие сложности существующих механизмов. Данная модель позволяет выявить некоторые зависимости и неявные знания, присутствующие между различными сетевыми понятиями.

## 1 Общая модель представления знаний о маршрутизации

Понятие маршрутизации в глобальных компьютерных сетях следует рассматривать с двух сторон – математической и технической, так как существующие на сегодняшний день механизмы маршрутизации в своей основе используют математическую теорию.

С технической точки зрения маршрутизация представляет собой процесс поиска наиболее выгодного пути следования информации между двумя оконечными устройствами, объединенными в сеть с помощью каналов связи.

С математической точки зрения процесс маршрутизации представляет собой поиск пути между двумя точками графа, удовлетворяющего определенным условиями или соответствующего некоторым параметрам. При этом граф может быть взвешенным или невзвешенным – в зависимости от применяемого алгоритма поиска, и ориентированным или неориентированным – в зависимости от того, используются ли в реальной сети маршрутные политики.

Связующим звеном между математической и технической сторонами маршрутизации является модель сети, в которой структурам реальной сети соответствуют элементы модели графов. Соответствие элементов модели сетевым структурам более подробно будет рассмотрено далее.

На рисунке 1 приведена общая модель представления знаний о маршрутизации, на которой показано взаимодействие основных понятий, относящихся к математической и технической аспектам маршрутизации.

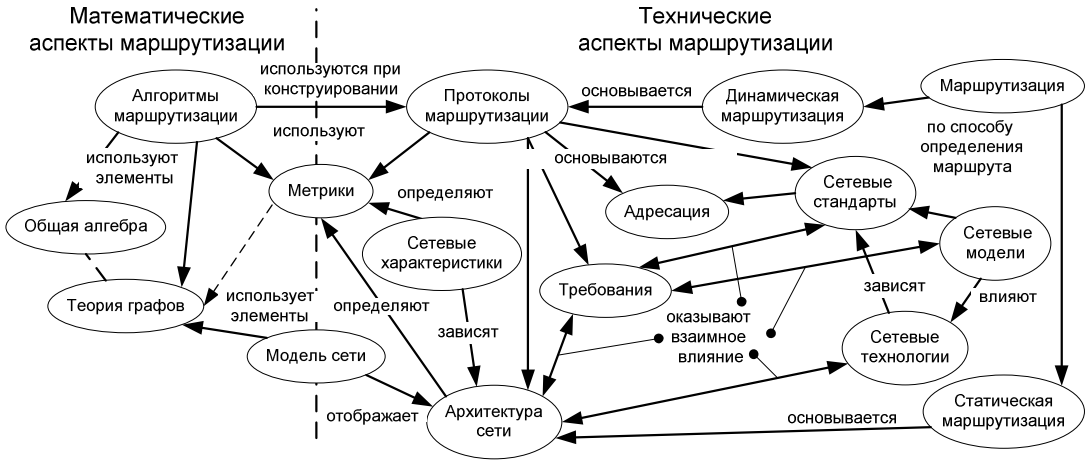



Рисунок 1 – Общая модель представления знаний о маршрутизации в компьютерных сетях

### 1.1 Сетевые стандарты и требования

Техническая сторона маршрутизации базируется на использовании сетевых моделей взаимодействия, стандартов и технологий, а также выполнении совокупности требований, предъявляемых к функционированию сети со стороны пользователей и оборудования.

Идеологической стороной стандартизации сетей являются модели взаимодействия. К наиболее известным сетевым моделям относят модели OSI, DoD, AppleTalk, Fibre Channel. Однако большинство современных стандартов основано на модели взаимодействия открытых систем OSI [1].

Модель OSI обеспечивает связь различных операционных систем и протоколов, сетей с различной сетевой архитектурой и физической средой передачи данных. Эта модель является концептуальной структурой и состоит из семи уровней. Данные уровни включают набор функций и стандартов, которым должны следовать поставщики. Логические уровни не определяют конкретно, что должно выполняться на каждом из них; они определяют основные

функции соответствующего уровня и способ логической передачи информации верхних и нижних уровней [2].

Поскольку функциональность отдана на откуп производителям, ожидаемый результат – полная совместимость между различными устройствами – достигается далеко не всегда. Тем не менее, данная структура и модель обеспечивают наилучшие возможности для совместимости различных систем.

Работы по стандартизации вычислительных сетей ведутся большим количеством организаций. В зависимости от статуса организаций различают следующие виды стандартов [1]:

- стандарты отдельных фирм (например, стек протоколов SNA компании IBM);
- стандарты специальных комитетов и объединений (например, стандарты технологии ATM, разрабатываемые специальным объединением ATM Forum);
- национальные стандарты (например, стандарт FDDI, представляющий один из многочисленных стандартов института ANSI);
- международные стандарты (например, модель и стек коммуникационных протоколов Международной организации по стандартизации (ISO)).

Некоторые стандарты, непрерывно развиваясь, могут переходить из одной категории в другую. Например, фирменные стандарты на продукцию, получившую широкое распространение, обычно становятся международными стандартами де-факто, а некоторые фирменные стандарты становятся де-юре для национальных и международных стандартов.

Важнейшим направлением по стандартизации в области вычислительных сетей является стандартизация коммуникационных протоколов. Наиболее известными стеками протоколов являются: OSI, TCP/IP, IPX/SPX, NetBIOS/SMB, DECnet, SNA. Однако не все они применяются сегодня на практике.

Требования, предъявляемые к функционированию сети, в основном касаются качества предоставления коммуникационных услуг в вычислительных сетях. К ним относятся требования конечных пользователей к производительности, надежности, безопасности вычислительных сетей.

### 1.2 Протоколы и алгоритмы маршрутизации

Для нахождения маршрута между узлами глобальной вычислительной сети чаще всего применяются протоколы динамической маршрутизации. Это объясняется тем, что протоколы динамической маршрутизации позволяют автоматически вычислять наиболее удобные маршруты по сети с учетом текущей сетевой топологии, приспосабливаясь к изменениям структуры сети. Наряду с протоколами динамической маршрутизации также используется статическая маршрутизация. Здесь маршрут по сети определяется вручную оператором или администратором сети и, следовательно, приспосабливаться к изменениям сети такой вид маршрутизации не может.

При разработке конструкций протоколов маршрутизации проектировщики опираются на имеющиеся знания об архитектуре сети, действующие механизмы адресации, требования, предъявляемые к функционированию сети, сетевые стандарты (и связанные с ними сетевые модели), существующие сетевые технологии. Все эти области тесно взаимосвязаны друг с другом и изменение в одной из них оказывает влияние на остальные. Например, изменение участниками сети требований к функционированию сети повлечет за собой изменение действующих сетевых стандартов и наоборот – изменение сетевых стандартов повлияет на требования, предъявляемые к функционированию сети.

При конструировании протоколов маршрутизации используются алгоритмы маршрутизации. Алгоритм может быть либо разработан компанией-проектировщиком протокола маршрутизации (если протокол является проприетарным), либо может быть приспособлен один из известных алгоритмов поиска маршрута на графах. В основе алгоритмов маршрутизации лежит математическая теория, чаще всего применяется теория графов, однако отмечена тенден-

ция [3-7] к использованию для разработки алгебраических конструкций и методов маршрутизации общей алгебры, которая обладает широким математическим аппаратом и позволяет создавать общие конструкции. Теория графов и общая алгебра оперируют некоторыми фундаментальными математическими теориями (например, теорией множеств, теорией функций), однако аппарат общей алгебры более обширный, и, следовательно, при разработке алгебраических конструкций маршрутизации с помощью общей алгебры в качестве основы могут быть использованы уже имеющиеся алгоритмы поиска маршрута из теории графов.

Для вычисления маршрута по сети протоколы маршрутизации и алгоритмы маршрутизации, лежащие в их основе, используют метрики, определяемые характеристиками сети (например, задержкой, скоростью передачи данных, нагрузкой узла и т.д.) или архитектурой сети (например, количеством промежуточных точек между участниками маршрутизации), соответствующие функциям от элементов структур в теории графов.

На рисунке 2 показана связь между используемыми на сегодняшний день типами протоколов маршрутизации и лежащими в их основе алгоритмами маршрутизации, а также между элементами модели сети, применяемой в алгоритмах маршрутизации, с архитектурой и механизмами адресации в сети.

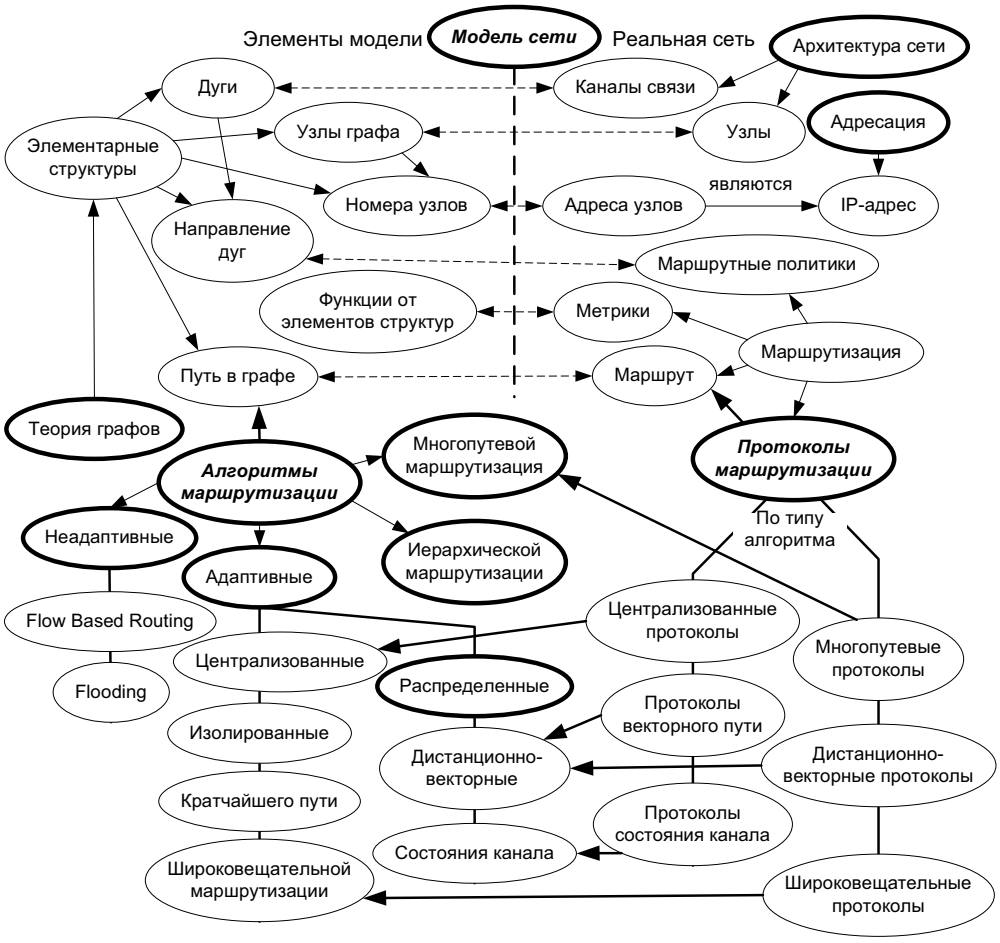



Рисунок 2 – Связь протоколов маршрутизации и алгоритмов маршрутизации с моделью сети

Алгоритмы маршрутизации по принципу функционирования можно разделить на следующие основные виды [8]:

- адаптивные алгоритмы маршрутизации;
- неадаптивные алгоритмы маршрутизации;
- иерархической маршрутизации;
- многопутевой маршрутизации.

Неадаптивные алгоритмы не принимают во внимание текущее состояние сети, все маршруты рассчитываются до начала использования сети. Они в свою очередь подразделяются на алгоритмы, учитывающие топологию сети (flow based routing) и не учитывающие (flooding). Неадаптивные алгоритмы практически не используются в протоколах маршрутизации.

Адаптивные алгоритмы маршрутизации учитывают текущее состояние сети и поэтому находят широкое применение в современных протоколах маршрутизации. Наиболее распространенные адаптивные алгоритмы:

- централизованные алгоритмы;
- распределенные алгоритмы (алгоритмы состояния канала и дистанционно-векторные алгоритмы);
- изолированные алгоритмы;
- алгоритмы кратчайшего пути;
- широковещательные алгоритмы.

Кроме того, все большее применение находят алгоритмы многопутевой маршрутизации, которые высчитывают несколько альтернативных маршрутов между участками сети.

Протоколы маршрутизации по используемому в их конструкции типу алгоритма можно разделить на следующие:

- централизованные протоколы маршрутизации;
- распределенные протоколы маршрутизации (протоколы состояния канала, дистанционно-векторные протоколы, протоколы векторного пути);
- широковещательные протоколы маршрутизации;
- многопутевые протоколы маршрутизации.

Связи между перечисленными алгоритмами и протоколами маршрутизации показаны на рисунке 2. Дистанционно-векторные протоколы и протоколы векторного пути используют в своей основе единый алгоритм маршрутизации, но различаются его реализацией [9].

На рисунке 2 пунктирными линиями со стрелками показана связь между элементами модели сети и структурой реальной сети. В качестве структурных элементов модель использует элементы теории графов: узлы, дуги, их характеристики и функции от них. При этом узлы графа модели соответствуют узлам сети, номера узлов модели – адресам реальной сети, дуги модели – каналам связи, направление дуг – маршрутным политикам, путь в графе – маршруту в реальной сети и т.д.

## 2 Модель знаний об архитектуре сети и механизмах адресации

Представление знаний о маршрутизации в глобальных компьютерных сетях было бы неполным без рассмотрения текущего положения дел в области сетевой архитектуры и действующих механизмов адресации, с помощью которых осуществляется передача данных по сети до конечного получателя. Так как адресация непосредственно связана с передающими информацию сетевыми устройствами, поэтому модели представления знаний об архитектуре и механизмах адресации рассматриваются вместе в отдельном разделе.

### 2.1 Модель представления знаний об архитектуре сети

Архитектуру сети можно представить как совокупность трех составляющих – физической среды передачи, сетевого оборудования и топологической структуры (рисунок 3):

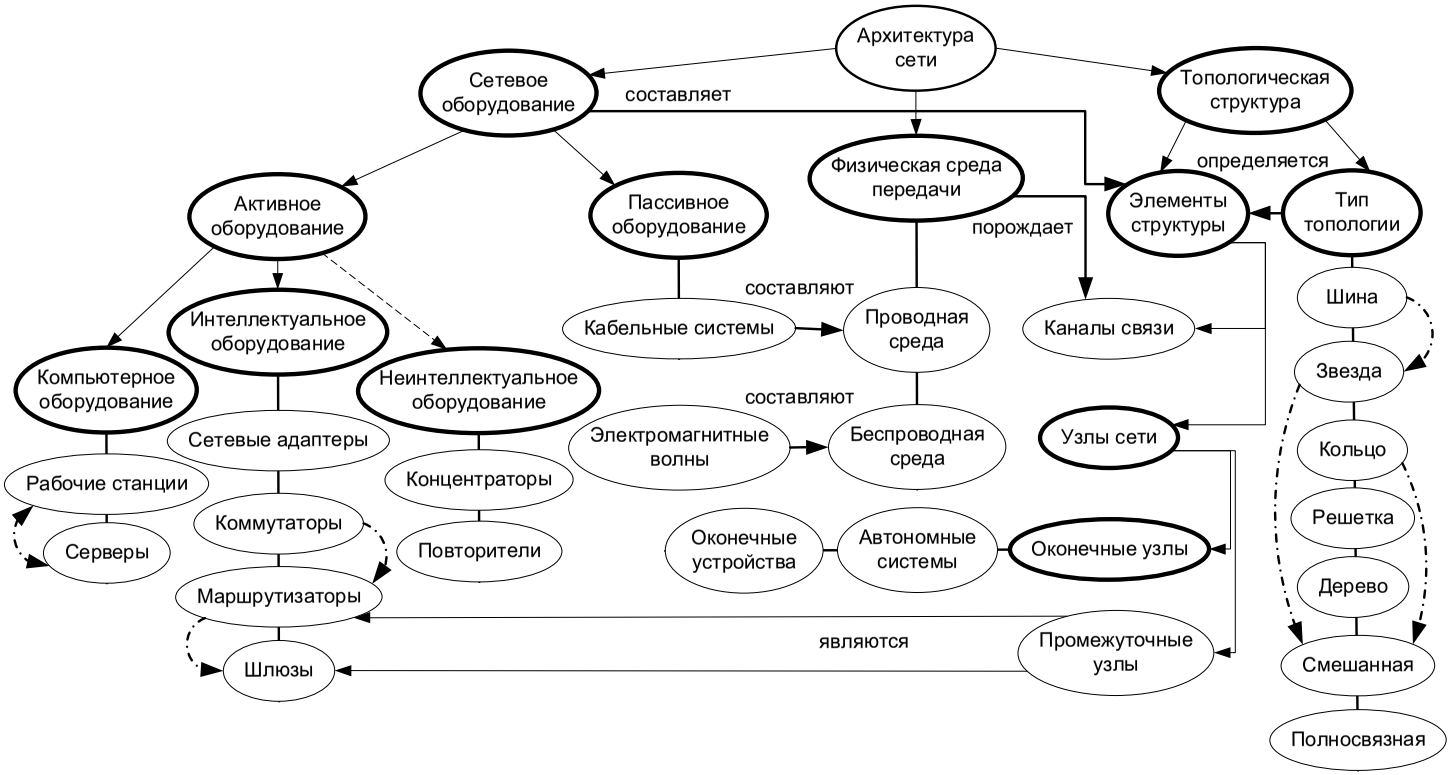



Рисунок 3 – Модель знаний об архитектуре сети

Физической основой передачи данных между узлами сети служит физическая среда. По способу передачи информации физическую среду можно разделить на проводную и беспроводную. Для беспроводной передачи информации используются радиочастоты различных диапазонов. Например, технология Wi-Fi для передачи данных использует диапазон частот 2,4 - 2,5 ГГц и 5,0 ГГц при дальности передачи до 300 м; технология WiMAX использует диапазон частот от 1,5 до 13,6 ГГц при дальности от 1 до 80 км. Для проводной передачи данных используются пассивное сетевое оборудование – структурированные кабельные системы, характеристики которого существенным образом зависят от типа используемого кабеля.

Второй составляющей архитектуры сети является сетевое оборудование. Сетевое оборудование по потреблению энергии можно разделить на активное и пассивное. По степени интеллектуализации оборудования и типу выполняемых операций выделяют три вида оборудования – интеллектуальное, компьютерное и неинтеллектуальное.

В настоящее время отмечается тенденция к нарастающей интеллектуализации активного оборудования, неинтеллектуальное оборудование постепенно уходит с рынка сетевого оборудования – менее функциональные модели сетевого оборудование постепенно вытесняются более функциональными, в виду постепенного уменьшения стоимости последних. Коммутаторы перенимают часть функции маршрутизаторов, маршрутизаторы выполняют все больше функций, непосредственно несвязанных с сетевым уровнем модели OSI (на котором осуществляется маршрутизация), а относящихся к более высоким уровням. Сетевые адаптеры охватывают все больше уровней модели OSI, вплоть до того, что передовые модели адаптеров выполняют функции первых четырех уровней OSI. Разграничения между сетевым оборудованием и уровнями модели OSI постепенно размывается, происходит функциональная конвергенция сетевого оборудования.

Третья составляющая сетевой архитектуры – топологическая структура. Она характеризуется структурными элементами, к которым относят каналы связи и узлы сети, и типами топологий. Элементы топологической структуры представляют собой совокупность сетевого оборудования. Вид топологии определяется сочетанием элементов топологической структуры. Конвергенция коснулась и топологической структуры. При проектировании сети шинная организация постепенно заменяется топологией «звезда», топологии «кольцо» и «звезда» все больше тяготеют к смешанной топологии.

### 2.2 Модель представления знаний о существующих механизмах адресации

При объединении трех и более конечных устройств в сеть, возникает проблема, связанная с адресацией сетевых интерфейсов этих устройств. В связи с этим применяются схемы различные схемы адресации, позволяющие корректно обращаться к определенным конечным сетевым устройствам.

Множество всех адресов, которые допустимы в рамках некоторой схемы адресации, называются адресным пространством. При этом адреса могут быть числовыми или символьными. Адресное пространство может иметь линейную или иерархическую организацию [1].

При плоской организации адресации множество адресов никак не структурируется. Примером плоской адресации может служить MAC-адресация, предназначенная для однозначной идентификации сетевых устройств в локальных сетях.

При иерархической организации адресное пространство структурируется в виде вложенных друг в друга подгрупп, которые последовательно сужая адресуемую область определяют отдельный сетевой интерфейс. Примером иерархической организации адресного пространства является IP-адресация.

На рисунке 4 показаны используемые механизмы адресации. Анализ этой схемы показывает, что наблюдается тенденция к постепенному усложнению механизмов адресации. Переход от классовой адресации к бесклассовой был продиктован нехваткой IP-адресов. Дальней-

шее развитие технологий маршрутизации привело к использованию специальных меток, которые являются определенным дополнением действующим механизмам адресации.

Рисунок 4 – Модель знаний о механизмах адресации в сети

### 3 Модель представления знаний о процессах маршрутизации

На рисунке 5 приведена модель представления знаний о маршрутизации в сети. Протекание процесса маршрутизации в сети существенным образом зависит от используемого вида маршрутизации. Основные виды маршрутизации показаны на рисунке 5, однако в настоящее время их насчитывается гораздо больше, что создает некоторые сложности для оператора или администратора сети при выборе связанного с видом маршрутизации протокола или иного способа передачи данных. В связи с этим возросла потребность в получении более гибких средств для конструирования протоколов маршрутизации, учитывающих данную разнородность. Основой для создания таких средств может служить алгебра Собриньо [9], алгебраический язык RAML [7], а также некоторые другие виды специальных алгебр, например, (max, +) и (min, +) алгебры.

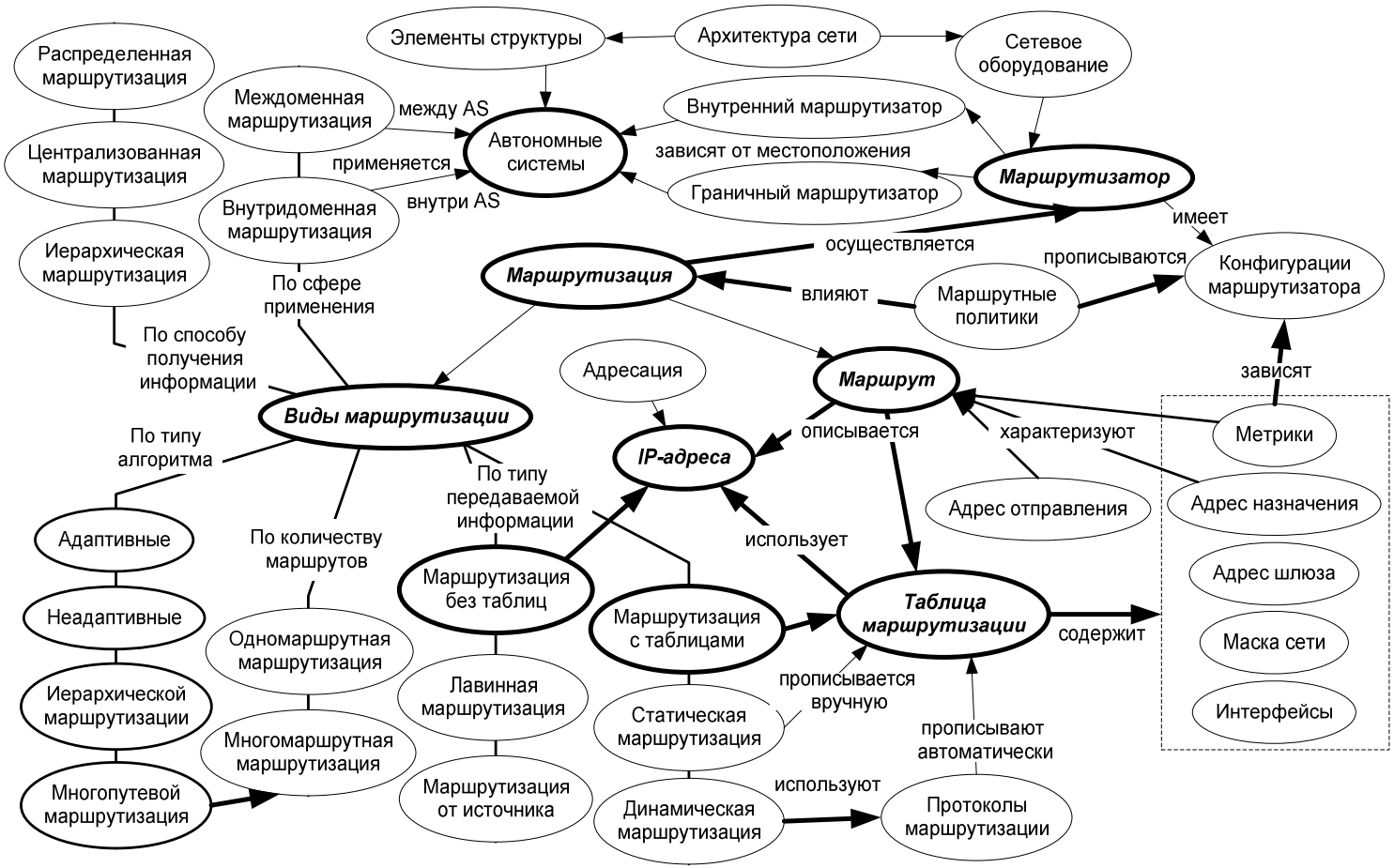



Рисунок 5 – Модель знаний о механизмах маршрутизации

## Заключение

Причиной проведения данной работы по систематизации и классификации знаний, связанных с вопросами сетевого управления и планирования, послужила недостаточная проработанность этих вопросов, являющихся актуальными на сегодняшний день. В результате анализа понятий и механизмов функционирования элементов предметной области были получены описывающие их взаимосвязь модели и схемы, совокупность которых представляет общую концептуальную модель представления знаний о маршрутизации в глобальных компьютерных сетях, при этом была достигнута необходимая для дальнейших исследований глубина детализации.

## Список источников


[1] Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: 4-е изд. – СПб.: Питер, 2011.

[2] Остерлох Х. Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка: Перевод с англ./ - СПб.: Диасофт, 2002.

[3] С.Л. Гавлиевский. Методы анализа мультисервисных сетей связи с несколькими классами обслуживания. М.: ИРИАС, 2010.

[4] Кудрявцева Е.Н. Росляков А.В. Сетевое исчисление как альтернатива теории массовго обслуживания для исследования сетей следующего поколения // Технико-экономические проблемы инжиниринга в России, Узбекистане, Украине: Материалы международной научной конференции (30 ноября – 4 декабря 2010г., Самара, Россия). – Самара: ИУНЛ ПГУТИ 2011 - С. 21-25.

[5] Савенков Д.А. Оценка характеристик гибких коммутаторов с использованием теории сетевых исчислений // Технико-экономические проблемы инжиниринга в России, Узбекистане, Украине: Материалы международной научной конференции (30 ноября – 4 декабря 2010г., Самара, Россия). – Самара: ИУНЛ ПГУТИ 2011 - С. 64-67.

[6] Sobrinho J. L. An Algebraic Theory of Dynamic Network Routing. // IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.13, No.5, 2005, – p. 1160-1173.

[7] Gurney A.J. Construction and verification of routing algebras. – Dissertation Thesis, 2009. (www.cl.cam.ac.uk/~ajtg2/Gurney09.pdf).

[8] Cisco Systems Руководство Cisco по междоменной многоадресатной маршрутизации. – М.: Вильямс, 2004.

[9] Sobrinho J. L. Network Routing with Path Vector Protocols: Theory and Applications. // SIGCOMM '03 Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications ACM New York - NY, USA, 2003 – p. 49-60.

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ВЫРАБОТКИ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ

**В.Ю. Волков, Луэ Ху Дык**

Новомосковский институт (филиал) РХТУ им. Д.И. Менделеева
301665, Тульская обл., Новомосковск, ул. Дружбы, 8, Россия
duga@mail.ru
тел: +7 (48762) 7-88-28, факс: +7 (48762) 4-85-92

***Ключевые слова:*** *интеллектуальная система, моделирование, база знаний, экспертная оценка, генетический алгоритм*

**Abstract**

The intelligent system of development of recommendations to the enterprises of the chemical technological industry for the purpose of decrease in concentration of air pollutants in which methods of fuzzy modeling, mathematical modeling and genetic algorithm are used is described. The complex approach to the problem decision will allow to make optimum decisions on decrease in degree of air pollution in a mode of real time.

## Введение

В результате функционирования современных химико-технологических производств, в атмосферу выбрасывается огромное количество загрязняющих веществ (ЗВ), оказывающих вредное воздействие на человека. В зависимости от высоты точки выброса и от атмосферных условий, загрязненные воздушные потоки могут распространяться локально или на большие расстояния. Поэтому, контроль и сокращение загрязнения воздуха от промышленных источников, особенно от предприятий химической, нефтяной и газовой промышленности, имеет важное значение для улучшения качества воздуха и уменьшения ущерба здоровью человека.

Основным недостатком существующих систем экологического мониторинга в промышленных регионах, например, таких как муниципальное образование (МО) «город Новомосковск» Тульской области, является то, что полученная с их помощью информация не учитывается при управлении технологическими процессами химико-технологических предприятий. Это связано с отсутствием моделей, описывающих взаимосвязь между производственной нагрузкой предприятий и распределением концентрации вредных веществ, выделяемых в атмосферу в результате функционирования этих предприятий, а также, с отсутствием диалоговых подсистем, включенных в состав автоматизированных систем экологического мониторинга, позволяющих на основе полученных данных о концентрации вредных веществ обеспечить поддержку принятия решений по регулированию выбросов в атмосферу.

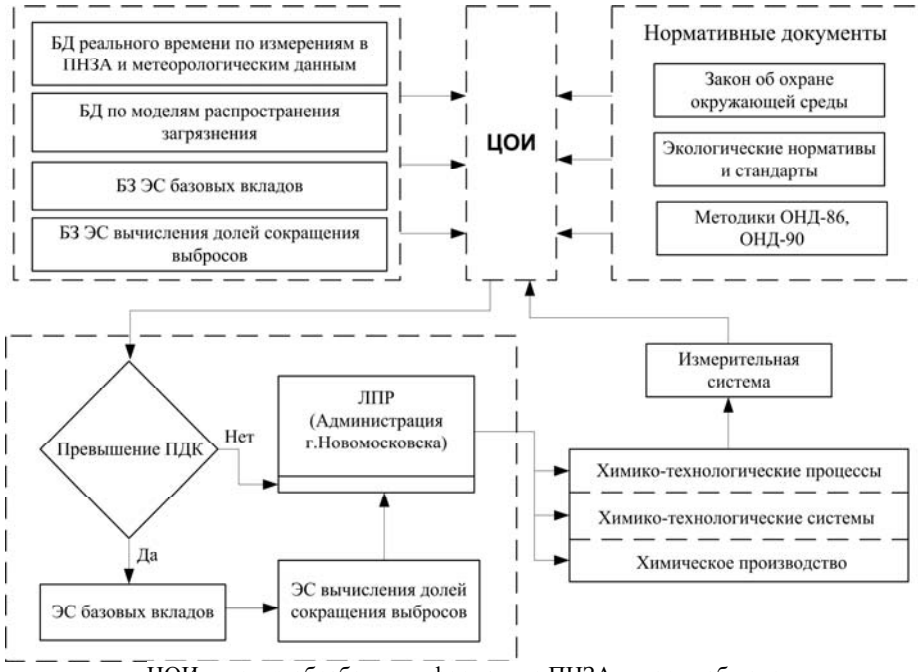
Очевидно, что промышленные предприятия стремятся увеличить выпуск продукции для получения максимальной прибыли, что ведет к увеличению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Увеличение выбросов негативно сказывается на уровне безопасности проживания людей на территории региона. В результате получается «конфликт интересов» между населением и промышленными предприятиями. Целью нашей работы является разработка интеллектуальной системы выработки рекомендаций предприятиям химико-технологической промышленности региона, которая учитывает экономические и экологические факторы в режиме реального времени и отличается от известных ранее тем, что в ней вычисляются оптимальные доли снижения нагрузки предприятий в соответствии с их долями в валовых выбросах ЗВ в атмосферу.

## 1 Структура интеллектуальной системы выработки рекомендаций предприятиям

На рисунке 1 представлена структура предложенной интеллектуальной системы выработки указанных выше рекомендаций химико-технологическим предприятиям. Центр обработки информации (ЦОИ) обрабатывает полученную информацию от Постов Наблюдения за Загрязнениями Атмосферы (ПНЗА) в соответствии с Базой Данных (БД) Экспертной Системы (ЭС) по моделям распространения загрязнения и др. Измеренное значение концентраций загрязняющих веществ сравнивается с действующими нормами ПДК. В случае превышения ПДК с помощью подсистемы базовых вкладов определяются вклад каждого предприятия – источника загрязнения в суммарную концентрацию загрязняющих веществ. Подсистема вычисления долей сокращения выбросов осуществляет расчет для каждого предприятия.

На основании этих данных Лица, Принимающие Решения (ЛПР) могут оперативно принять соответствующие решения по снижению концентрации загрязняющих веществ, оповещению предприятий для изменения производственной нагрузки, о наступлении или завершении периода неблагоприятных метеоусловий (НМУ) и категории (режима) НМУ.

В рассматриваемой системе управления в качестве «устройства управления» выступают ЛПР, к которым относятся руководители соответствующих служб промышленных предприятий, администрации муниципальных образований и т.д.




ЦОИ – центр обработки информации; ПНЗА – пост наблюдения за загрязнениями атмосферы; БД – база данных; БЗ – база знаний; ЭС – экспертная система; ЛПР – Лицо, Принимающее Решение

Рисунок 1 – Структура интеллектуальной системы выработки рекомендаций химико-технологическим предприятиям – загрязнителям атмосферного воздуха

## 2 Методика определения вклада каждого предприятия - источника загрязнения в валовый выброс ЗВ всех предприятий

Чтобы разработать методику прогноза взаимосвязи между нагрузкой предприятий и распределением концентрации вредных веществ в атмосфере, необходимо обработать статистические данные об этой взаимосвязи за длительный период наблюдения, по некоторым данным [1]- не менее 10 лет. Такая статистика, к сожалению, на сегодняшний день отсутствует. Тем не менее, для решения указанной выше проблемы прогноза взаимосвязи нагрузки предприятий и распределения концентрации вредных веществ в атмосфере возможно два пути:

- Использовать методы математического моделирования. Разрабатываемые математические модели должны отражать процессы распространения промышленных выбросов в атмосфере с учетом рельефа местности при различных метеоусловиях и режимах работы химико-технологического предприятия (пуск, останов, нормальный и аварийный режим функционирования в соответствии с регламентом). Такой путь не всегда приемлем, т.к. требует больших затрат. Кроме того, не всегда можно построить адекватную модель, т.к. не возможно на практике учесть все взаимосвязи.
- Применение, так называемых, интеллектуальных систем, к которым относятся и экспертные системы. В такие системы закладывается знания и практический опыт работы специалистов – экологов, технологов и других работников промышленных предприятий, которые выступают в роли экспертов. В процессе работы система, распознавая различные ситуации и анализируя ошибки, «учится». При этом повышается точность и надежность прогнозов. Для того, чтобы экспертная система начала быстрее работать, ее необходимо обучать на реальных данных. Из-за отсутствия статистики о взаимосвязи нагрузки предприятий и распределения концентрации вредных веществ в атмосфере в качестве обучающей базы данных предлагается использовать комбинированный метод, учитывающий результаты математического моделирования.

Моделирование распространения загрязняющих веществ в атмосфере проводилось с помощью модуля Earth Science Module комплекса программ интерактивной моделирующей среды COMSOL Multiphysics [2].

При составлении математической модели были использованы следующие основные уравнения: уравнения газовой диффузии, уравнение переноса и распределения примесей. Для турбулентной диффузии, в общем случае нестационарное уравнение:

$$(1) \quad \delta_{ts}\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla(-D\cdot\nabla\cdot c) = R\,,$$

где $\nabla$ – оператор Гамильтона; D – коэффициент диффузии; $R$ – константа скорости реакции; $c$ - искомое поле концентраций; $\delta_{ts}$ – временной коэффициент.

Граничное условие третьего рода:

$$(2) \quad -n(-D\cdot\nabla\cdot c) = N_0 + k_c(c_b - c)\,,$$

где $N_0$ – произвольное выражение потока; $k_c$ – коэффициент массопереноса; $c_b$ – объемная концентрация.

Для прикладного режима конвекции и диффузии уравнение (1) видоизменяется:

$$(3) \quad \delta_{ts}\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla(-D\cdot\nabla\cdot c + c\cdot u) = R\,,$$

добавляется поле скоростей, граничное условие:

$$(4) \quad -n(-D\cdot\nabla\cdot c + c\cdot u) = N_0\,.$$

В общем случае уравнение переноса и распределения примесей выглядит следующим образом:

$$(5)\quad \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla(-D_{LG} \cdot \nabla \cdot c + u \cdot c) = R_G + S_c,$$

где $c$ – концентрация ЗВ; $D_{LG}$ – гидродинамический тензор дисперсии; $u$ – векторное поле скоростей; $R_G$ – константа скорости реакции в газовой фазе; $S_c$ – масса или скорость выделения ЗВ от источника.

Чтобы эффективно и оптимально формировать знания для ЭС базовых вкладов необходимо разработать базу данных ЭС по результатам моделирования распространения загрязняющих веществ от источников в атмосфере, что и было сделано в среде COMSOL Multiphysics.

Для удобства обработки, численные результаты и исходные данные моделирования предлагается свести в сводную таблицу. Структура сводной базы данных представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Структура сводной базы данных для экспертных систем

| Содержание информации | Тип данных |
|---|---|
| Название загрязняющих веществ | Символьный |
| Температура воздуха | Числовой |
| Скорость ветра | Числовой |
| Направление ветра | Символьный |
| Атмосферное давление | Числовой |
| Координаты точек по оси X | Числовой |
| Координаты точек по оси Y | Числовой |
| Выбросы | Числовой |
| Концентрация загрязняющих веществ в точке измерения | Числовой |

Подсистема расчета базовых вкладов предназначена для расчета вклада каждого предприятия в суммарную концентрацию загрязняющего вещества в точке измерения (ПНЗА). Вклад каждого предприятия изменяется в зависимости от режима его работы и метеоусловий. Структура подсистемы базовых вкладов в среде Matlab [3] представлена на рисунке 2. Входными переменными являются скорость и направление ветра, температура атмосферы и режимы работы предприятий.

Пусть имеются N предприятий: $X_1$, $X_2$,…,$X_N$, которые находятся в одном из режимов работы (пуск, останов, нормальный или аварийный режим), и есть данные о метеоусловиях: скорость ветра (V), направление ветра (H), температура атмосферы (T). С помощью ЭС подсистемы базовых вкладов определяются соответствующие базовые вклады предприятий $m_1$, $m_2$,…,$m_N$. Базовые вклады предприятий пропорциональны концентрациям ЗВ, полученных в результате моделирования распространения загрязняющих веществ в атмосфере в среде COMSOL Multiphysics с учетом оценки экспертов.

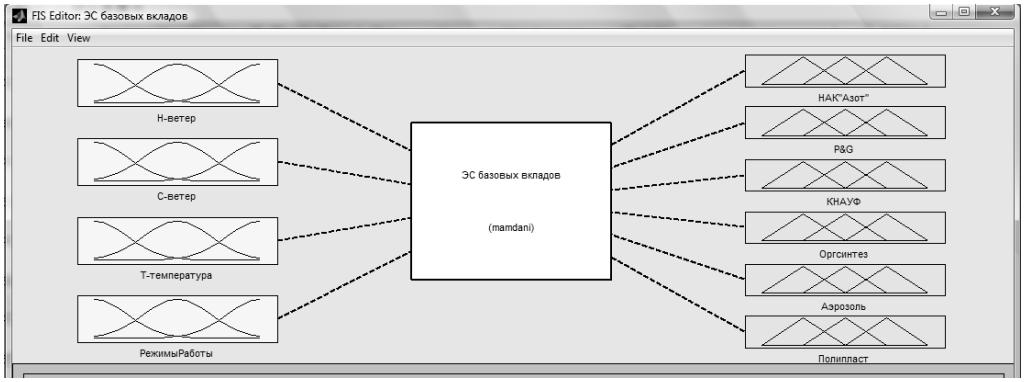



Рисунок 2 – Структура подсистемы базовых вкладов

Для формализованного представления знаний в системе предложено формировать группу продукционных правил с использованием лингвистических переменных (скорости и направления ветра, температуры атмосферы и режимов работы предприятий, базовых вкладов предприятий). В качестве примера на рисунке 3 представлена лингвистическая переменная «скорость ветра», для которой используются 7 термов «Штиль», «Тихий», «Легкий», «Слабый», «Умеренный», «Свежий», «Сильный», соответствующие шкале скорости ветра Бофорта [4].

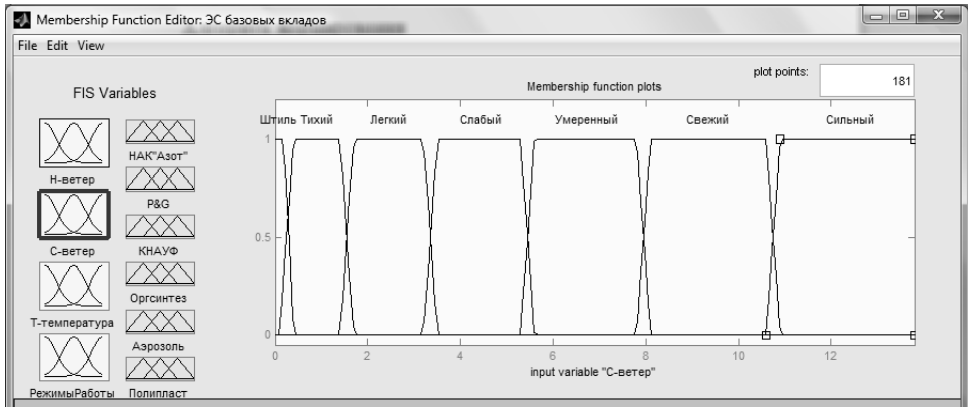



Рисунок 3 – Лингвистическая переменная «скорость ветра»

Эти продукционные правила способствуют определению вкладов химико-технологических предприятий в суммарную концентрацию загрязняющего вещества при различных режимах работы предприятий и различных метеоусловиях. Пусть, каждое i-ое предприятие находится в j-ом режиме работы, а метеоусловия имеют k-ое состояние. Необходимо определить m-ый диапазон базовых вкладов предприятий в суммарной концентрации загрязняющего вещества в точке измерения. В виде продукционной модели данная формулировка будет выглядеть следующим образом:

$$(6)\quad \forall(i,j,k,m): A_o \equiv [\overline{x_i^j}, \overline{y_k} \to \overline{u_m^i}], i \in I; j \in J; k \in K; m \in M,$$

где $\overline{x_i^j}$ – вектор *i*-го предприятия находится в *j*-ом режиме работы; $\overline{y}_k$ – вектор *k*-го состояния метеоусловий; $\overline{u_m^i}$ – вектор m-го диапазона вклада *i*-го предприятия; $I$ – общее количество предприятий; $J$ – количество режимов работы; $M$ – количество диапазонов базовых вкладов.

Традиционно продукционные правила пишутся в форме «Если…, то…», тогда правила базы знаний подсистемы базовых вкладов будут выглядеть следующим образом: «Если i-ое предприятие находится в j-ом режиме работы и метеоусловия имеют k-ое состояние, то базовой вклад предприятия находится в m-ом диапазоне» (рисунок 4).

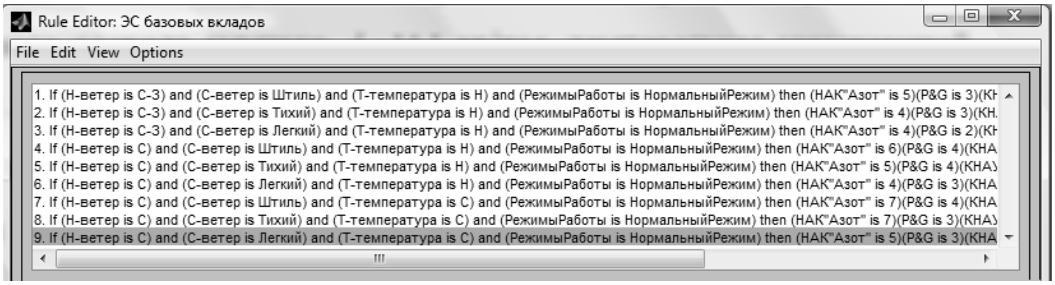



Рисунок 4 – Продукционные правила вывода подсистемы базовых вкладов

## 3 Методика расчета оптимальных долей сокращения предприятиями выбросов ЗВ

Если при k-ом состоянии метеоусловий на ПНЗА измеренная концентрация загрязняющего вещества $c$ > ПДК, то концентрация загрязняющего вещества, создаваемая выбросами i-го предприятия в контрольной точке ( $c_i$ ) вычисляется по следующей формуле:

$$c_i = c\frac{u^i}{\sum_{j=1}^{N} u^j}. \quad (7)$$

Обозначим: $c_i^{'}$ – концентрацию загрязняющего вещества, создаваемая выбросами i-го предприятия в контрольной точке после регулирования выбросов, чтобы обеспечить суммарную концентрацию в пределах ПДК;

$Q_i$ , $Q_i^{'}$ - выбросы i-го предприятия в соответствии с концентрациями $c_i$ , $c_i^{'}$ - концентрация загрязняющего вещества, создаваемая им в контрольной точке.

Тогда:

$$\sum_{i=1}^{N} c_i^{'} \le ПДК \ ; \ \ \forall i = \overline{1,N} : 0 \le c_i^{'} \le c_i, 0 \le Q_i^{'} \le Q_i \, . \quad (8)$$

Любое предприятие заинтересовано в минимальных затратах, необходимых для установления нормативных выбросов $Q_i^{'}$. Для этой цели, к поставленной системе неравенств добавляем целевую функцию:

$$\sum \gamma_i (Q_i - Q_i^{'}) \to \mathbf{min}, \quad (9)$$

где в общем случае $\gamma_i$ - стоимость снижения на единицу выброса для i-го предприятия. В данном виде решение $Q_i^{'}$ дает минимум затрат на достижение нормативного загрязнения атмосферы.

В предположении $\gamma_i = \gamma_0$ , $\frac{Q_i - Q_i^{'}}{Q_i} = q_i$ и $Q_i = Q_i^{регл}$

выражение (9) эквивалентно:

(10) $\gamma_0 \sum Q_i^{регл} \cdot q_i \rightarrow \mathbf{min},$

где $q_i$ – доля сокращения выбросов для i-го предприятия; $Q_i^{регл}$ - выбросы i-го предприятия в соответствии с регламентом работы.

Пользуясь линейной зависимостью концентрации выбрасываемого вещества от массы выбросов по методике ОНД-86 [5] и Гауссовской моделью рассеивания ЗВ по выбросам одного источника можно представить загрязнение атмосферы в контрольных точках в виде линейной формы:

(11) $c = a \cdot Q,$

где $c$ – концентрация в контрольной точке; $Q$ – выброс источника; $a$ – коэффициент влияния.

Из (11) следует, что для i-ого предприятия $\frac{c_i'}{c_i} = \frac{Q_i'}{Q_i}$ или:

(12) $\frac{c_i - c_i'}{c_i} = \frac{Q_i - Q_i'}{Q_i} = q_i.$

Из (12) следует, что:

(13) (13) $\sum_{i=1}^{N} (c_i - c_i') = \sum_{i=1}^{N} c_i \cdot q_i.$

Из (7) и (13) следует, что:

(14) $c - \sum_{i=1}^{N} c_i' = \sum_{i=1}^{N} c \frac{u^i}{\sum_{j=1}^{N} u^j} q_i.$

Из (8) и (14) следует, что:

(15) $1 - \frac{\text{ПДК}}{c} \le \sum_{i=1}^{N} \frac{u^i}{\sum_{j=1}^{N} u^j} q_i \; ; \; \forall i = \overline{1, N} : 0 \le q_i \le 1.$

Следовательно, задача сводится к поиску долей сокращения выбросов для всех предприятий ( $q_i$ ; $i = \overline{1, N}$ ), при которых целевая функция (10) с ограничениями (15) достигает минимума. Решение этой задачи обеспечит значение суммарной концентрации в контрольной точке в пределах ПДК и суммарные затраты всех предприятий, минимально необходимые для установления нормативных выбросов.

Разрабатываемая подсистема вычисления долей сокращения выбросов решает поставленную выше задачу на основе генетического алгоритма в среде Matlab [6].

Был разработан М-файл в редакторе Matlab, в котором описана целевая функция с весовыми коэффициентами $Q_1$, $Q_2$,…, $Q_N$, которые задаются с учетом оценки экспертов, т.к. отсутствуют аналитические и эмпирические зависимости между режимами работы и выбросами предприятий.

Далее был разработан М-файл с ограничениями (15). Затем была выполнена задача оптимизации в окне команд Matlab с помощью генетического алгоритма и на рисунке 5 представлен графический анализ решения. На первом графике изображена наилучшая «особь» (множество долей сокращения выбросов для предприятий). Второй график соответствует изменению расстояния между «особями» в «поколениях». «Особи» становятся одинаковыми (хеммингово расстояние = 0) в последних 12 поколениях.

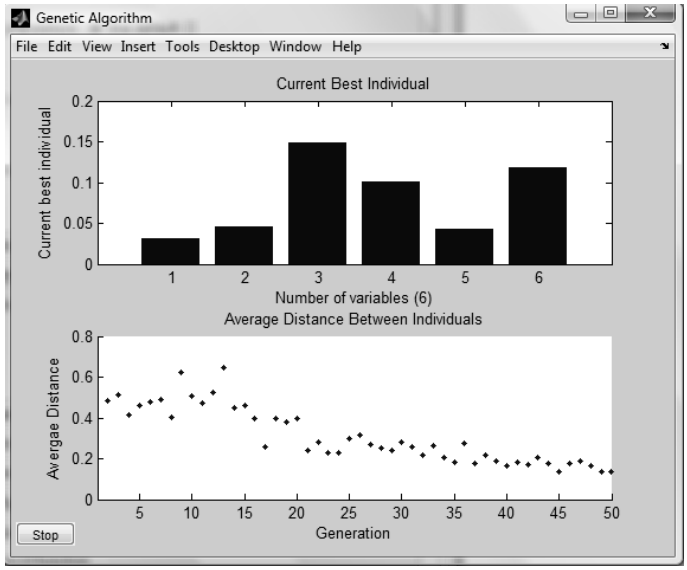



Рисунок 5 – Графический анализ решения

В результате расчетов были получены доли сокращения выбросов ЗВ для предприятий при условии, что измеренная концентрация NO в контрольной точке в 2 раза превышает ПДК. Вычисленные по разработанной методике доли сокращения выбросов ЗВ для предприятий равны соответственно: для КНАУФ-ГИПС-Новомосковск 3,2 %, для «P&G - Новомосковск» 4,6 %, для ОАО НАК «Азот» 14,8 %, для ООО «Оргсинтез» 10,1 %, для ООО «Аэрозоль-Новомосковск» 4,3 %, для ООО «Полипласт» 11,9 %. Разрабатываемая система рекомендует этим предприятиям именно в таком соотношении снизить нагрузку, до тех пор, пока концентрация ЗВ не станет ниже ПДК, т.е. придет в норму.

## Заключение

Результаты работы интеллектуальной системы выработки рекомендаций предприятиям химико-технологической промышленности позволяют поддерживать загрязнение атмосферы в пределах нормы при больших суммарных выбросах, определить или прогнозировать в условиях неопределенности в реальном времени развитие экологических и социально-экологических ситуаций, а также получить соответствующие рекомендации по их регулированию. В результате такого решения предприятия могут существенно снизить платежи за сверхнормативный выброс в атмосферу.

## Список литературы

[1] Марион Вихманн-Фибиг. Загрязнение воздуха: Моделирование рассеивания загрязняющего вещества в воздухе. Энциклопедия по охране и безопасности труда. http://base.safework.ru/iloenc 20.03.2012г.
[2] Earth Science Module. User's Guide. – Version: November 2008, COMSOL 3.5a.
[3] Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. ЧПб: БХВ-Петербург. 2005. 736с.
[4] Гидрометцентр России. Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ http://meteoinfo.ru/bofort 20.03.2012г.
[5] Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащих в выбросах предприятий (ОНД-86) Ленинград, Гидрометеоиздат, 1987.
[6] Genetic Algorithm Toolbox For Use with MATLAB. User's Guide. – Version 1.2.

# РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ПРОМЫШЛЕННОГО РЕГИОНА

**В.Ю. Волков, Самаха Башир Аббас, В.В. Батышкина**

Новомосковский институт (филиал) РХТУ им. Д.И. Менделеева
301665, Тульская обл., Новомосковск, ул. Дружбы, 8, Россия
duga@mail.ru, vbatyshkina@mail.ru
тел: +7 (48762) 6-06-76, 6-12-50

***Ключевые слова**: автоматизированная система, научные исследования, химическая технология, концентрация загрязняющих веществ, атмосферный воздух, промышленный регион*

**Abstract**

Developed a distributed automation system at the expense of uses of modern information technology can improve the efficiency of research distribution of pollutants emitted by chemical-technological enterprises in the air of industrial region.

## Введение

В настоящее время автоматизация научных исследований приобретает все большее значение для повышения эффективности научно-технических разработок, т.к. позволяет проводить более точные и полные исследования, получать более точные модели исследуемых объектов и явлений, ускорять ход научных исследований, уменьшать их трудоемкость. Особенно это касается случаев, когда изучать сложные объекты и процессы, исследование которых традиционными методами затруднительно или невозможно.

Современные химико-технологические производства, такие как: ОАО НАК «Азот», ООО «Проктер энд Гэмбл - Новомосковск», ОАО «Поликонт», ОАО «Кнауф Гипс Новомосковск», а также другие предприятия (ОАО «ГОТЭК-Центр», ОАО «Новомосковская ГРЭС» и т.п.), расположенные на территории МО город Новомосковск Тульской области в процессе своей деятельности выбрасывают в атмосферу огромное количество загрязняющих веществ (ЗВ). В последнее время в регионе наблюдается рост объемов производства предприятий химической технологии, стремительными темпами развивается транспортная инфраструктура региона, строятся новые автомагистрали. Все это ведет к увеличению выбросов ЗВ в атмосферу и, как следствие, росту жалоб населения города Новомосковска и Новомосковского района на качество атмосферного воздуха, состояние которого непосредственно влияет на жизнь и здоровье людей. Очень часто жалобы касаются запаха вредных веществ (сероводород, нафталин и т.п.), однако последующие лабораторные исследования не подтверждают наличие этих веществ в атмосферном воздухе. Это может быть обусловлено тем, запахи различных веществ могут быть похожи друг на друга, а контролирующие органы могут проводить измерения только по нормируемым веществам, кроме того, время от жалобы до забора проб для анализа может составлять часы, а зачастую и десятки часов. Такая ситуация характерна для любого города с большим количеством химико-технологических предприятий.

Масштабные аналитические исследования выбросов химико-технологических предприятий в атмосферу и их распространения по окружающим территориям очень дороги, т.к. часто возникает ситуация, когда заранее не известно, что надо измерять, когда и в каком месте.

По результатам исследования более чем десятилетней давности в атмосфере МО г. Новомосковска Тульской области содержится более 150 вредных веществ. На химико-

технологических и иных предприятиях существуют собственные лаборатории контроля ЗВ, однако доступ к результатам их аналитической деятельности, необходимой для принятия управленческих решений по снижению концентраций ЗВ в атмосфере ограничен, а зачастую и не доступен совсем. Ресурсная база при выполнении исследовательских работ контролирующих органов ограничена, оборудование лабораторий устарело и влечет за собой низкий уровень качества аналитики и результатов исследований.

Исходя из вышеизложенного, в рамках муниципальной программы МО город Новомосковск «Информационное обеспечение экологической безопасности и охраны здоровья населения на 2011-2013 годы», возникла необходимость в создании эффективной системы научных исследований распространения ЗВ в атмосферном воздухе региона.

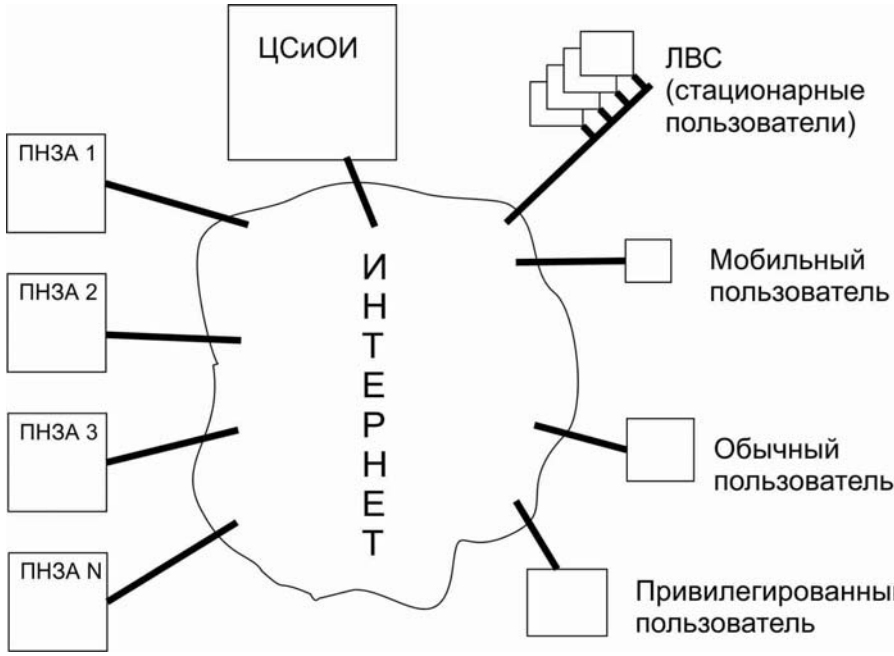
## 1 Техническая структура автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) с удаленным доступом

Для осуществления поставленной цели – разработки АСНИ с удаленным доступом были сформулированы и решены ряд научных и технических задач. К ним можно отнести следующие задачи:

1) Разработка структуры и состава распределенной автоматизированной системы научных исследований с удаленным доступом.
2) Создание базы данных (БД) химико-технологических предприятий – источников загрязнения атмосферного воздуха МО города Новомосковска Тульской области.
3) Создание БД норм, законов, ГОСТ, СНиП и т.п. с удаленным доступом через Интернет для оперативного использования и пополнения актуальными документами.
4) Создание БД ЗВ, контроль которых осуществляется в соответствии с нормами и законами РФ.
5) Создание БД моделей распространения ЗВ в атмосфере.
6) Создание БД технических средств измерения ЗВ, регламентируемых ГОСТ.
7) Создание БД программ моделирования распространения ЗВ.
8) Создание БД справочной и учебной литературы по тематике исследования для обучения пользователей системы и студентов ВУЗов.
9) Разработка упрощенной модели МО город Новомосковск с учетом рельефа местности, застройки и транспортных магистралей.
10) Разработка методики проведения исследований распространения ЗВ в атмосфере.
11) Проведение исследований распространения потоков воздушных масс по территории МО город Новомосковск и формирование рекомендаций по проведению замеров концентраций ЗВ в приземном слое атмосферы (координаты, способы измерения, количество измерений и т.п.).

Состав и структура интеллектуальной АСНИ распространения ЗВ в атмосферном воздухе МО город Новомосковск приведена на рисунке 1.

Информация о состоянии загрязнения атмосферного воздуха поступает от постов наблюдения загрязнения атмосферы (ПНЗА) (рисунок 1) удаленно (через Интернет) в центр сбора и обработки информации (ЦСиОИ), где автоматически заносится в соответствующую БД. Пользователи (стационарные, мобильные, одиночные и др.), имеющие соответствующий доступ к системе могут пользоваться различными БД, входящими в АСНИ (см.выше), проводить исследования, пополнять БД соответствующей информацией, поддерживать работоспособность системы (привилегированные пользователи).




ЦСиОИ – центр сбора и обработки информации; ПНЗА 1… ПНЗА N – стационарные посты наблюдения загрязнения атмосферы; ЛВС – локальная вычислительная сеть стационарных пользователей

Рисунок 1 – Техническая структура АСНИ с удаленным доступом

## 2 Информационная структура АСНИ

Информационная структура АСНИ изображена на рисунке 2.

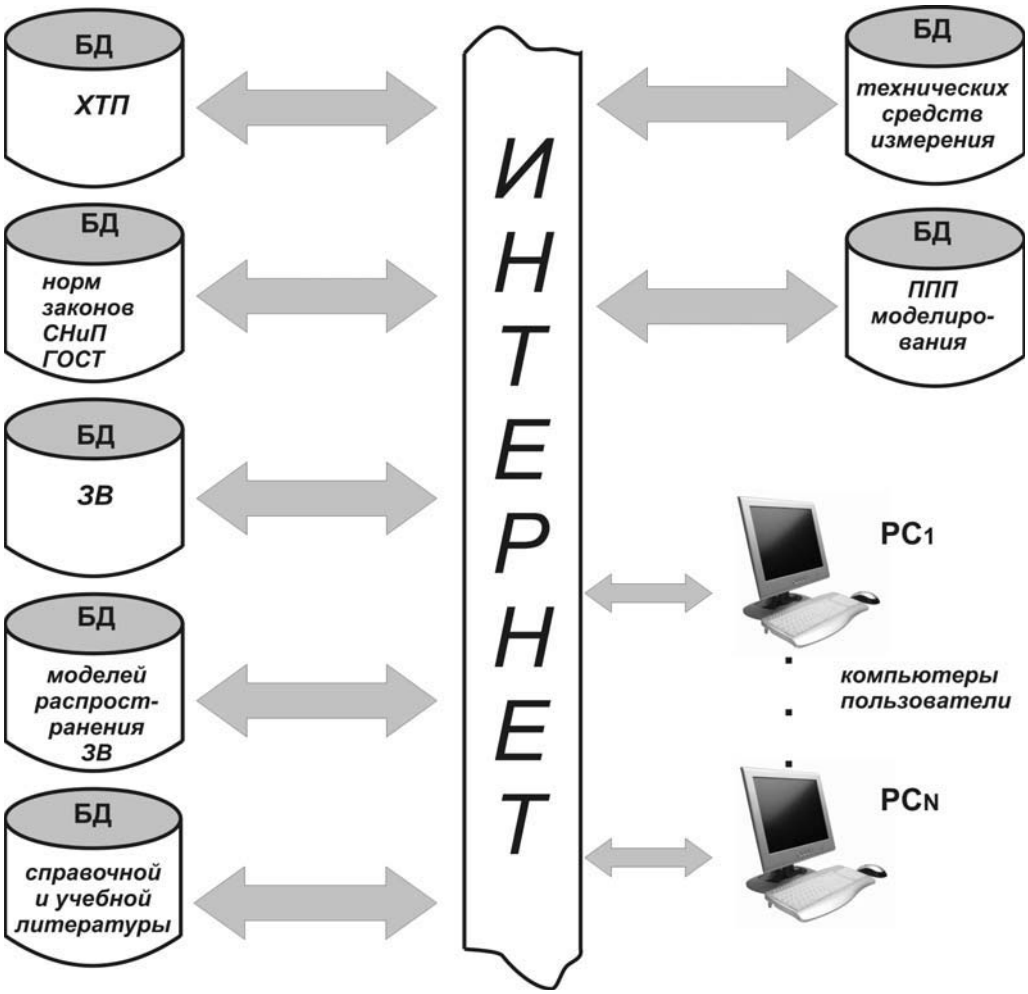
Как видно из рисунка 2 отличительной особенностью разработанной АСНИ является тесное взаимодействие пользователей с системой через Интернет. Пользователи и отдельные БД системы могут быть расположены очень далеко территориально друг от друга, что не мешает им эффективно работать. Необходимым условием их работы является наличие доступа к сети Интернет.

В [1] приведен анализ различных способов организации доступа к Интернет. В разработанной системе используется как традиционный проводной, так и беспроводной доступ через WiMAX и 3G.

Методика работы в системе сводится к следующему:

1) Пользователь подключается к Интернет и вводит в адресной строке браузера (например, Internet Explorer) адрес специального сайта, где размещен web-интерфейс доступа к разработанной АСНИ.
2) После регистрации в системе пользователь попадает на главную страницу, где расположено меню, с помощью которого можно выбрать с какой именно БД он хочет работать.
3) Далее, загрузив на свой компьютер исходные данные для моделирования из соответствующих БД, пользователь может проводить исследования с помощью установленных ранее на его компьютер пакетов прикладных программ (ППП), либо разработанных им самим программ.
4) Результаты моделирования, исследований и т.п. затем заносятся в соответствующие БД, и будут доступны другим пользователям.

Таким образом, разработанная АСНИ является, в отличие от традиционных АСНИ, распределенной, т.к. расположена на многих компьютерах, объединенных через Интернет.




БД – Базы данных; PC 1… PC N – компьютеры пользователей

Рисунок 2 – Информационная структура АСНИ

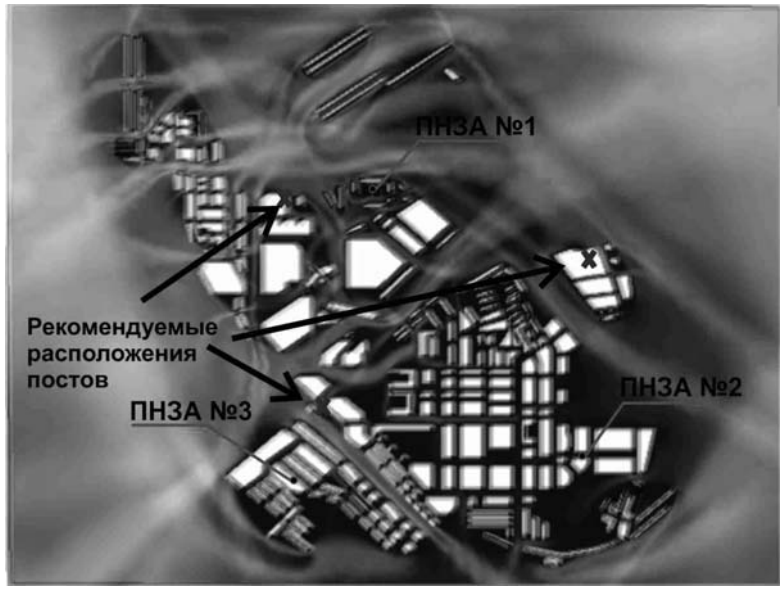
Основной сайт с web-интерфейсом построен по динамической технологии – вся информация хранится в базе данных, а страницы генерируются «на лету» автоматически, по мере доступа к ним [1, 2].

Результаты моделирования в виде HTML-файлов можно размещать в Интернет. На их основе в дальнейшем планируется создавать интерактивные карты территорий загрязнения.

В качестве примера моделирования на рис.3 приведена укрупненная схема МО города Новомосковска, на которой, путем наложения, получены пути распространения воздушных потоков ЗВ для различных метеоусловий.

На рисунке 3 отмечены «крестами» рекомендуемые места расположения ПНЗА (на них указывают стрелки).

Моделирование производилось при различных направлениях ветра и его скорости, однако после наложения друг на друга результатов моделирования хорошо видны места наибольшей концентрации ЗВ в приземном слое атмосферного воздуха.




ПНЗА №1… ПНЗА №3 – действующие стационарные посты наблюдения загрязнения атмосферы

Рисунок 3 – Результаты моделирования в АСНИ

Основное отличие разработанной АСНИ от традиционных заключается в том, что основной задачей АСНИ является не только получение новых знаний об исследуемом процессе, объекте или явлении, а именно – распространении ЗВ в атмосфере промышленного региона, но и активное использование удаленного доступа через Интернет. Это позволяет работать с АСНИ большому количеству заинтересованных лиц одновременно, а информацию, хранящуюся в распределенных БД АСНИ, постоянно поддерживать на актуальном уровне.

Практическая значимость разработанной системы заключается в том, что с помощью созданной АСНИ разработаны рекомендации по осуществлению измерений ЗВ: подобраны технические средства измерений, места измерений, разработан оптимальный маршрут движения передвижной лаборатории измерения ЗВ в атмосфере и т.п. Кроме того, результаты работы могут быть использованы в учебном процессе в курсах «Моделирование систем и процессов», «Диагностика и надежность автоматизированных систем», «Безопасность жизнедеятельности».

**Список литературы**

[1] Вент Д.П., Бархум Ибрахим, Али Мансур. Современные информационные технологии в автоматизированных системах экологического мониторинга атмосферного воздуха. Монография. Новомосковск, 2008. 160 с.

[2] Волков В.Ю., Батышкина В.В., Башир Самаха Аббас. Виртуальная система мониторинга состояния атмосферного воздуха г. Новомосковска Тульской области. Датчики и системы. № 11. 2010. С. 46.

# СОЗДАНИЕ НЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕСТИЦИОННЫМИ ПРОЕКТАМИ

**Г.И. Горемыкина[1], М.А. Пономарёва[2]**

[1]Московский государственный университет экономики, статистики и информатики
119501, Москва, ул. Нежинская, 7, Россия
[2]Балашовский институт Саратовского государственного университета
412300, Балашов, ул. К. Маркса, 19, Россия
mig0109@mail.ru
тел: +8 (495) 318-16-20

***Ключевые слова:*** *инвестиционный проект* (*ИП*), *лингвистическая переменная* (*ЛП*), *нечёткое множество*, *чистый приведённый доход*

**Abstract**
Basic purpose of work – creation of an fuzzy control system by investment projects.

## Введение

Данная работа завершает серию публикаций, посвящённых исследованиям, проводимым авторами на ОАО Мукомольный завод №7 «Балашовский» в связи с необходимостью решения задачи диагностики существующих на нём подходов и бизнес-процессов и прогнозирования его развития на будущее.

Современное предприятие можно рассматривать как сложную экономико-кибернетическую систему, системообразующим фактором которого является прибыль как полезный результат деятельности. Точный количественный анализ поведения сложных систем для практического исследования реальных задач недостаточен. Поэтому выбран подход, базирующийся на том, что элементами инвестиционного проекта являются не числа, а нечёткие множества, для которых переход от «принадлежности к классу» и «непринадлежности» не скачкообразен, а непрерывен. В основе такого подхода лежит логика с нечёткой истинностью, нечёткими связями и нечёткими правилами вывода. Одной из особенностей данного подхода является использование лингвистических переменных вместо числовых переменных или в дополнение к ним.

Необходимым условием стабильного функционирования и развития экономики является эффективная инвестиционная политика, ведущая к увеличению объёмов производства, росту национального дохода, развитию различных отраслей и предприятий. Наиболее актуальным на сегодняшний день является вопрос об автоматизации инвестиционной деятельности предприятия. Повышение эффективности инвестиционных вложений является неизменно важной задачей для предприятия. Одним из способов решения данной задачи, по мнению авторов, является создание информационной системы, позволяющей контролировать и регулировать процесс инвестирования. В работе предлагается информационная система управления инвестиционными проектами на основе теории нечётких множеств. Структурная схема моделирующего алгоритма системы представлена в [1].

## 1 Описание работы нечёткой системы управления ИП

В качестве программного обеспечения для создаваемой системы была выбрана среда разработки Delphi 7. Программа состоит из восьми модулей, в каждом из которых происходит обработка входных данных на корректность введения, им присваиваются внутренние значения

переменных и происходят первичные вычисления. Основная работа программы заключается в модулях №5 и №8. В пятом модуле происходит расчёт риска, чистого приведённого дохода, а также осуществляется принятие решения. Восьмой модуль формирует отчёт на основе данных, определённых ранее, и выводит график соотношения треугольно-нечётких значений чистого приведенного дохода *NPV* и критерия эффективности проекта *G*.

Система работает по следующему алгоритму:

- ввод данных: треугольные значения входных исходных параметров проекта, основные характеристики предприятия и проекта;
- определение инновационной стратегии предприятия;
- расчёт степени нефинансовой привлекательности проекта;
- расчёт риска, если расчёт производится в одной из контрольных точек (см. [1]), то – сравнение с запланированным показателей;
- оценка риска на основе лингвистических переменных;
- принятие решения.

На основе разработанного алгоритма была создана система компьютерной поддержки принятия решений. Программа состоит из нескольких окон, в которые пользователь вводит данные, и одного окна отчёта, в котором выводятся результаты исследования и график соотношения *NPV* и *G*.

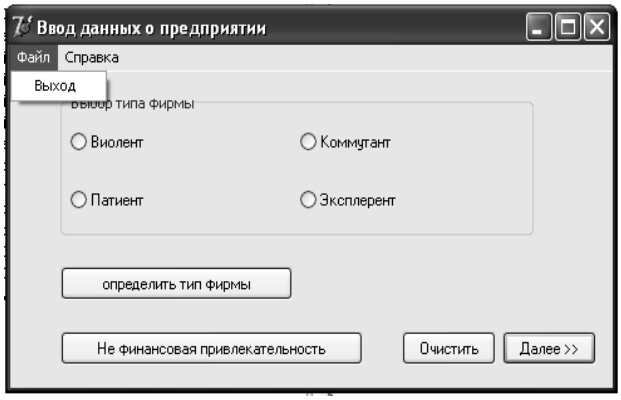



Рисунок 1 – Ввод данных о предприятии

Первое окно «Ввод данных о предприятии» представлено на рис.1. На каждой из форм находится панель главного меню, состоящего из пунктов «Файл» и «Справка». В меню «Файл» только один пункт меню «Выход», которым необходимо воспользоваться для удачного завершения программы. Меню «Справка» состоит пунктов «Помощь» и «О программе», в которых находятся сведения о работе программы и об авторах соответственно.

Рассмотрим работу системы в начале проекта, то есть в нулевой контрольной точке (см. [1]). В первом окне программы «Ввод данных о предприятии» пользователю предлагается выбрать один из вариантов поведения фирмы на рынке. Если пользователь не может определить тип фирмы самостоятельно, то ему следует нажать кнопку «Определить тип фирмы», которая вызовет новую форму – рис.2.

Процедура определения инновационной стратегии фирмы на рынке соответствует составлению морфологической таблицы (табл.1). При этом если какие-то параметры неизвестны, то пользователь не отмечает их, на результат пропущенные параметры не влияют. После заполнения данных о предприятии, пользователю необходимо нажать «Определить тип» и в окне внизу формы появится результат исследования. Он автоматически выводится в первую форму программы. Тип инновационной стратегии предприятия заносится в переменную tip типа Char.

Кроме того, на первой форме находится кнопка для определения нефинансовой привлекательности инвестиционного проекта. При нажатии на кнопку выводится форма «Оценка степени нефинансовой привлекательности» рис. 3.

При вычислении степени привлекательности ИП в качестве критерия отбора экспертами были выбраны экологичность, имиджевость, социальная значимость, соответствие проекта

стратегии компании. Эти критерии могут быть выражены в конкретных измеримых показателях, определены их возможные вариации. Однако при изучении ИП становится ясно, что критерии привлекательности проекта не равнозначны между собой. Поэтому целесообразно ранжировать их между собой с помощью весовых коэффициентов (таблица 1).

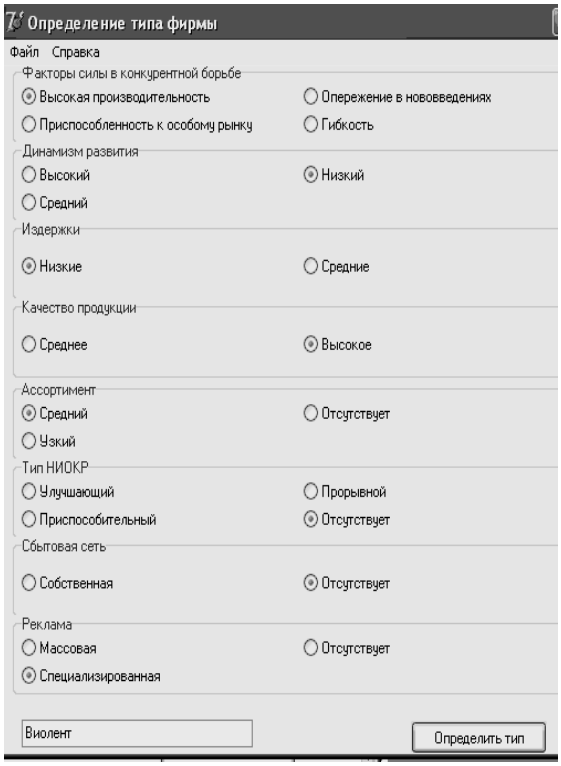



Рисунок 2 – Определение типа фирмы

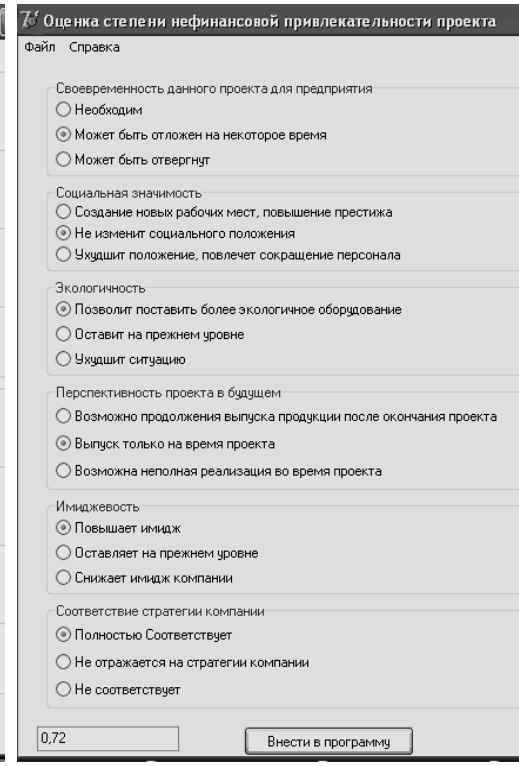



Рисунок 3 – Оценка степени нефинансовой привлекательности

Таблица 1 – Весовые коэффициенты критериев привлекательности

| Критерий привлекательности | Вес критерия |
|---|---|
| Своевременность данного проекта | 3 |
| Социальная значимость | 1 |
| Экологичность | 1 |
| Перспективность проекта | 2 |
| Имиджевость | 2 |
| Соответствие стратегии компании | 3 |

В программу авторами было заложено, что степень привлекательности проекта может принимать значение от 0 до 1. При этом нулевое значение соответствует абсолютно непривлекательному проекту, а единичное – проекту наиболее привлекательному с точки зрения стратегии предприятия. Если не просчитывать степень привлекательности проекта, то она ста-

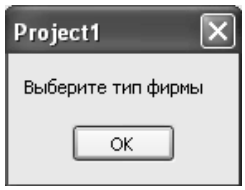



Рисунок 4 – Сообщение об ошибке

новится по умолчанию равной 0. При расчёте не учитываются такие параметры как цена, прибыль, доход, риск и прочие, которые обычно используются для оценки проектов. Финансовые показатели проекта вложены в другую процедуру – процедуру расчёта риска. Степень привлекательности проекта оказалась равной 0,72. Полученное число входит в терм-множество ЛП «Степень привлекательности», соответствующее значению «Высокая».

Если в первой форме не выбрать тип фирмы, то при нажатии кнопки «Далее» будет выдано сообщение: «Выберите тип фирмы» (рис.4). Определение типа фирмы необходимо для корректной работы программы. Для переключения между формами используются кнопки «Далее» и «Назад». Кроме того, при нажатии кнопки «Очистить» все введённые данные стираются.

После ввода типа фирмы и оценки привлекательности проекта выводится следующая форма (рис.5).

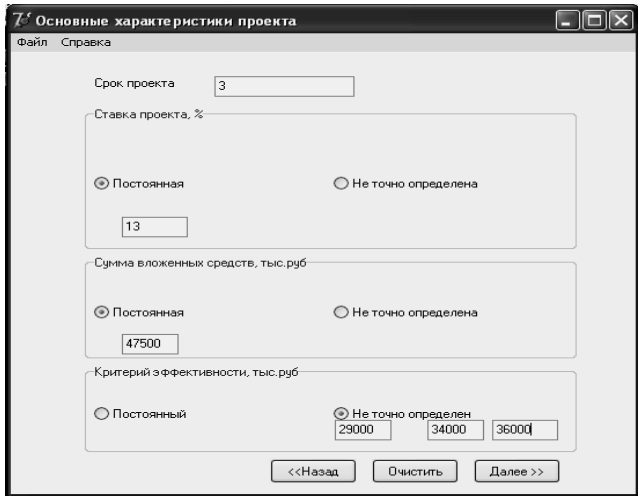



Рисунок 5 – Основные характеристики проекта

Срок инвестиционного проекта реконструкции мукомольного завода – 3 года. В окна для ввода числовых данных возможно введение только положительных чисел, при попытке ввода отрицательных чисел или текстовой информации программа не позволяет произвести ввод.

Ввод ставки дисконтирования, суммы вложенных средств и критерия эффективности возможен двумя способами – чётким и треугольным числом. Ставка дисконтирования для проекта определена точным значением 13% и начисляется по правилу сложных процентов.

Сумма начальных инвестиций, необходимых для реконструкции, равна 47,5 млн. руб., а критерий эффективности, то есть запланированная чистая приведённая стоимость, определён нечётко (29 млн., 34 млн., 36млн.). Значения функции принадлежности задаются в программе числами (0,05; 1; 0,05). При неверном введении треугольного числа, то есть без соответствия минимум-оптимум-максимум, программа выдаёт ошибку и ожидает от пользователя верного введения данных. Если не введён какой-либо параметр проекта, то программа также выдаёт ошибку и ожидает верного ввода.

При корректном введении данных открывается окно ввода цен (рис. 6), а затем окно объёма реализации (рис. 7). Обе формы имеют четыре варианта ввода данных. При постоянном значении для всех периодов возможен ввод, как треугольного числа, так и постоянного значения параметра на протяжении всего срока проекта. При вводе по периодам также возможен ввод нечёткого числа и точного значения в каждый период проекта.

Цена введена треугольным числом на все три периода проекта. Это означает, что руководители предприятия не уверены в постоянном значении цены на реализуемую продукцию, как на протяжении всех периодов проекта, так и на каждом из них (см. [2]). Это связано с нестабильной экономической ситуацией в стране и в мире, что увеличивает риск неэффективности инвестиционных вложений.

Объём реализации представлен чётким числом, однако изменяется в течение срока проекта. Это связано с освоением нового оборудования, покупкой новых станков и созданием новых рабочих мест. Кроме того, возможен выход на мировой рынок муки, что существенно скажется на имидже предприятия и повысит степень привлекательности. Данные об объёме и цене продукции заносятся в двумерный массив порядка [1..3, 1..*n*], где *n* – срок проекта. Переменные занесены в раздел public, так как они будут использованы в других юнитах. Также как и в предыдущих формах происходит проверка треугольного числа на его границы и заполнение всех параметров, необходимых для корректной работы программы.

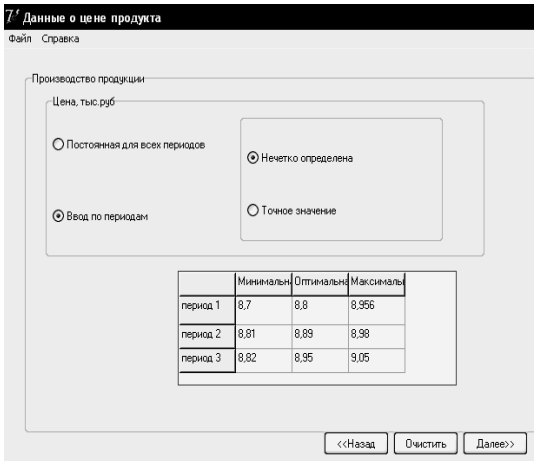



Рисунок 6 – Ввод данных о цене продукции

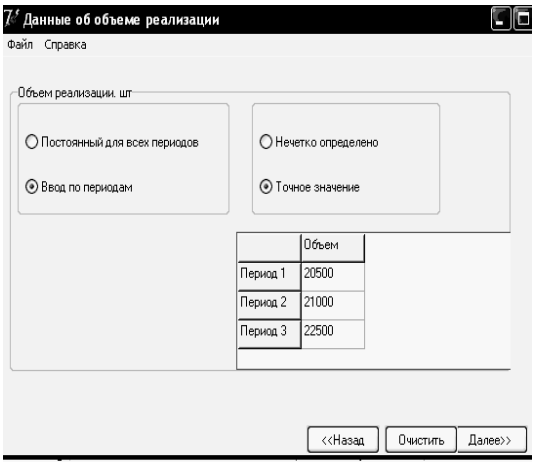



Рисунок 7 – Ввод данных об объёме реализации

Следующая форма содержит уже рассмотренный блок (рис.8).

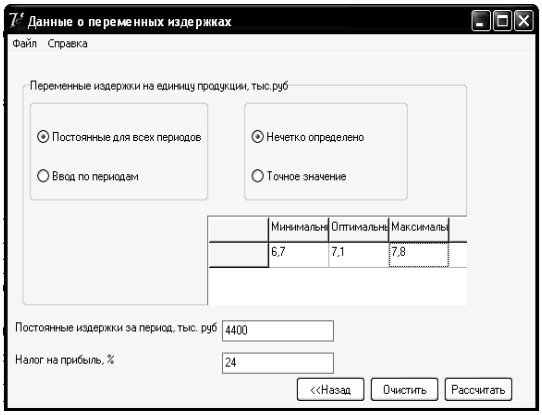



Рисунок 8– Ввод данных о переменных издержках

Переменные издержки заданы треугольным числом, однако, по мнению руководства, намеченные тенденции будут неизменны на протяжении всего срока проекта. Кроме переменных издержек на рассматриваемой форме находится окно для ввода постоянных издержек на каждый период. В число переменных издержек входит заработная плата, амортизация и прочие расходы, которые не зависят непосредственно от объёма произведённой продукции. Налог на прибыль составляет 24%.

При верном вводе всех исходных данных проекта и нажатии кнопки «Рассчитать» будут активизирован процесс расчёта степени риска и других выходных параметров проекта.

Первым этапом осуществляется расчёт прибыли предприятия, используется массив цены, объёма, переменных издержек и прочих параметров проекта:

```
for j:=1 to  form3.t2 do
begin
doh[1,j]:=((form2.pmas[1,j]-izmas[3,j])*form4.qmas[1,j])*(1-nalog)-izp;
doh[2,j]:=((form2.pmas[2,j]-izmas[2,j])*form4.qmas[2,j])*(1-nalog)-izp;
doh[3,j]:=((form2.pmas[3,j]-izmas[1,j])*form4.qmas[3,j])*(1-nalog)-izp;
end.
```

Далее, на основе теории нечётких множеств, рассчитывается чистый приведённый доход проекта:

$$[NPV_1, NPV_2] = (-)[I_1, I_2](+)\sum_{i=1}^{N}\left[\frac{\Delta V_{i1}}{(1+r_{i2})^i}, \frac{\Delta V_{i2}}{(1+r_{i2})^i}\right](+)\left[\frac{C_1}{(1+r_{N+1,2})^{N+1}}, \frac{C_2}{(1+r_{N+1,1})^{N+1}}\right] =$$

$$\left[-I_1 + \sum_{i=1}^{N}\frac{\Delta V_{i1}}{(1+r_{i2})^i} + \frac{C_1}{(1+r_{N+1,2})^{N+1}}, -I_2 + \sum_{i=1}^{N}\frac{\Delta V_{i2}}{(1+r_{i1})^i} + \frac{C_2}{(1+r_{N+1,1})^{N+1}}\right],$$

где $I_1$ – минимальный стартовый объём инвестиций, $I_2$ – максимальный стартовый объём инвестиций, $\Delta V_{i1}$ – минимальное оборотное сальдо поступлений и платежей в $i$-ом периоде, $\Delta V_{i2}$ – максимальное оборотное сальдо поступлений и платежей в $i$-ом периоде, $r_{i1}$ – минимальная ставка дисконтирования, $r_{i2}$ – максимальная ставка дисконтирования, $C_1$ – минимальная ликвидационная стоимость чистых активов, сложившаяся в ходе инвестиционного процесса, $C_2$ – максимальная ликвидационная стоимость чистых активов, сложившаяся в ходе инвестиционного процесса, $N$ – число плановых периодов инвестиционного процесса.

## 2 Тестирование программы в контрольных точках

Рассмотрим работу системы на этапах принятия решений. Структура отчёта (см. рис.9) такова, что сначала происходит описание входных данных. Это необходимо, чтобы при сохранении файла имелась возможность сравнения запланированных и реальных параметров. Это позволит также совершенствовать НИОКР предприятия в плане накопления информации для моделирования новых бизнес-проектов.

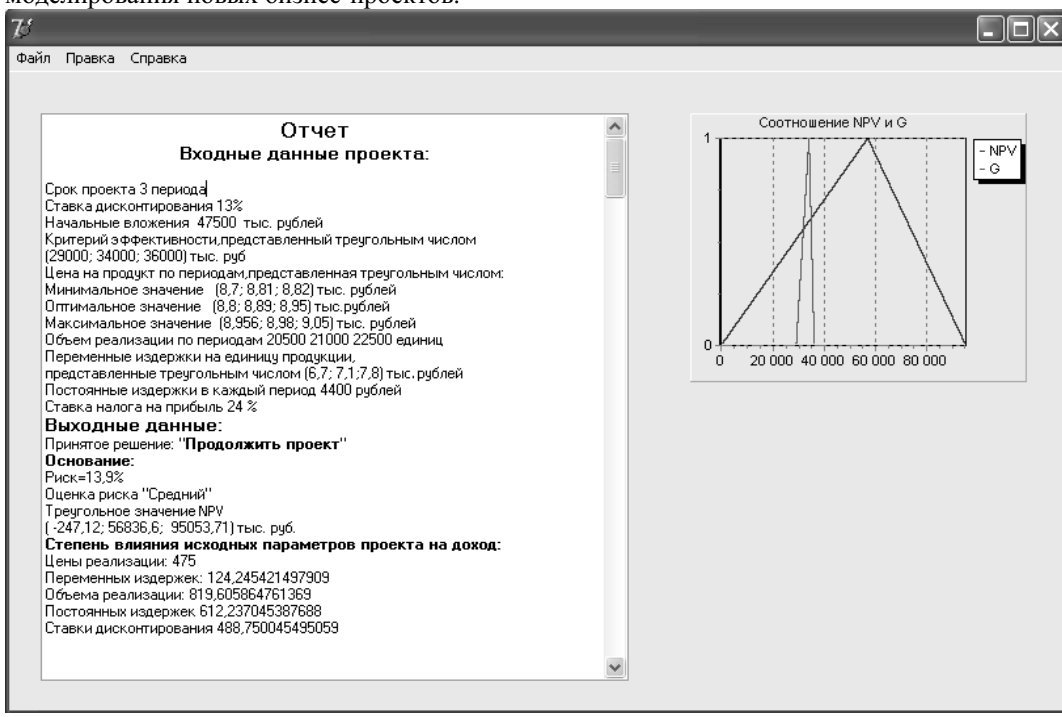



Рисунок 9 – Окно отчёта о принятии управленческого решения

При реализации программы на начало проекта была получена основа для принятия управленческого решения: риск равен 13,9%, оценка риска для предприятия-виолента – «Средний». При этом ранее рассчитанная степень привлекательности проекта высокая. Всё это в совокупности позволяет принять решение о продолжении проекта, если проверка проводится в контрольной точке, исключая нулевую, или о команде «начать проект» в нулевой точке (в рассматриваемом случае).

В окне отчёта также находится график треугольных значений *NPV* и *G*, что позволяет увидеть геометрическую интерпретацию зоны неэффективных инвестиций. Это важно, так как измерение риска проекта с позиции нечётких множеств – это выявление степени риска как геометрической вероятности события попадания точки (*NPV*, *G*) в зону неэффективных инвестиций и вычисление на её основе итогового (интегрального) значения степени риска неэффективности проекта.

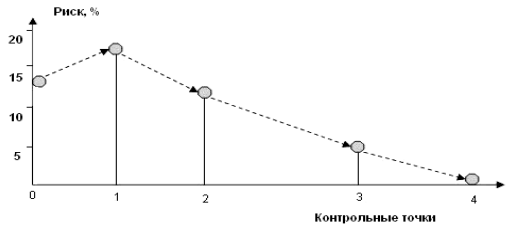



Рисунок 10 – Диаграмма динамики риска

Риск не является фиксированной величиной, он изменяется в зависимости от того, в какой стадии развития находится проект. Поэтому необходим контроль риска и, по возможности, управление им в течение всего проекта. С помощью программы был рассчитан риск в других контрольных точках. Этот риск является запланированным, так как расчёт проводится в начале проекта. Риск, вычисленный в контрольной точке, – это риск всего проекта, но с учётом изменившихся параметров проекта. На рис.10 приведена диаграмма динамики риска, соответствующая указанным контрольным точкам.

После начала ИП были проведены: демонтаж устаревшего оборудования, капитальный ремонт помещений, закупка и установка нового оборудования, обучение персонала работе на новом оборудовании. Завершение такого объёма работ эксперты в период прединвестиционного планирования приняли за этап окончания реконструкции. Таким образом, налицо первая контрольная точка. Был вычислен риск проекта, он составил 26,7%. Необходимо сравнить реальный риск с запланированным риском в первой контрольной точке. Так как в этой точке реальный риск проекта ─ 17,7% ─ больше, чем ожидаемый, то целесообразно вновь воспользоваться компьютерной поддержкой принятия решений.

Система выдала управленческое решение «Корректировать проект» (см. рис.11). В результате анализа чувствительности было выявлено, что наибольшее влияние на *NPV* оказывает величина объёма реализации. Однако непосредственно изменить объём реализации на данный момент не представляется возможным. Вторым по значимости фактором, воздействующим на увеличение *NPV*, как показал анализ, является цена сырья. Изменение же цены сырья на данный момент оказалось возможным. Ко времени наступления первой контрольной точки завершился контракт с дилером, который занимался поставкой зерна. Ему был предложен новый контракт, но уже с более выгодными ценами на сырьё для предприятия. Это дало дополнительные средства для закупки сырья, что позволило увеличить объём реализации. Принято было также решение о снижении критерия эффективности. Кроме того, продолжение инвестиционного проекта позволило сохранить рабочие места, тем самым, увеличить социальную значимость и, следовательно, степень привлекательности проекта. Действительно, после проведения дополнительного опроса экспертов произошло увеличение степени привлекательности с 0,72 до 0,77. С учётом изменившейся ситуации, определим основу для принятия управленческого решения. Риск проекта составил 18,7%, что больше запланированного. Однако повышение степени привлекательности проекта позволяет принять решение о продолжении проекта с откорректированными данными (см. рис.12).

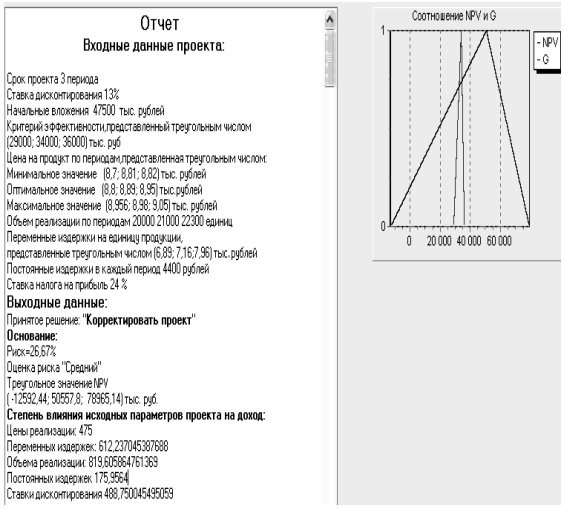



Рисунок 11 – Отчёт в контрольной точке 1

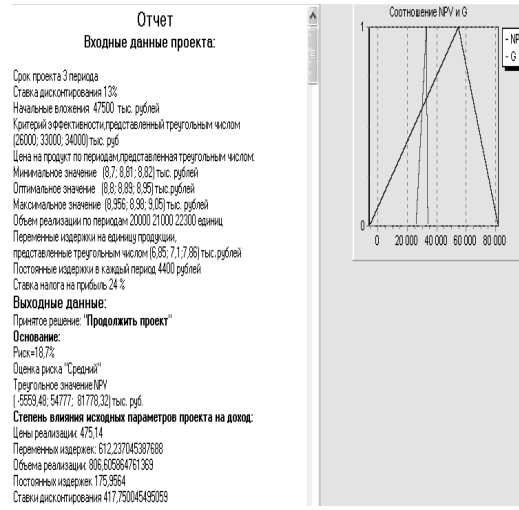



Рисунок 12 – Отчёт в контрольной точке 1 с откорректированными данными

## Заключение

Основная цель работы – создание информационной системы управления инвестиционными проектами – достигнута. Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- Определён тип инновационного поведения предприятия – виолент.
- Исследован характер вероятности экспертной оценки, базирующейся на теории нечётких множеств.
- Определены контрольные точки проекта, позволяющие отслеживать результаты промежуточных этапов и своевременно обнаруживать отклонения.
- Создан нечёткий регулятор принятия решения на основе нечёткой базы знаний.
- Проведён имитационный анализ инвестиционного проекта с учётом неопределённости, обусловленной нестабильной экономической ситуацией.

## Список литературы

[1] Горемыкина Г.И., Пономарёва М.А. К вопросу о применении имитационного моделирования в управлении бизнес-процессами в условиях нестабильной экономической ситуации // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XI международной конференции (22-24 июня 2009 г., Самара, Россия). – Самара: Самарский НЦ РАН, 2009. – С. 503-508.

[2] Горемыкина Г.И., Пономарёва М.А. К вопросу о прогнозировании количественных параметров сложных систем при использовании нечёткой информации. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XII международной конференции (21-23 июня 2010 г., Самара, Россия). – Самара: Самарский НЦ РАН, 2010. – С. 599-605.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОГРАММНОМУ ПРОДУКТУ

**В.Е. Гвоздев, Н.И. Ровнейко**

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия
office@ugatu.su
тел: +7 (347) 272-63-07, факс: +7 (347) 272-29-18

***Ключевые слова:*** *качество программного продукта, программный проект, управление требованиями, оценка времени реализации требования, вероятностное моделирование*

**Abstract**

The article considers the solution to the problem of estimation of realizability requirements for a software system. The study results help to quantify the feasibility of the requirements at any time. The practical value of research lies in the possibility of using the developed approach for the construction of an indirect assessment of the feasibility of requirements specifications - time implementation of the requirements. Also, the proposed approach allows us to fully develop a formal procedure for evaluating the feasibility of the requirements, including their entirety. Time implementation of the requirements, feasibility requirements, expert evaluation, probabilistic modeling.

## Введение

В [1] отмечается, что изучение потребностей, желаний и требований заказчика, а также управление коммуникациями относятся к стержневым процессам бизнеса. В литературе, посвященной вопросам управления качеством программных продуктов и программных проектов, подчеркивается важность построения эффективной системы управления требованиями к программному продукту. Анализ литературных источников [1, 2] позволяет утверждать, что ошибки, допущенные при формировании требований к программному продукту, влекут за собою тяжелые последствия, вплоть до провала проекта. В [3] подчеркивается, что слабая подготовленность специалистов в вопросах выявления потребностей и требований заказчиков, является, возможно, основной причиной выпуска продуктов, свойства которых в недостаточной степени удовлетворяют ожиданиям заказчиков и пользователей.

В [2] отмечается, что ещё достаточно широко распространен взгляд на разработку комплексов программ только как на создание идей и методов управления без учета необходимости регламентирования самого процесса проектирования и изготовления программных систем. Рост сложности программных продуктов, повышение требований к их качеству, необходимость создания программных систем в ограниченные сроки, вынуждает разрабатывать эффективные системы управления программными проектами, что, в том числе, требует разработки методологических, методических, модельных, инструментальных, информационных основ управляемого формирования качественных требований.

Управление формированием 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 формированием требований имеет три составляющие: управление правообладателями; управление

извлечением требований; управление представлением требований к программному продукту [4, 5].

В [6] 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 [7] коммуникация не отождествляется с более узким понятием связи или передачи сообщений. Назначение коммуникации состоит в формировании компромиссного решения, приемлемого для всех правообладателей на основе обмена мнениями и обсуждения разных точек зрения на программный продукт.

В настоящей работе рассматривается одна из задач управления формированием требований – построение структурных и имитационных моделей процессов формирования требований к программному продукту на разных стадиях его жизненного цикла.

## 1 Особенности формирования требований к программному продукту на разных стадиях жизненного цикла

Подходы к управлению формированием требований следует увязывать с неопределенностью, соответствующей разным этапам жизненного цикла программного продукта. В литературе [8, 9] приводится модель, именуемая «конусом неопределенности», которая представлена на рисунке 1. Эта модель подчеркивает то обстоятельство, что в течение жизненного цикла программного продукта изначально высокая неопределенность относительно его свойств (стадия определение программного продукта) уменьшается до нуля (стадия представления программного продукта в виде совокупность кодов). Разное число участников программного проекта на различных стадиях жизненного цикла программного продукта является одним из проявлений изменения неопределенности во времени.

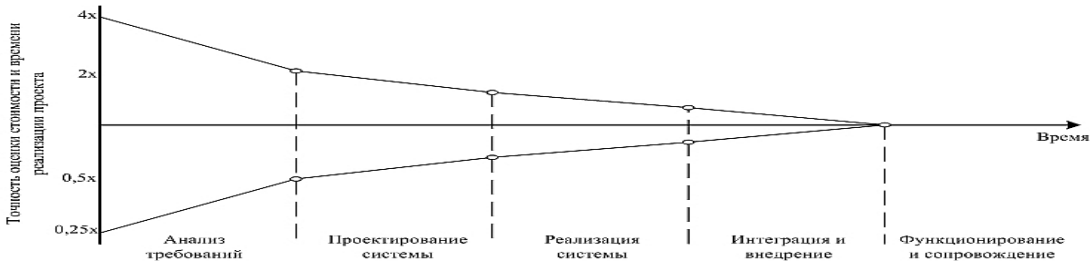



Рисунок 1 – Конус неопределенности программного продукта

Разная степень неопределенности приводит к тому, что на разных стадиях жизненного цикла программного продукта нужно использовать разные подходы к формированию требований и разные формы их представлений, которые проиллюстрированы на рисунке 2, постепенно переходя от более абстрактных форм (стадия определение программного продукта) ко все более конкретным (стадия представления программного продукта в виде совокупность кодов).

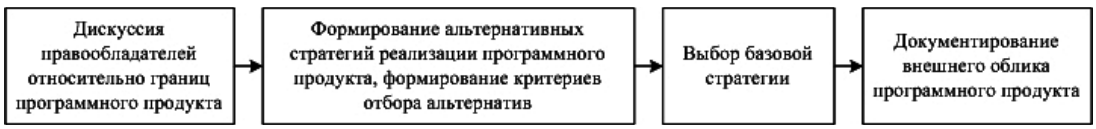



Рисунок 2 – Эволюция требований к программному продукту

Формирование требований есть начальный этап преобразования слабоформализованных представлений отдельных правообладателей («открытых» моделей) в программно реализованные алгоритмы (в литературе такие модели называют «закрытыми» [6]). Подчеркивание того, что формирование требований является только начальным этапом построения формальных моделей, обусловлено следующим. Во-первых, формирование «хороших» требований является итерационной процедурой [10, 11]. Во-вторых, спецификации требований в силу целого ряда причин являются вербальными и графическими моделями [12], причем содержание некоторых её компонентов по причине наличия у каждого из правообладателей своей, персональной онтологии, неодинаково понимается разными правообладателями. Управляемое формирование же на основе спецификации в дальнейшем все более формальных моделей, с разных сторон характеризующих фазы жизненного цикла программного продукта, является последовательным процессом поэтапного формирования закрытых моделей.

Снижение неопределенности, в контексте управляемого формирования требований к программному продукту, осуществляется разными способами, например:

1) Использованием шаблонов для представления требований [5];
2) Систематизацией полезных практик формирования, верификации и валидации требований [13, 15];
3) Выделением разных типовых моделей жизненного цикла программного продукта [12];
4) Структурным моделированием внешних бизнес-процессов, протекающих в объекте управления [14, 15] и внутренних процессов, связанных с реализацией программных проектов [15];
5) Моделированием сценариев [12] и другими способами, в том числе структурным и математическим моделированием.

Использование различных по степени формализации моделей способствует построению рационального варианта производных требований с учетом требований к функциональности и ограничений на характеристики качества, определенные в требованиях предыдущего уровня иерархии.

Можно утверждать, что спецификации программных и информационных компонентов являются уже моделями в замкнутой форме, так как обладают свойством воспроизводимости. Это означает, что если выдать одну и ту же спецификацию на программную/информационную компоненту двум разным разработчикам, то получатся продукты, обладающие одними и теми же функциональными и операционными характеристиками (независимо от особенностей их внутренней реализации). Конечно, предполагается, что спецификации на компоненты являются «хорошими», а разработчики достаточно квалифицированными. Свойство воспроизводимости, с точки зрения управляемого формирования требований, является признаком модели «в замкнутой форме».

## 2 Имитационное моделирование процесса формирования требований

Можно утверждать, что время выполнения работ, связанных с реализацией проекта, является интегральной характеристикой уникального сочетания свойств внешней и внутренней сред проекта, в которых реализуется программный продукт.

Сложный характер процессов, протекающих во внешней и внутренней средах проекта, ограниченные возможности исследования формирующих их механизмов, позволяет утверждать, что построение математических моделей проекта целесообразно выполнять на основе концепции «черного ящика». Это, в свою очередь, подводит к мысли о возможности использования математико-статистических методов как инструмента моделирования программных проектов. В [8] приводятся примеры использования математико-статистических методов для решения разных задач, связанных с реализацией программных продуктов. Вместе с тем такое свойство любого проекта как уникальность является серьезным методологическим препятст-

вием на пути использования математико-статистических методов как инструмента моделирования программных проектов.

В работе [16] подчеркивается возможность построения сложной (другими словами – уникальной) системы на базе типовых элементов. Отсюда следует, что модель процесса формирования требований может быть представлена в виде системы математико-статистических моделей, соответствующих разным компонентам фазы.

Одной из ключевых проблем управления программными проектами является сложность получения измерительных данных о ходе проекта [8, 12, 15]. В силу этого (особенно на начальном этапе проекта) в качестве возможного подхода к моделированию процесса формирования требований следует рассматривать экспертно-статистический подход (термин заимствован из [17]). Если рассматривать процесс формирования требований как совокупность взаимосвязанных компонентов, которые представлены на рисунке 3, то квалифицированный эксперт сможет оценить, например, в каком временном интервале предполагается завершить дискуссию относительно границ программного продукта при разных способах организации процедуры проведения обсуждения. Различные процедуры проведения обсуждения описаны, например, в [5, 8, 9, 12, 15].

Рисунок 3 – Логическая структурная схема процесса формирования системных требований

В [18] описаны четыре типовых подхода к оцениванию экспертами времени выполнения работ. Каждому из типовых подходов ставится закон распределения времени выполнения работы. Представление процесса формирования требований в виде последовательно соединенных компонентов позволяет рассматривать случайное время завершения проекта в виде

$$(1) \quad T = \sum_{i=1}^{m} \tau_i ,$$

где $\tau_i$ – случайное время завершения *i*-го компонента процесса формирования требований. Если закон распределения $F_i(t)$ *i*-го компонента процесса известен, то (1) можно преобразовать к виду

$$(2) \quad T = \sum_{i=1}^{m} (F_i^{-1}(t)) ,$$

где $\tau_i = F_i^{-1}(t)$ – случайное время реализации *i*-й компоненты процесса.

Выделение законов распределения разных компонентов процесса формирования требований, а также оценка общего времени формирования требований в виде (1), делает возможным оценить закон распределения времени завершения формирования требований методов имитационного моделирования. Для этого *N* раз формируются реализации случайного времени $\tau_i^j$, где *j* – номер реализации случайного процесса (*j*=1, 2, …, *N*), по значениям которых посредством (2) формируется выборка $\{T_1, T_2, \ldots, T_N\}$. На основе выборки строится оценка закона распределения $\hat{F}(t)$. Построение $\hat{F}(t)$ для разных процедур согласования требований делает возможным решение задачи сравнительного анализа альтернативных вариантов процедур формирования требований по критерию неопределенности.

Предположим, имеется $K$ альтернативных процедур формирования требований (интервьюирование, *JAD*, *CORE*, *VOID* и т.д.). Оценка времени реализации $i$-го компонента ($i$=1,2,…,$m$) в рамках $k$-го варианта ($k$=1,2,…,$K$) формирования требований имеет смысл стохастической оценки. В таблице 1 приведены типовые формы законов распределения времени выполнения работы, соответствующие разным оценкам эксперта

Таблица 1 – Типовые формы законов распределения времени выполнения работы

| Форма оценки | Тип закона распределения непрерывной случайной величины |
|---|---|
| Известны нижняя и верхняя границы времени выполнения работы $[0,b]$ | Равномерный закон распределения, $f(t)=1/b$ |
| Известно ожидаемое время выполнения работы, M(t), где t $\in [0,\infty)$ | Показательный закон распределения, $f(t)=\lambda e^{-\lambda t}$ |
| Известно ожидаемое время выполнения работы $M(t)$, а также нижняя и верхняя границы времени выполнения работы $[0,b]$, ($M(t) \in [0,b]$) | $f(t)=exp(\mu_0+\mu_1 t)$, где параметры $\mu_0$, $\mu_1$ находятся в результате решения системы уравнений $\begin{cases} \int_0^b \exp(\mu_0 + \mu_1 t)dt = 1, \\ \int_0^b t\exp(\mu_0 + \mu_1 t)dt = M(t). \end{cases}$ |
| Известно ожидаемое время выполнения работы M(t), а также нижняя и верхняя границы времени выполнения работы [0,b], (M(t) $\in$ [0,b]), а также то, что по мере удаления от M(t) к границам интервала вероятность уменьшается. | Треугольное распределение, $f(t) = \begin{cases} \frac{2t}{\text{bM(t)}} \text{ при } 0 \le t \le M(t); \\ \frac{2b}{\text{b(b - M(t))}} \text{ при M(t)} < t \le b. \end{cases}$ |

Установление соответствия между разными оценками эксперта и типами законов распределения времени выполнения работы, позволяет генерировать выборки $\{T\}$ требуемого объема $N$, по которым строятся оценки законов распределения времени завершения процесса $\hat{F}^{(k)}(t)$. Оценки $\hat{F}^{(k)}(t)$, в свою очередь, позволяют получить интегральную характеристику $k$-й альтернативы (представленную в виде меры неопределенности) в виде

$$(3)\quad S_k = -\int_0^{\overset{*}{b}} \frac{dF^{(k)}(t)}{dt} \ln\left(\frac{dF^{(k)}(t)}{dt}\right)dt .$$

Здесь $\overset{*}{b}$ – область фактически возможных значений случайной величины $T$.

В качестве $\overset{*}{b}$ может использоваться оценка вида $\overset{*}{b} = 6\sigma$, где σ определятся по известным правилам через $\hat{F}^{(k)}(t)$.

Целесообразность использование меры неопределенности в качестве основы при ранжировании альтернатив обосновывается тем, что эта мера непосредственно связана с такой системной моделью программного продукта как «конус неопределенности». Использование

оценки (3) делает возможным ранжирование альтернативных вариантов формирования требований.

**Заключение**

Таким образом, предлагаемый подход, основанный на представлении процессов в виде последовательных компонент, каждой из которых ставится в соответствие типовой закон распределения времени выполнения, позволяет ранжировать альтернативные варианты выполнения работ. Предлагаемый подход является достаточно универсальным и может быть использован при сопоставлении вариантов реализации других, помимо формирования требований, работ на ранних стадиях планирования.

Ограниченностью предполагаемого подхода является его однокритериальность. Многокритериальность оценки альтернативных вариантов формирования требований, неполнота информации на этапе принятия решений о ценностных установках правообладателей, их фактической приближенностью к проекту и возможностях влияния на него, обуславливает необходимость применения эвристических методов обоснования решений.

Работа выполнена в рамках работ, поддержанных грантом РФФИ 10-08-00359-а.

**Список литературы**

[1] Котлер Ф. Маркетинг менеджмент. Экспресс-курс. 2-е изд./Пер. с англ. под ред. С.Г.Божук. – СПб.: Питер, 2006. – 464 с.
[2] Липаев В.В. Анализ и сокращение рисков проектов сложных программных средств. – М.: СИНТЕГ, 2005. – 224с.
[3] Милошевич Д. Набор инструментов для управления проектами – М.: Компания АйТи: ДМК Пресс,2008.- 729с.
[4] IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications IEEE STD 830-1998, June 1998.
[5] Халл Э., Джексон К., Дик Д. Разработка и управление требованиями / пер. с англ. И. Корнипаева Telelogic, 2005.
[6] Виттих В.А. Организация сложных систем //Самара: Самарский научный центр РАН, 2010. – 66с.
[7] Виттих В.А. Парадигма ограниченной рациональности принятия решений: препринт. – Самара: Учреждение Российской академии наук «Институт проблем управления сложными системами РАН», 2009. – 28 с.
[8] Макконнелл С. Сколько стоит программный проект. – СПб.: Питер, 2007. – 297с.
[9] Беркун С. Искусство управления IT-проектами. – СПб.: Питер, 2007. – 400 с.
[10] Йордан Э. Путь камикадзе. Как разработчику программного обеспечения выжить в безнадежном проекте. М.: ЛОРИ, 2000. – 255с.
[11] System Engineering for Intelligent Transportation Systems/ An introduction for Transportation Professionals. January 2007, 109 p.
[12] Мацяшек Л.А. Анализ требований и проектирование систем. Разработка информационных систем с использованием UML. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2002. - 432 с.
[13] IEEE Guide to the Software Engineering Body of Knowledge - SWEBOK, 2004.
[14] Тельнов Ю.Ф. Реинжениринг бизнес-процессов. Компонентная методология. 2-е изд., перераб и доп.. М.: Финансы и статитстика, 2005. – 320с.
[15] Michael G. Christel. Kyo C. Kang. Issues in Requirements Elicitation. Technical Report CMU/SEI – 92-TR-012 ESC-TR-92-012, September 1992.
[16] Емельянов А. И. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 399с.
[17] С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных – М.: Финансы и статистика, 1983. - 471с.
[18] Гвоздев В.Е., Ровнейко Н.И. Научный журнал Уфимского авиационного технического университета «Вестник УГАТУ», в печати, 2012.

# МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ БАЗИС ФОРМИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ФРАКТАЛЬНО РАЗВИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМ АДМИНИСТРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

**И.А. Степановская**

Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65, Россия
av245573@comtv.ru, irstepan@ipu.ru
тел: +7 (495) 334-91-69

***Ключевые слова**: управление развитием, межведомственное управление, фрактальное моделирование, региональная информатизация*

**Abstract**

It is considered the methodology and tool for forming of regional information systems for fractal inter-agency management. The technique of the preparation stage implementation and the main requirements to formalization of this problem are defined.

## Введение

С учетом директив Государственной программы Российской Федерации «Информационное общество (2011–2020 годы)» важнейшим направлением развития региональной информатизации становится переход на перспективные принципы электронного государственного межведомственного управления (ЭГМУ). В этой связи встает проблема перевода региональных систем межведомственного взаимодействия (сбора статистики, аналитического мониторинга, распорядительно-отчетного электронного документооборота и др.) со статуса «автономных» на статус «встроенных» в контур ЭГМУ. поставляющих информацию на отраслевой, федеральный и др. уровни управления.

На современном этапе развития коммутационных технологий организация межведомственного взаимодействия в рамках ЭГМУ базируется на портальных платформах. Ставшая уже классической архитектура портала ЭГМУ представляет собой систему ведомственных сайтов, взаимодействующих между собой на основе сервисов электронного web-документооборота, управления проектами, а также интерактивных средств (почта, поиск, новости, форумы, обсуждения, голосования и т.д.). Общепризнанный недостаток такой архитектуры составляет независимость средств подготовки важнейших информационных документов (распорядительной документации, статистики, аналитических и отчетных материалов и др.), порождающая разночтения и невозможность их непосредственного включения в единый контур автоматизированной обработки.

В связи с этим проблему интеграции и включения региональных систем информатизации в систему ЭГМУ необходимо решать совместно с разработкой технологии корпоративного управления контентом (содержанием) ведомственных сайтов разной административно-территориальной принадлежности, обеспечивающего удовлетворение следующим требованиям:

- интероперабельность (однозначная семантическая трактовка) информационных ресурсов, выставляемых на ведомственных сайтах, их логическая полнота, синхронизация, способность к использованию в едином контуре автоматизированной обработки и др.;

- единая система администрирования информационных ресурсов ведомственных сайтов, обеспечивающая синхронизацию обновления данных, навигацию и поиск информации по всем ресурсам всех сайтов, авторизацию клиентов и др.;
- корпоративная система инструментальных систем поддержки принятия решений, включая сервисы мониторинга контролируемых процессов, моделирования и прогнозирования состояния управляемых объектов;
- клиент-ориентированная архитектура ведомственных сайтов, рассчитанная на ограниченную доступность и поддержку конфиденциальности и информационной безопасности ведомственных сайтов;
- поддержка процессов интеграции систем региональной информатизации с системами информатизации других уровней (муниципальных, зональных, межрегиональных, федеральных и др.).

Онтологическое моделирование предметной области, обычно применяемое для обеспечения интероперабельности**,** в системах ЭГМУ, отличающихся повышенной сложностью объектов и систем управления, становится трудным, а зачастую и невозможным. Подходы к преодолению этой проблемы, которые наиболее легко воспринимаются и реализуются в перспективных системах ЭГМУ, явно или неявно ориентируются на фрактальное свойство масштабного самоподобия и инвариантности систем представления и обработки информации. Примерами могут служить единые системы страхования, налогообложения, пенсионного обеспечения, управления в экстремальных условиях и др., информационная инфраструктура которых построена в виде иерархически вложенных самоподобных структур федерального, регионального, муниципального и др. уровня.

Фрактальный подход к организации ЭГМУ, основанный на стандартах и унификации информационной инфраструктуры управления, обеспечивает наиболее простой способ интеграции региональных систем между собой, а также с системами муниципального, межрегионального и федерального уровней. Однако широкому внедрению фрактального подхода к информатизации государственного управления препятствует отсутствие достаточно проработанных средств методологической и инструментальной поддержки. Для решения этой проблемы в данной работе предлагается концепция фрактальной архитектуры ЭГМУ, основанной на принципах самоподобия и самоорганизации информационной инфраструктуры.

## 1 Фрактальная теоретико-множественная модель масштабного роста

Полноценное управление развивающимися системами требует адекватной формализации понятий «масштаб» и «масштабный рост» применительно к управляемым объектам, системам управления, целям и задачам проектов, т.е. к элементам, традиционно характеризующимся неоднородными показателями и пониманием содержания и сути «развития». Универсальным подходом к решению этой проблемы служит предлагаемая далее система абстрактных теоретико-множественных моделей.

***Фрактальным множеством (фракталом)*** назовем развивающееся полимасштабируемое множество элементов **z**, т.е. имеющее представление на разных уровнях масштабного развития $\mathbf{z}(t)$, $t \in \boldsymbol{N}$ ($\boldsymbol{N}$ - натуральный ряд), обладающее свойствами самоподобия, самоорганизации, репродукции и целостности.

Свойство ***самоподобия*** (масштабной инвариантности) означает, что для оценки изменений свойств фрактала, происходящих по мере его масштабного роста, существует унифицированный показатель **I**, применимый как к каждому элементу, так и к произвольному подмножеству элементов независимо от масштаба.

Свойство ***самоорганизации*** означает, что этапы масштабного развития связаны с процессом индивидуального или корпоративного воспроизведения элементов в других масшта-

бах (больших или меньших, в частности во все уменьшающемся или увеличивающемся масштабе).

Свойство ***репродукции*** означает, что процесс воспроизведения сопровождается формированием между разномасштабными множествами элементов (элементами) связей типа «репродуцирующее множество - репродуцированное множество» (предшественники - последователи).

Свойство ***целостность*** означает, что фрактал на произвольном этапе масштабного развития может рассматриваться как единое целое, характеризующееся интегрированной (неаддитивной) оценкой его свойств, раскрывающих потенциал текущего масштаба.

Фрактальное множество допускает различные образцы формальной спецификации, предназначенные для моделирования, оценки и анализа качественных и количественных параметров, характеризующих как сам процесс масштабного роста, так и соответствующую динамику интегрированной оценки.

Назовем ***структурой масштабного роста фрактала*** спецификацию связи между элементами разных масштабов и поколений (предшественниками и последователями). К числу простейших образцов масштабного роста и проявления фрактала, характеризующихся однородной схемой связи поколений, не зависимой от поколения, относятся иерархический, стволовидный, ризомный и итеративный (рисунок 1).

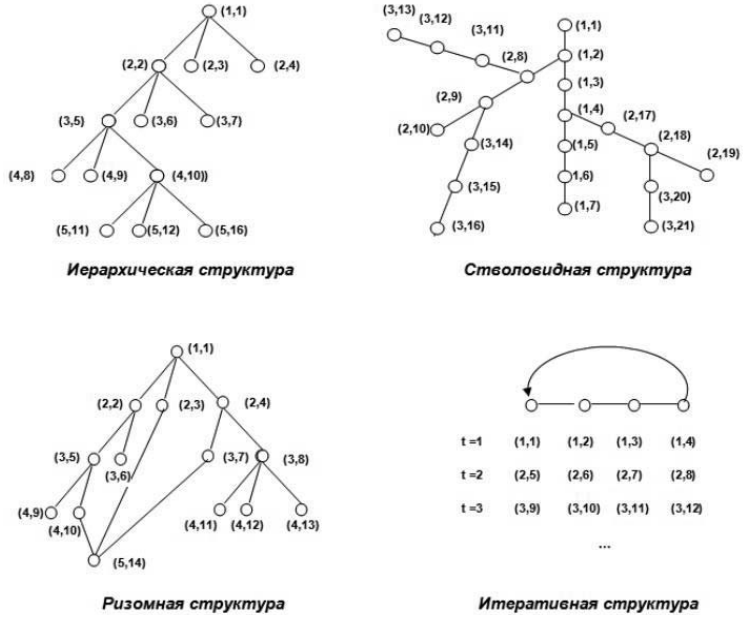



Рисунок 1 – Примеры образцов структур масштабного роста фрактала

В рассматриваемых образцах фрактальных структур для элементов нового масштаба (поколения) предусматривается присвоение ранга (номера поколения) и номера элемента, т.е. каждый элемент фрактальной структуры $\Omega$ оказывается помеченным парой $(i,k)$, где $i$ – ранг, $k$ – номер. Введем также следующие обозначения: $\Delta(i,k)$ - множество потомков элемента с меткой $(i,k)$, $R(A)$ – число элементов произвольного множества $A$.

Все фрактальные структуры (кроме итеративной) представляют собой однонаправленные графы без циклов (направление указывает связь от предшественника к последователю). Среди принципиальных отличий фрактальных структур выделим два, касающихся структуры наследования. принципиальных отличий фрактальных структур выделим два, касающихся структу-

ры наследования. Первое отличие связано с допустимым числом «предшественников». Иерархическая и стволовидная структуры допускают только одного «предшественника», в отличие от них ризомная структура допускает множественное наследование. Второе отличие связано со структурой множества $\Delta(i,k)$ последователей. В иерархической и ризомной структуре $\Delta(i,k)$ представляет собой множество несвязанных между собой элементов. В стволовидной структуре множество последователей $\Delta(i,k)$ представляет собой «ствол», т.е. линейно упорядоченное множество элементов одного поколения.

Масштабный рост образца итеративной структуры заключается в циклическом воспроизведении множества элементов $S$ во все увеличивающееся (уменьшающемся) масштабе: $S(t+1)=P[S(t)]$.

С учетом сделанных замечаний, все рассматриваемые образцы фрактальных структур допускают следующее индуктивное определение.

1) $(1,1)$ – метка начального элемента, $Q(\Omega) = 1$ .
2) Элементы множества потомков $\Delta(i,k)$ элемента с меткой $(i,k)$ получают метки:
   $(i+1, N+1)$ ; $(i+1, N+2)$;… $(i+1, N+M)$,
   общее число элементов фрактальной структуры становится равным $Q(\Omega) = N+M$,
   где $N= R(\Omega)$, $M=R(\Delta(i,k))$.

Пусть $Vi$ $(i=1,n)$ – фрактальные структуры, определяющие направления масштабного роста системы, оцениваемого показателем $I$. Их декартово произведение $xVi$ определяет $n$-мерное пространство, элементы которого разномасштабны и индексируются $n$-ками вида $(x_1,x_2,…,x_n)$, $i$-ая компонента которых задает поколение i-го направления масштабного роста (рисунок 2).

Рисунок 2 – Многомерное пространство масштабного роста

Отметим, что в общем случае многомерное пространство масштабного роста может быть образовано направлениями $V_{i,k}$ $(i=1,n,\ k=1,L_j)$ масштабного роста множества фракталов $F_i$ $(i=1,n)$.

Множество элементов этого пространства, оцениваемых некоторым показателем $I$, само является фракталом. По построению данное множество обладает свойствами самоподобия (унифицированность оценки **I**), самоорганизации (воспроизведение задач в разных масштабах), репродукции (потенциальная способность формировать поколения задач управления) и целостности (потенциальная возможность на основе использовать характеристику $I$ для интегрированной оценки каждого из поколений элементов).

Специфика структуры многомерного масштабного роста этого множества может быть определена через понятие образцов ***кратномасштабного роста.***

Визуально такие образцы представляются совокупностями «параллельных» разрезов многомерного пространства, декомпозирующих управляющий процесс по поколениям масштабного роста задач управления. Среди кратномасштабных образцов выделим наиболее наглядные многонаправленные и однонаправленные (рисунок 3).

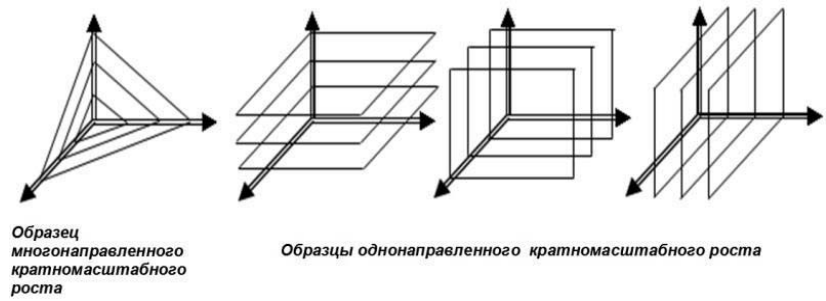



Рисунок 3 – Образцы кратномасштабного роста

Образцом многонаправленного кратномасштабного роста назовем последовательность поколений элементов $Z_j$ $(j=1,m)$, индексы которых связаны отношением подобия

$x_i\ (j+1)=P[x_i\ (j)]$.

Образцом однонаправленного по $i$-ому направлению кратномасштабного роста назовем последовательность поколений элементов $Z_j$ $(j=1,m)$, индексы которых $(x_1,x_2,\ldots,x_n)$ удовлетворяют условию $x_i=j$.

Образцы многонаправленного роста обеспечивают целостный охват всех направлений развития на каждом этапе масштабного роста и соответствуют итеративной схеме многофазного развития (рисунок 4).

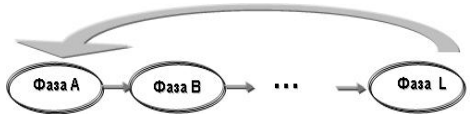



Рисунок 4 – Образец итеративного кратномасштабного роста

При использовании многомерных пространств масштабного роста для моделирования процессов многонаправленного масштабного роста одного или нескольких фракталов следует учитывать синергетические эффекты между разными направлениями, в том числе на уровне их темпоральных характеристик, включая ритмичность, интенсивность, направленность и др. Поэтому при построении образцов кратномасштабного роста необходимо использование матрицы синергетической зависимости, представляемой ризомной структурой данных, позволяющей формировать группировки элементов множества всевозможных направлений развития масштабного роста по трем категориям образцов $\{X, Y, R\}$, представляющих соответственно множество управляемых $\{X_i,\ i=1,n_X\}$, управляющих $\{Y_i,\ j=1,n_Y\}$ и индикативных (рассматриваемых в качестве показателей результативности управления развитием) $\{R_i,\ k=1,n_R\}$ направлений. Функциональную систему вида $X\ x\ Y => R$ назовем ***фрактальной моделью управления развитием.***

## 2 Концепция фрактальной архитектуры ЭГМУ

Основную область внедрения фрактальной модели управления развитием составляют распределенные технологии ЭГМУ развитием полимасштабных экономических, производственных, энергетических, транспортных, технических и других территориально распределенных систем (ТРС) разной организационной и ведомственной принадлежности. Для России, обладающей значительной территорией, к реализации таких технологий сложились следующие подходы:

- геоинформационный подход к формальному описанию в контуре ЭГМУ с помощью геоинформационного хранилища данных;

- интегрированный подход к контролю и анализу с учетом экологических факторов и связи с природно-ресурсной средой;
- полимасштабный подход к анализу и управлению на разных уровнях детализации и в разных предметных разрезах, реализуемый ЭГМУ федеративной структуры;
- программно-целевой подход к управлению (ПЦУ) финансированием процессов развития.

Эффективное межведомственное управление развитием ТРС порождает острую проблему реализации перечисленных подходов на единой методологической, информационной и технологической основе. Значительные перспективы к решению этой проблемы имеет разработка фрактальной архитектуры ЭГМУ.

Предлагаемая концепция фрактальной архитектуры ЭГМУ включает следующие принципиальные решения:

- использование формального толкования понятия «корпоративной управляемости развитием полимасштабных элементов» как темпоральной синхронизации процессов их роста и проявления во все больших масштабах по разным направлениям;
- систематическое фрактальное моделирование распределенной технологии ЭГМУ, отражающее проблемы масштабного соответствия между информационными и управляющими структурами, с одной стороны, и объектами и целями управления с другой;
- использование фрактальной модели масштабного роста как методологии онтологического моделирования и поддержки интероперабельности распределенной технологии ЭГМУ, оперирующей с разномасштабными инвариантными объектами, задачами, проектами, управляющими контурами и др. разной прикладной ориентации;
- разработка математического обеспечения программного сопровождения управления на основе стандартных методов анализа, оптимизации и обработки фрактально развивающихся структур как специализированного подкласса графов;
- разработка программного обеспечения распределенной технологии ЭГМУ в виде сервисно-ориентированных систем сопровождения саморазвивающихся информационных и управленческих структур.

Для формальной спецификации самоорганизующихся автоматизированных информационно-управляющих технологий предлагается использовать унифицированную структуру блока фрактальных моделей, представляющую фрактальный портал управления контентом ведомственных сайтов, настраиваемый на фрактальные мета-модели геоинформационных хранилищ, составляющих различные проблемно ориентированные разделы госфонда данных об управляемой ТРС.

Для демонстрации далее рассматриваются фрактальная спецификация технологии ПЦУ инновационным развитием производственных ТРС.

## 3 Фрактальный портал ЭГМУ

Фрактальный портал предназначен для автоматизированного управления контентом ведомственных сайтов ЭГМУ федеративной структуры за счет самоорганизации их информационной инфраструктуры.

Классическая федеративная структура межведомственного управления сочетает вертикаль ведомственной подчиненности с горизонтальными ветвями административного управления соответствующего уровня. Вертикаль управления включает уровни административно-территориального деления (федеративный, межрегиональный, региональный, муниципальный и другие), а также может дополняться промежуточными межрегиональные уровни, например, уровнями экономических зон, промышленных районов, экосистем и др.

Информационная инфраструктура фрактального портала включает следующие компоненты:

- иерархический фрактал, моделирующий множество ведомственных сайтов *D= (d1,d2,…,dn)* федеративной структуры, каждый из которых является источником частной и потребителем корпоративной информации;
- стволовидный фрактал, моделирующий структуру управляемой ТРС;
- фрактальную метамодель геоинформационного хранилища данных *G* об управляемой ТРС, получающего информацию от сайтов нижнего уровня и осуществляющего автоматическую интеграцию, многоуровневое обобщение, обработку и рассылку по сайтам корпоративной информации соответствующего уровня.

В рамках фрактального портала ЭГМУ федеративную структуру информационных потоков целесообразно реализовать с помощью универсальной портальной web-технологии, функционально ориентированной на регулярный регламентный сбор, интеграцию, автоматическое многоуровневое обобщение, загрузку в геоинформационное хранилище, самоорганизацию представления его содержимого на ведомственных сайтах разных уровней.

К числу базовых сервисов фрактального портала относятся web-интеграторы, web-информаторы и web-навигаторы.

В рамках федеративной управленческой структуры web-интегратор используется на каждом уровне вертикали управления в интересах сбора данных от источников информации нижнего уровня; web-информатор – для интерпретации данных в интересах заинтересованных ведомств одного уровня управления; web-навигатор, используемый для поддержки экспертно-аналитического процесса.

***Web-интеграторы*** предназначены для приема и интеграции оперативной информации, поступающей от удаленных источников в любое время суток. Для ввода информации используется система электронных бланков (документов, сообщений и т.п.), предоставляемая источникам для заполнения.

На web-интеграторы могут быть возложены следующие функции:

- многопользовательский интерфейс с удаленными клиентами;
- центр приема данных с автоматических измерительных постов наблюдения;
- формирование web-картографических ресурсов,
- сбор данных в интересах консолидированного мониторинга.

Главная задача web-интегратора заключается в пополнении геоинформационного хранилища данных, поддерживающего форматную "соизмеримость"·разнотипных потоков данных. Под соизмеримостью понимается единый масштаб времени, привязка объектов к единой системе географических координат, единая терминология, готовность к совместной статистической обработке и графическому представлению.

Преимущество web-интегратора как сервиса формирования хранилища состоит в следующем:

- повышение достоверности данных и персональной ответственности;
- автоматизация сбора межведомственной информации;
- поддержка тематической настройки входных потоков данных под информационные потребности методологии поддержки принятия решений, например, *SWOT*-анализа *(strengths (силы), weaknesses (слабости), opportunities (возможности), threats (угрозы)), осуществляющего* диагностику проблемной ситуации с позиций сильных и слабых сторон, а также возможностей и угроз со стороны внешней среды.

***Web-информаторы*** предназначены для обработки реального времени данных хранилищ, пополняемых web-интегратором, и конфигурирования информационных ресурсов в интересах информатизации ведомственных сайтов, составляющих управленческую структуру ЭГМУ.

***Web-навигаторы*** составляют инструментарий web-информаторов и представляют собой класс поисковых интернет-сервисов, включающих модуль поиска (поисковый робот) и управ-

ляющий интерфейсный модуль, задающий поисковое пространство интернет-ресурсов и множество ключевых слов (называемых стоп-словами)

Фрактальный портал характеризуется принципиально новыми отличительными показателями качества межведомственных информационных систем, включая такие как:

- адаптируемость к изменению ведомственной структуры и предметной области управления;
- динамически развивающаяся модель хранилища;
- отсутствие ограничений на сложность информационной инфраструктуры (данные о программах, задачах, заказчиках, исполнителях, бюджетной модели и др.;
- хранилище данных нацелено не только на автоматизацию бизнес-процессов но и на содержательный анализ информации и предназначено для поддержки принятия решений;
- расширение функций электронного межведомственного документооборота в части автоматизированного формирования, маршрутизации и доставки документов, представляемых на ведомственных сайтах.

Фрактальный портал решает ряд принципиальных проблем, возникающих в контуре ЭГМУ федеративной структуры.

Это проблема чрезвычайной информационной насыщенности управления контентом ЭГМУ; проблема размерности (в данном случае это число сайтов, объединяемых в единую сеть); проблема поддержки портальной технологии как открытой развивающейся системы; проблема автоматизированной информатизации реального времени всех пользователей-руководителей высшего и среднего звена, аналитиков, представителей подразделений, связанных с организацией управления развитием ТРС.

## 4 Фрактальная модель бюджетного процесса ПЦУ

Масштабный рост ТРС имеет многоаспектную природу и многоэтапный характер, что определяет повышенную сложность эффективного планирования состава и последовательности реализации корпоративных проектов ПЦУ. В основе предлагаемого подхода лежит тезис о фрактальности множества проектов ПЦУ по управлению развитием ТРС, их разномасштабности и способности к масштабному росту по разным направлениям, включая цели, задачи, объекты развития и другие.

К фракталу проектов и проектных мероприятий ПЦУ применимы различные схемы кратномасштабного роста проектов по их сути и содержанию. Однонаправленные схемы могут формально представлять проекты по продвижению каких-либо иерархических групп проектных заданий. Итеративные схемы, задаваемые «квантом» равномерного роста по всем направлениям, адекватно представляют механизмы ПЦУ устойчивым развитием сложных систем, например, обеспечивающие последовательное структурное, гомеостатическое и функционально-поведенческое масштабное развитие (рисунок 5).

Рисунок 5 – Итеративная схема развития проектов ПЦУ

На рисунке 6 представлена обобщенная трехуровневая модель многомерного пространства масштабного роста бюджетного процесса для комплексных проектов, сгруппированных в

иерархические программы по разным направлениям и этапам масштабного роста проектов ПЦУ.

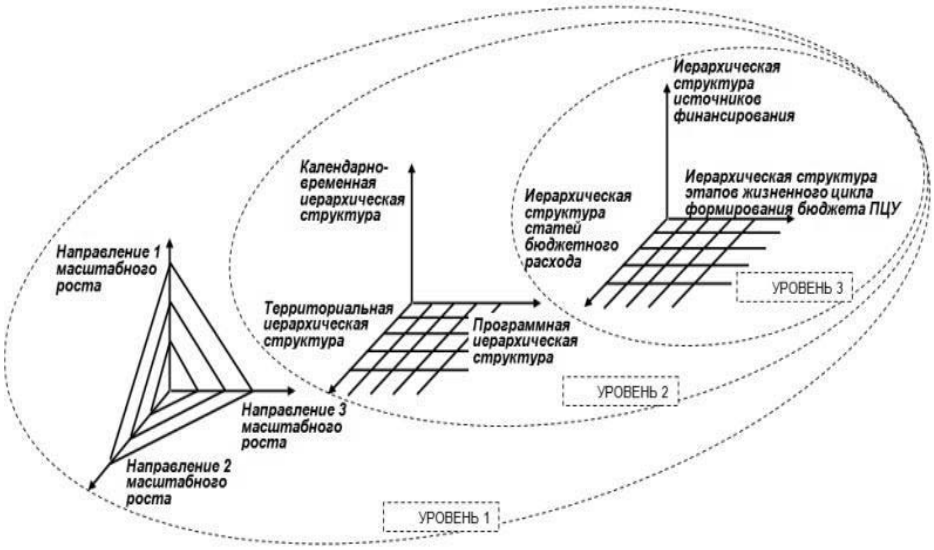



Рисунок 6 – Информационная инфраструктура бюджетного процесса ПЦУ

Данная информационная структура служит метамоделью развивающегося агрегативно-блочного «бюджетного» геоинформационного хранилища. Информационные возможности блока бюджетного хранилища, соответствующего данным уровня 2 и 3, инвариантного по отношению к масштабному уровню комплексного проекта, продемонстрированы на рисунке 7.

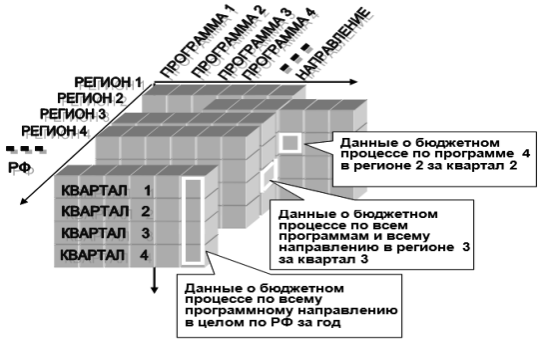



Рисунок 7 – Блок геоинформационного хранилища данных по бюджетному процессу

Фрактальный портал, настроенный на метамодель «бюджетного» геоинформационного хранилища, обеспечивает автоматизированные процессы планирования, контроля и оценки эффективности реализации корпоративного бюджета в долгосрочной перспективе.

К числу фундаментальных задач, решаемых на основе предложенной фрактальной модели бюджетного процесса ПЦУ, возникающих в контуре ЭГМУ, относятся следующие:

- единая классификация и структура описания проектов и программ;
- унифицированные процедуры инициации, планирования, контроля исполнения и завершения проектов и программ;
- типовая организационная структура управления проектами;
- единые методики, шаблоны документов, формы отчетности;

- единая информационная система описания и представления объектов, задач и целей развития, исполнителей и заказчиков проектов позволяющая избежать дублирования, перекодировки, ошибок и несанкционированных изменений данных.

## 5 Фрактальная модель комплексных проектов по инновационному развитию производственных ТРС

На рисунке 8 представлено многомерное пространство направлений масштабного роста инновационного развития производственных ТРС.

Рисунок 8 – Многомерное пространство направлений инновационного развития

Первое направление – развитие кластерной производственной системы**.** Кластерная модель учитывает, что в современных условиях эффективные инновации уже невозможны в рамках одной компании, они должны происходить уже вместе с поставщиками, с научными исследованиями, с предприятиями, оказывающими услуги по продаже. Кластерная экономика базируется не на затратной части, а на постоянном расширении моделей интегрируемости специализированных компаний в кластеры. Наибольшие перспективы в достижении конкурентных преимуществ инновационной продукции связаны с гибкой интеграцией интегрированных структур ОПК с гражданскими предприятиями и комплексами. Вместо кластеров жесткой структуры предусматриваются динамически устанавливаемые специфические межхозяйственные связи, корпоративные отношения, стратегические альянсы, государственно-частное партнерство и международная кооперация.

Кластерная производственная модель моделируется стволовидной структурой, проявляющейся на разных масштабных уровнях: отраслевом, федеральном, региональном. Системообразующую роль в развитии кластерной производственной системы играют региональные кластерные производственные структуры, учитывающие и отражающие лидирующие профили наукоемкого сектора экономики каждого региона.

Интеграция военной и гражданской производственной сферы создает оптимальные условия для инновационного менеджмента, основанного на развитии встраиваемых COTS (Commercial Off-The-Shelf – «готовые к использованию»)-образцов продукции и технологий двойного назначения, обладающих наибольшими возможностями для ускоренного выхода на мировые и отечественные рынки. В связи с этим ко второму и третьему направлениям развития отнесем соответственно развитие инновационной COTS-продукции и развитие ее рынка.

Четвертым непременным направлением инновационного развития кластерной производственной структуры должен стать переход на перспективные принципы экологизации производства, направленной на снижение антропогенной нагрузки и соблюдение разумного баланса между экономикой и экологией.

Перечисленные четыре направления относятся к числу управляемых процессов, т.е. требующих синхронизации масштабного роста (рисунок 9). Индикативным служит пятое направление развития финансово-экономического потенциала управляемых производственных

структур, являющийся следствием роста их производственно-сбытовых возможностей и рассматриваемый как индикатор качества управления развитием по первым четырем направлениям.

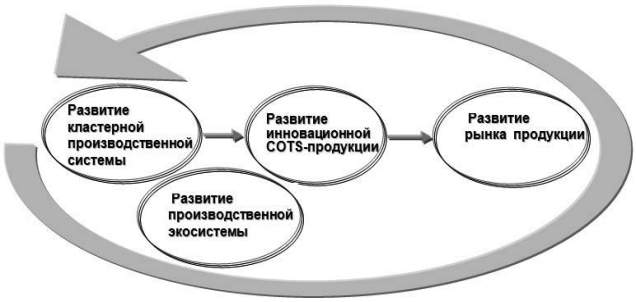



Рисунок 9 – Кратномасштабная модель инновационного развития

Данная модель инварианта по отношению к масштабному уровню инновационные системы (районные, муниципальные, региональные, межрегиональные, федеральные) могут быть реализованы по единой методике и одним и тем же программным сервисом, что существенно упрощает проектирование и сопровождение ЭГМУ.

К числу преимуществ предложенной фрактальной модели развития инновационной системы относятся четко выделенная организационно-технологическая политика формирования проектов ПЦУ в неопределенных условиях рыночной экономики. Такая политика заключается в «квантовом» характере процесса инновационного развития, нацеленном на наиболее быстрый результат, на снижение риска инвестиций, на возможность периодического пересмотра приоритетных целей инноваций в интересах технологического лидерства.

## 6 Фрактальный портал экомониторинга водных бассейнов

В области управления развитием систем экологической безопасности производственных зон большую значимость приобретает фрактальное моделирование и статистический анализ масштабного роста риска экологической безопасности. К основным направлениям его проявления относится масштабный рост таких разнородных показателей, как токсичность загрязнения (ризомная модель химического взаимодействия загрязняющих веществ), площадь и объем загрязнения водных и воздушных бассейнов, почвенного покрова и др. (стволовидный фрактал), а также антропогенного воздействия предприятий-загрязнителей (кратномасштабные модели масштабного роста). В сочетании с геоинформационным подходом фрактальный подход может стать гибким инструментом анализа данных экомониторинга. Пилотным демонстрационным образцом реализации данного подхода служит web-интегратор данных экомониторинга водных бассейнов регионального масштаба (рисунок 10), принимающий регулярные потоки документальных сводок следующих категорий:

- ежемесячные сводки по концентрациям загрязняющих веществ в контролируемых водных объектах (возможны также сводки с гидробиологическими данными), получаемые от автоматических измерительных постов и аналитических лабораторий;
- ежегодные сводки от водопользователей региона (с использованием в качестве первоисточника стандартной документальной формы 2ТП (Водхоз));
- ежегодные сводки от локальных администраций региона по реализации бюджета программно-целевого управления развитием водной экосистемы региона.

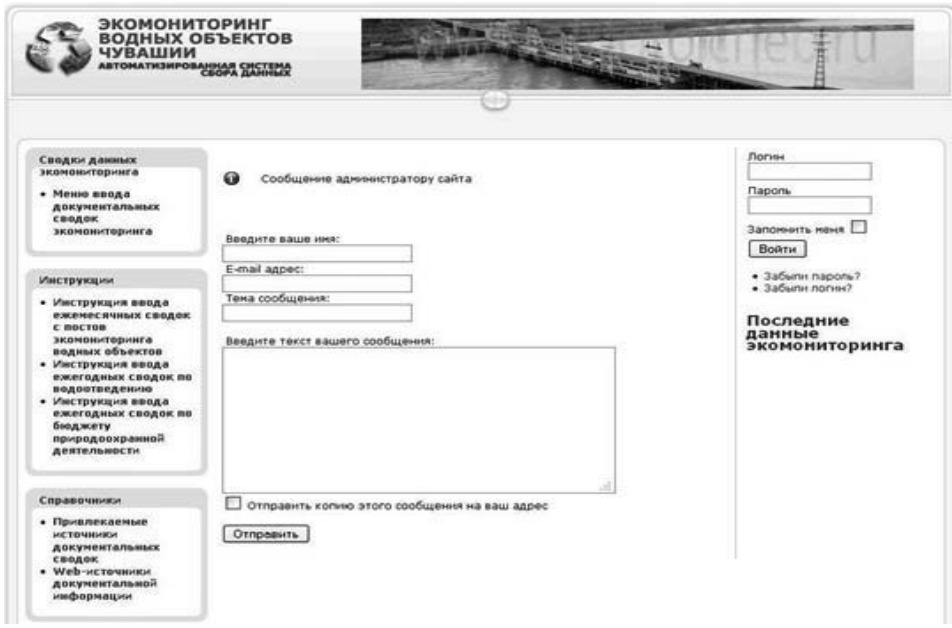



Рисунок 10 – Web-интегратор

На рисунке 11 представлен образец региональной портальной сети межведомственного управления экологической безопасностью, являющийся узлом сети управления бассейнового уровня.

Рисунок 11 – Сетевая структура электронного межведомственного управления экологической безопасностью водных объектов регионального уровня

Роль регионального web-информатора – формирование аналитических, статистических, картографических отчетов и экстренных сообщений в разных документальных форматах, соответствующих информационным потребностям природоохранных органов управления регионального уровня (внутренние пользователи), а также бассейнового управления и федеральных ведомств (внешние пользователи).

К числу управленческих задач, решаемых внутренними пользователями, относятся следующие:

- ситуационный анализ экологического состояния, выявление положительных или отрицательных тенденций, констатация наступления критических или чрезвычайных ситуаций, формирование пакетов документов для организаций, задействованных в процессах планирования и реализации ликвидации их последствий;
- анализ динамики антропогенной нагрузки предприятий региона и экологического состояния водных объектов в долгосрочной ретроспективе, проводимый региональными подразделениями Министерства природных ресурсов и экологии РФ и его ведомствами, занимающимися нормированием и правовым регулированием использования водных ресурсов;
- оценка хода финансирования, структуры бюджета и результативности программно-целевого управления природоохранными мероприятиями, осуществляемая органами административного управления.

Задача бассейновых управлений - интеграция данных, поступающих от соответствующей бассейну группы регионов, и подготовка документов следующих типов:

- статистика и характеристики чрезвычайных ситуаций в пределах водосборных бассейнов;
- сравнительная оценка эффективности политики экологизации экономики, проводимой разными регионами;
- экологический аудит проектов по размещению новых хозяйственных объектов (в пределах контролируемой территории);
- перспективное планирование согласованной межрегиональной политики программно-целевого управления природоохранной деятельностью.

Задачи федеральных ведомств - интеграция данных, поступающих от бассейновых управлений, для организации скоординированной водоохраной деятельностью на федеральном и международном уровне.

**Заключение**

Предложена концепция развивающейся фрактальной архитектуры ЭГМУ, представляющая стандартные самоподобные образцы информационной инфраструктуры, способные к масштабному росту, обеспечивающему их разномасштабную композицию в иерархические многоуровневые системы управления. Их использование применительно к задачам региональной информатизации позволяет проектировать проблемно-ориентированные системы государственного управления регионального уровня, способные к развитию и настройке на многомасштабную иерархическую структуру ЭГМУ с произвольным числом уровней, включая муниципальный, межрегиональный (зональный, отраслевой, бассейновый), федеральный, международный и др.

**Список литературы**

[1] Баренбойм Г.М., Степановская И.А., Авандеева О.П. «Современные тенденции научных исследований для развития систем мониторинга водных объектов» - Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции «Устойчивость водных объектов, водосборных и прибрежных территорий; риски их использования», Калининград, 25-30 июля 2011, Калининград, Капрос, 2011 с.25-34.

[2] 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// Информационно-аналитический журнал «Вооружение, политика, конверсия», 2(92), 2010, с.36-42.

# Strategic Management in Energetics
# Стратегическое управление в энергетике

# СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕМ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

**Н.В. Дилигенский**

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
cscmp@iccs.ru

Самарский государственный технический университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
samgtu.ru

***Ключевые слова:*** *энергосбережение, энергоэффективность, стратегические проблемы управления, целевые показатели, законодательная база, нормативно-правовое обеспечение, программные механизмы*

**Abstract**

The strategical problems of control of energysaving and energy efficiency are considered. Governmental mechanisms and methods of control, planning and organization are investigated.

## Введение

Задача повышения энергоэффективности и снижения энергоемкости является одной из наиболее актуальных не только отрасли энергетики, но и экономики России, в целом. Величина энергоемкости Российского валового национального продукта (ВНП) превышала аналогичные значения развитых экономических стран в 1,5-2 раза, а за годы структурных перестроек в стране, начиная с 1990 г., она дополнительно возросла, и в настоящее время по этому показателю разрыв достигает 2,5-3,5 раз.

## 1 Системный анализ проблем энергосбережения и повышения энергетической эффективности

Снижение эффективности энергетического сектора имеет системный характер и основными причинами и структурными составляющими являются следующие факторы:

- Вследствие реформирования энергетики страны и разрушения единой энергетической системы распалась целостность структуры управления энергетическим комплексом. В настоящее время технологическое (оперативно- диспетчерское) и экономическое управления осуществляются исходя из различных целей, разными организациями, различными собственниками, их действия не скоординированы, их интересы не согласованы и, в целом, противоречивы и антагонистичны. В этих условиях эффективность использования информационных ресурсов при управлении существенно снизилась.
- Осуществленные политические и экономические преобразования были системно и научно-необоснованы и привели к структурным диспропорциям и нарушению сбалансированности функционирования топливо – энергетического комплекса и экономики, и промышленности страны, в целом. В 1990 г. вклад ТЭК в ВНП составлял 20%, и в экспортной продукции - 25%. В настоящее время соответствующие показатели равны 30% и 72%, и ТЭК при отсутствии в нем коренных совершенствований базовых технологий энергопроизводства и энергопотребления оказался крупнейшим сектором экономики.

- Нарушение пропорций между производством и потреблением энергии привело к функционированию как генерирующих предприятий, так потребителей энергии в нерасчетных, нерегламентированных режимах. Вследствие этого нарушились балансы энергии, не соблюдаются энергетические технологии и, соответственно, снизились коэффициенты полезного действия и эффективность использования энергетических ресурсов до 2-х раз.
- При спаде промышленного производства и пропорционального потребления энергии фактически в 2раза генерирующие предприятия, как правило, продолжали работать с полным составом основного и вспомогательного оборудования и штатной численностью работающих, что привело к уменьшению эффективности использования капитальных и трудовых ресурсов также в 2 раза.
- Государственная политика реформирования энергетического комплекса с сформулированной стратегией создания и перехода только на рыночные механизмы хозяйствования, передача значительной части энергетического сектора в частную собственность не привела к выполнению и достижению декларированных целей – фактически все показатели функционирования ощутимо ухудшились, обещаемый поток частных инвестиций в энергетику не пошел, она не развивается и прогрессивно стареет - морально и физически.

Такая ситуация ухудшения энергетической эффективности привела к тому, что вся экономика страны стала заложником положения дел в энергетическом секторе. Возросшие до 3-4 раз энергозатраты в структуре себестоимости производства фактически всех видов продукции сделали ее в значительной степени неконкурентоспособной как на мировых, так и внутренних рынках. Задача повышения энергоэффективности была признана в высших политических кругах по масштабу и значимости одной из важнейших в стране проблем.

## 2 Законодательное и нормативно-правовое обеспечение решения задач энергосбережения и энергоэффективности

В 2007 году был принят Указ Президента РФ, поставивший задачу снижения энергоемкости валового национального продукта страны в 2 раза к 2020 году. Для обеспечения решения этой задачи был принят пакет государственных законодательных и нормативно-правовых актов, постановлений и распоряжений Правительства РФ.

23 ноября 2009 года был принят Федеральный закон Российской Федерации № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности….»[1]. В нем формулируется государственная политика в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, определяются государственные органы, ответственные за разработку и реализацию политики, регламентируется необходимость разработок программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности на федеральном, региональных и муниципальных уровнях, как основных инструментов планирования, организации и управления.

Постановлением Правительства РФ № 1225 от 31.12.2009г. определяются перечень обязательных целевых отчетных показателей и состав основных мероприятий региональных и муниципальных Программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности [2]. Приказом Министерства регионального развития № 273 от 07.06.2010г. определяются состав индикаторов и методика расчета на их основе показателей энергоэффективности региональных и муниципальных программ [3]. Распоряжением Правительства РФ от 13.11. 2009 г. № 1715-Р утверждена Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, в которой энергосбережение является одним из базовых направлений развития энергетики в стране [4].

Распоряжением Правительства РФ от 27.12.2010г. № 2446 -Р утверждена государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2030 года» [5].

В этих, а также в ряде других нормативных документов конкретизируются и детализируются механизмы и инструменты государственного управления ,планирования и организации управления деятельностью в сфере энергосбережения и повышения энергетической эффективности на всех – федеральном, региональных и муниципальных уровнях. Первостепенная значимость этой деятельности сформулирована также в следующих документах.

На первом заседании комиссии по модернизации российской экономики 18.06.2009 г. Президент России Д. Медведев определил пять приоритетных направлений модернизации российской экономики. Первой позицией сформулировано направление «Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива».

Указом Президента РФ от 7.07.2011 г. № 899 утверждены восемь приоритетных направлений развития науки, технологий и техники, в числе которых содержится направление «Энегргоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика». Этим же Указом Президента утвержден Перечень критических технологий. В их числе содержатся следующие: « Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», « Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе», « Технологии создания электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств».

Решением Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям от 1.04. 2011 г. утвержден Перечень технологических платформ. К ним по рассматриваемой проблематике относятся: «Интеллектуальная энергетическая система России», «Экологически чистая тепловая энергетика высокой эффективности», «Перспективные технологии возобновляемой энергетики», «Малая распределенная энергетика».

Совокупность разработанных директивных материалов регламентирует основные направления и содержание работ по энергосбережению и повышению энергоэффективности. По разработанным и принятым нормативно-правовым материалам имеются следующие соображения.

- Федеральный закон ФЗ № 261 определяет основную деятельность в стране по решению глобальной поставленной Президентом России задачи снижения энергоемкости ВВП к 2020г. по отношению к 2007 году на 40%. В тоже время Закон не содержит разделы повышения энергоэффективности и снижения энергоемкости в сферах производства энергии и промышленного потребления. А именно в этих областях содержатся наибольшие резервы содержания потенциала экономии энергии. Таким образом, важнейшие источники снижения энергоемкости ВВП в Федеральном Законе № 261-ФЗ не указаны и, следовательно, не сформулированы главные направления решения поставленной Указом Президента задачи снижения энергоемкости ВВП на 40%. В Законе механизмы и пути решения этой задачи определяются только для сектора государственного регулирования.
- Постановлением Правительства РФ от 31.12. 2009г.№ 1225 «О требованиях к региональным и муниципальным программам в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности» определен перечень целевых показателей, количественно оценивающих эффективность энергосберегающих мероприятий. Для региональных программ энергосбережения он состоит из 51 показателя по шести группам мероприятий, и для муниципальных, соответственно, из 84 показателей. Как использовать эти показатели для комплексной оценки эффективности Программ энергосбережения не определяется.

- В соответствии с этим Постановлением предлагается оценивать эффективность Программ одновременно по 51 (84) частным показателям. Это типовая задача многокритериального оценивания. На основе методологий многокритериального оценивания следует на основе совокупности частных показателей сформировать один (или небольшое число) обобщенных глобальных критериев эффективности, и на их основе оценить комплексную, системную эффективность.
- Для перехода от множества частных показателей к обобщенным критериям необходимо выбрать способ агрегирования - метод свертки частных показателей - и обосновать весовые коэффициенты-ранги их значимости. Сделать это можно различными экспертными и другими способами. В Постановлении Правительства и в дополняющем, конкретизирующем его Приказе Министерства регионального развития методика выполнения комплексной оценки эффективности Программы отсутствует.
- Методика расчета значений целевых показателей в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, в том числе в сопоставимых условиях на основе специально сконструированных индикаторов содержится в Приказе Минрегионразвития РФ от 7.06.2010г. №273. При этом неясна сущность принципов вычисления и структуризации как индикаторов, так и, в большей степени, показателей энергоэффективности. С одной стороны, отсутствуют важные обобщенные показатели энергоэффективности в базовых сферах бюджетного финансирования, с другой – включено большое число показателей с неясной целевой ориентацией на принятие управленческих решений. Конструктивно не определена сущность понятия «сопоставимые условия», вследствие чего все показатели, включающие их в качестве ключевых слов, не имеют содержательного смысла. Ряд индикаторов, показателей и формул перехода неправильны – содержат неверные единицы измерения, агрегируют разнородные характеристики и имеют другие ошибки. Ряд недоработок исправлен в Приказе Минрегионразвития РФ от 26.08.2011г. «О внесении изменений в методику расчета значений целевых показателей в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, в том числе в сопоставимых условиях…»

## 3 Стратегические направления решения проблем энергосбережения и повышения энергетической эффективности

Энергетическая стратегия России и республиканская Программа энергосбережения и повышения энергетической эффективности включают всю инфраструктуру деятельности в сфере энергосбережения – «большую» энергетику, промышленное энергопотребление, электросетевое хозяйство. При этом имеется следующее противоречие. Федеральный закон ФЗ № 261 обязывает все Программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности иметь базовую цель снижения энергоемкости ВВП и валового регионального продукта (ВРП) в 2020 года на 40% по отношению к 2007 году. В Республиканской Программе энергосбережения этот целевой показатель определен величиной 13,5%. В тексте Программы говорится, что остальная экономия - 26,5% - должна быть обеспечена за счет внепрограммных и внебюджетных мероприятий. Эти мероприятия не определены и не регламентированы, и такой единый документ отсутствует. В республиканской Программе энергосбережения не определены также механизмы финансирования необходимых для достижения целевых показателей мероприятий. Федеральным бюджетным финансированием обеспечено лишь 0,73% мероприятий, бюджетами субъектов федерации – 6,56%. Источники финансирования 92,7% мероприятий не прописаны и, следовательно, обоснования их включения в Программу и их выполнимости отсутствуют, и их необходимо определить.

Из изложенного следует, что все региональные и муниципальные программы разрабатываются, исходя из целевого показателя энергосбережения 40% и, следовательно,

отсутствует сбалансированность иерархии республиканской и местных Программ энергосбережения.

В соответствии с изложенным для разрешения основных проблем в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности следует постоянно совершенствовать основы государственной политики в сфере энергосбережения и повышения энергетической эффективности на базе непрерывного мониторинга результативности реализуемых мероприятий.

Существующие основополагающие документы - Федеральный закон № 261-ФЗ, Энергетическая стратегия России, республиканская Программа энергосбережения и конкретизирующие их материалы - не охватывают всего спектра первостепенных важнейших проблем. Необходимо системно оценить последствия проведенного реформирования с разрушением единой энергетической системы России и его влияние на энергоэффективность большой энергетики России и, исходя из этих позиций, скорректировать политику государственного управления энергетическим комплексом.

Следует конструктивно сформулировать государственную политику управления энергосбережением в сфере потребления энергии в промышленном секторе и других основных отраслях на основе повышения эффективности государственно-частного партнерства.

Необходимо, исходя из целевой функции энергосбережения, проанализировать политику в области государственного регулирования цен и тарифов на энергию и согласовать ее с общей стратегией управления энергосбережением в стране.

**Заключение**

В целом, в настоящее время отсутствует единая стратегия управления энергосбережением в стране на основе всех базовых инструментов управления – государственного, институционного, нормативно-правового, финансово-экономического, технологического, организационного, - учета инфраструктуры взаимодействия энергетического сектора с экономикой, коэволюции энергетики и экономики, сочетания директивных методов управления и рыночных механизмов саморегулирования, различных форм собственности и методов хозяйствования.

**Список литературы**


[1] [Федеральный закон Российской федерации № 261-ФЗ от 23.11.2009г. «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности…»

[2] Постановление Правительства РФ № 1225 от 31.12.2009г. «О требованиях к региональным и муниципальным программам в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности».

[3] Приказ Министерства регионального развития № 273 от 07.06.10г. «Об утверждении Методики расчета значений целевых показателей в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, в том числе в сопоставимых условиях».

[4] Распоряжение Правительства РФ № 1715-Р от 13.11.2009г. «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года».

[5] Распоряжение Правительства РФ № 2446-Р от 27.12.2010г. о государственной программе «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020г.».

# МАКРОМОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ПРОИЗВОДСТВА, ПЕРЕДАЧИ, РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

**Н.В. Дилигенский[1], А.П. Ефимов[2]**

[1]Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
cscmp@iccs.ru

[2]Самарский государственный технический университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
samgtu.ru

***Ключевые слова:*** *производство, передача, распределение, потребление энергии, агрегированная макромодель управления, асимптотическая математическая модель, общесистемные закономерности и сценарии управления*

**Abstract**
Mathematical models of interaction of energy producing, transportation, distribution and consuming are constructed. Different development scenarious are investigated.

## Введение

Повышение энергоэффективности является в настоящее время одним из важнейших приоритетных направлений развития науки, технологий и техники. Решение этой крупной системной проблемы возможно только на основе разработки и применения интеллектуальных технологий управления всем комплексом задач производства, передачи, распределения и потребления энергии. Для этого необходимо создание соответствующего математического модельного и алгоритмического обеспечения.

В настоящей работе ставятся задачи построения системной агрегированной макромодели управления комплексом производства, передачи, распределения и потребления энергии, анализа на ее основе фундаментальных общесистемных закономерностей функционирования, исследования методов и алгоритмов управления энергетической деятельностью.

## 1 Агрегированная макромодель производства, передачи, распределения и потребления энергии

Структура макромодели управления технологическим комплексом производства, передачи, распределения и потребления энергии представлена на рисунке 1.

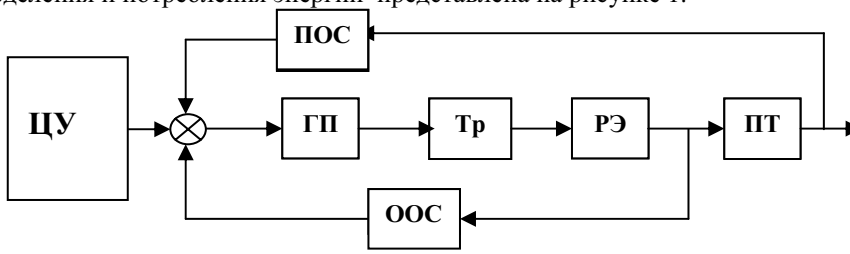



Рисунок 1 – Структура макромодели управления энергетическим комплексом производства, передачи, распределения и потребления энергии

В ней функциональные блоки (подсистемы) ГП, Тр., РЭ, ПТ отвечают, соответственно, моделям генерации (производства), транспорта (передачи), распределения и потребления энергии, блоки ПОС и ООС- механизмам положительных и отрицательных обратных связей, блок ЦУ- целевому, внешнему управлению энергетическим комплексом. При построении моделей функциональных блоков и энергосистемы следует учесть, что энергетика, в свою очередь, является подсистемой единого промышленно-экономического комплекса и связана с ней инфраструктурой значимых взаимосвязей. Процедуру построения модели проведем на примере региональной энергосистемы, являющейся, с одной стороны, достаточно крупным, масштабным объектом исследования, а с другой стороны, обладающей технологической и производственной цельностью и определенной спецификой с обозримым и доступным для анализа объемом информации о многоаспектной деятельности энергетического комплекса.

Агрегированную макромодель подсистемы производства энергии сконструируем в форме неоднородной производственной функции типа Кобба-Дугласа с выходной величиной Y – объемом произведенной энергии – и с входными факторами – затраченными ресурсами: топливными $B$, капитальными $K$ и трудовыми $L$

(1) $\mathrm{Y}(t) = \mathrm{A}\ \mathrm{K}^{\alpha}(t) L^{\beta}(t) B^{\gamma}(t)$,

где $\alpha, \beta, \gamma$ – факторные эластичности $\alpha = \dfrac{\partial \mathrm{Y}}{\partial K}\dfrac{K}{\mathrm{Y}}$, $\beta = \dfrac{\partial \mathrm{Y}}{\partial L}\dfrac{L}{\mathrm{Y}}$, $\gamma = \dfrac{\partial \mathrm{Y}}{\partial B}\dfrac{B}{\mathrm{Y}}$, характеризующие эффективность использования соответствующего ресурса, $A$ – интегральная масштабная эффективность технологии энергопроизводства.

Численные значения показателей $A, \alpha, \chi, \gamma$ определяются путем идентификации модели (1) на массиве экспериментальных статистических данных функционирования региональной энергосистемы. Практика идентификации моделей типа (1) показывает применимость их для описания поведения энергосистем с удовлетворительной точностью [1].

Процесс транспорта энергии по сети энергоснабжения опишем гиперболическим уравнением переноса [2], которое для компактности описания в безразмерной критериальной форме представим в следующем виде

(2) $\dfrac{\partial Q(Fo, \xi)}{\partial Fo} + Pe\dfrac{\partial Q(Fo, \xi)}{\partial \xi} + Bi \cdot Q(Fo, \xi) = 0$,

где $Q$ – безразмерная относительная величина энергии, $\xi$ – относительная пространственная координата, $Fo$ – безразмерное время (число Фурье), $Pe$ – безразмерная скорость ( критерий Пекле), $Bi$ – безразмерная величина удельной потери энергии ( критерий Био). Решение (2) определено в области $Fo \in [0, \infty)$, $\xi \in [0, \infty)$

Краевыми условиями к уравнению (2) являются:

(3) $Q\big|_{\xi=0} = \dfrac{\mathrm{Y}(t) - \mathrm{Y}_0}{\mathrm{Y}_0} = Q_H(Fo)$,

(4) $Q\big|_{F_0} = 0$.

В (3) $\mathrm{Y}(t)$ отвечает выходной величине модели (1) и $\mathrm{Y}_0$ – энергетический потенциал внешней окружающей среды.

При суммарной протяженности сети энергоснабжения в безразмерных координатах $L$ величина энергии на выходе транспортной сети $X(t)$ будет определяться решением $Q(Fo,\xi)$ при $\xi = L$, связанным с $X(t)$ соотношением $\frac{X(t) - \mathrm{Y}_0}{\mathrm{Y}_0} = Q(Fo, L)$.

Блок распределения в макромодели энергетической системы при учете взаимодействия энергетического комплекса и сектора экономики описывает условие сбалансированности двух видов разнородных потоков – энергетических и финансовых. В соответствии с этим уравнение распределения для всех составляющих запишем в единых единицах измерения – в финансовом исчислении [3].

Положим наиболее значимыми следующие потоковые величины – потребление энергии $\Pi(t)$, внешние $I(t)$ и внутренние $N(t)$ инвестиции, реновация (выбытие) основного капитала $R(t)$.

Тогда балансовое уравнение распределения для энергетической системы запишем в виде

(5) $X(t) + I(t) = \Pi(t) + N(t) + R(t)$.

Далее положим, что потребление в энергосистеме пропорционально полученной потребителем энергии

(6) $\Pi(t) = \nu\ X(t)$,

где $\nu$ – предельный коэффициент потребления, $\nu \in (0,1)$.

Положим также, что все внутренние инвестиции идут на формирование основного капитала

(7) $K(t) = K_0 + \int_{t_0}^{t} N(t)dt$,

где $t_0$ – начальный момент времени изучения процессов в системе, $K_0 = K(t_0)$.

Зависимость (8) можно также представить в виде

(8) $N(t) = K'(t)$.

Будем считать, что реновация капитала пропорциональна наличному основному капиталу

(9) $R(t) = aK(t)$,

где $a$ – коэффициент выбытия капитала.

Внешние инвестиции $I(t)$, потребленные топливные $B(t)$ и трудовые $L(t)$ ресурсы будем считать внешними кзогенными факторами.

Тогда соотношения (1), (2), (5) - (7) (или (8)), (9) определяют математическую модель управления энергокомплексом как распределенным объектом в виде системы из шести уравнений с шестью неизвестными $\mathrm{Y}(t)$, $K(t)$, $X(t)$, $\Pi(t), R(t), N(t)$.

## 2 Асимптотическая математическая модель функционирования энергетической системы

Построение и исследование решений сконструированной системы, состоящей из совокупности дифференциальных уравнений в частных и обыкновенных производных, функциональных и алгебраических зависимостей, являются достаточно сложными задачами, разрешаемыми на основе использования численных методов. Проанализируем полученные соотношения с целью построения более простых приближенных представлений для них.

Наиболее информативной и структурно-сложной является распределенная модель передачи энергии (2)-(4). Найдем на ее основе связь между энергией на входе транспортной сети – $Q_H(Fo)$ и на выходе – $Q(Fo, L)$.

В уравнении в частных производных (2) будем считать параметры $Pe$ и $Bi$ постоянными, и применим для решения (2) преобразование Лапласа по временной координате $Fo$

(10) $p\overline{Q}(p,\xi) + Pe\overline{Q}'(p,\xi) + Bi\overline{Q}(p,\xi) = 0$,

(11) $\overline{Q}(p,0) = \overline{Q}_H(p)$,

где $\overline{Q}(p,\xi) = \int_0^\infty Q(Fo,\xi)e^{-pFo}dFo$ трансформанта Лапласа временной функции $Q(F_0,\xi)$, $p$ – оператор Лапласа. Решением (10), (11) является

(12) $\overline{Q}(p,\xi) = \overline{Q}_H(p)e^{-\frac{p}{Pe}\xi}e^{-\frac{Bi}{Pe}}$.

Подставляя в (12) $\xi = L$, уравнение связи в трансформантах между входной $Y$ и выходной $X$ энергиями представим следующим образом

(13) $\overline{X}(p) = \overline{Y}(P)e^{-\frac{p}{Pe}L}e^{-\frac{Bi}{Pe}L}$.

Учтем, что транспортировка энергии осуществляется с высокой скоростью $Pe > 1$, и тогда запишем асимптотическое представление для экспоненты $e^{-\frac{p}{Pe}L}$ в следующей форме

(14) $e^{-\frac{p}{Pe}L} \cong 1 - \frac{p}{Pe} \cong \frac{1}{1+\frac{p}{Pe}}L$.

Поставляя (14) в (13), получим приближенное описание соотношения (13) в виде:

(15) $\left(1+\frac{P}{Pe}\right)\overline{X}(p) = Y(P)e^{-\frac{Bi}{Pe}L}$.

Переходя в (15) к оригиналам, далее найдем следующее соотношение

(16) $\frac{L}{Pe}X'(t) + X(t) = Y(t)e^{-\frac{Bi}{Pe}L}$.

Представление (16) описывает асимптотическую зависимость между входной $Y(t)$ и выходной $X(t)$ энергиями в стандартной форме обыкновенного дифференциального уравнения.

Далее, находя из (5) $N(t)$ и подставляя полученное выражение в (9), получим следующую зависимость для $K(t)$ в форме обыкновенного дифференциального уравнения

(17) $K'(t) + aK(t) = dX(t) + I(t)$,

где $a = (1-\nu)$.

Далее будем считать, что уравнения (1), (16), (17) определяют приближенную, агрегированную асимптотическую модель технологического комплекса производства, передачи, распределения и потребления энергии. Решением ее являются зависимости $Y(t), X(t), K(t)$.

Дифференцируя (17) по $t$, учитывая (16) и подставляя в найденное выражение зависимость (1), получим следующее соотношение

(18) $\frac{L}{Pe}K''(t)+(1+\frac{aL}{Pe})K'(t)+aK-bK^{\alpha}=I(t)+\frac{L}{Pe}I'(t)$,

где $b=dAB^{\gamma}L^{\beta}\cdot\exp(-\frac{BiL}{Pe})$.

Представление (18) является нелинейным неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка, описывающим динамику изменения капитальных ресурсов в исследуемой энергосистеме.

На основе решения (18) находятся $K(t)$ и далее по зависимости (1) и из уравнения (16) отыскиваются объемы произведенной $Y(t)$ и переданной $X(t)$ энергий.

### 3 Модельные сценарии управления энерготехнологическим комплексом

Исходные данные для идентификации параметров уравнения (18) – $\alpha,\beta,\gamma,a,\nu$, $A,Pe,Bi,b,d$ - а также значения экзогенных характеристик $B(t),L(t),I(t)$ определяются статистическими значениями величин в дискретные моменты времени $t=nT$, где $n=0,1,2,3...$ и $T$ - временной масштаб (год, месяц). В соответствии с этим, запишем уравнение (18) в дискретном времени

(19) $K_{n+1}=\hat{b}\,K_n^{\alpha}-(\hat{a}-1)K_n+cK_{n-1}+\frac{Pe+L}{Pe+(a+1)L}I_n-\frac{L}{Pe+(1+a)L}I_{n-1}$,

где $\hat{b}=\frac{bPe\cdot e^{-\frac{BiL}{Pe}}}{Pe+(a+1)L}$, $\hat{a}=\frac{(a-1)(a-1)Pe-(a+2)L)}{a-1+(a+1)L}+1$, $c=\frac{L}{Pe+(1+a)L}$.

Далее динамику функционирования энергетического комплекса будем изучать на основе численного решения рекуррентного уравнения (19). Управляющим воздействием в уравнении являются внешние инвестиции $I_n$, управляющими параметрами – коэффициенты $b$, характеризующий интенсивность положительной обратной связи в энергосистеме, пропорциональный масштабной энергоэффективности, $a$, определяющий отрицательную обратную связь, и $c$, характеризующей энергоэффективность передачи энергии. Известно, что решения дискретных нелинейных уравнений типа (19) в зависимости от значений управляющих параметров могут вести себя существенно различным образом, в них могут существовать устойчивые и неустойчивые, равновесные и неравновесные, детерминированные и хаотические решения [4].

На рисунке 2 приведена рассчитанная по модели (20) зависимость объема произведенной энергии от темпов выбытия основного капитала энергосистемы – величины отрицательной обратной связи $a$.

В достаточно широком диапазоне роста значений $a$ зависимость монотонно убывающая, однозначно определенная, отвечающая равновесным сбалансированным решениям функционирования энергетического комплекса. При этом, при превышении некоторого критического значения $a$ равновесный сценарий энергетической деятельности нарушается, протекание процессов производства, передачи, распределения и потребления энергии и обеспечения их топливными, капитальными и трудовыми ресурсами становится несбалансированным, и в системе

образуются самовозникающие самоподдерживающиеся флуктуации с нарушением единственности временных траекторий функционирования.

На рисунке 3 представлен в увеличенном масштабе фрагмент такой картины протекания неравновесных процессов.

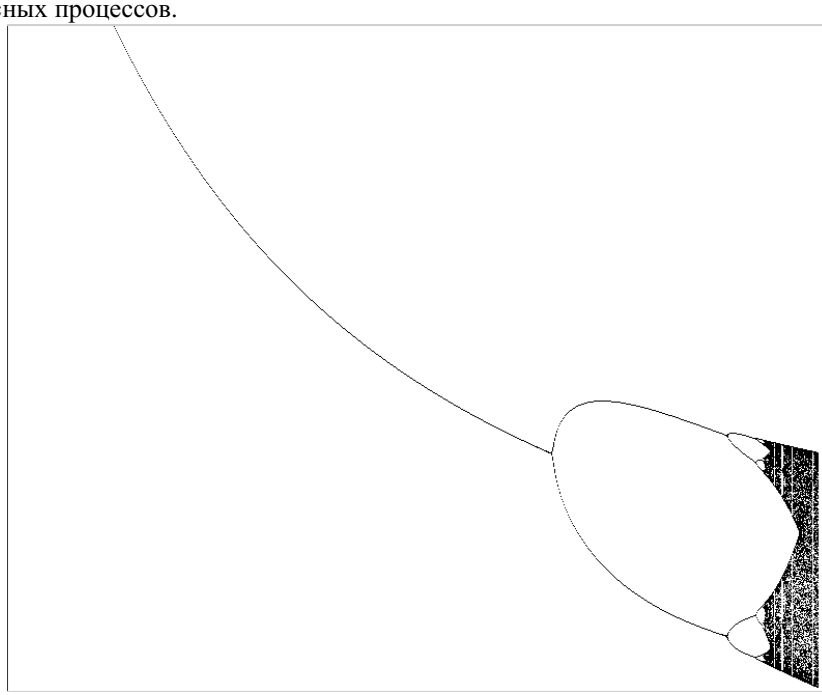


Рисунок 2 – Зависимость объема производства энергии от величины выбытия капитала

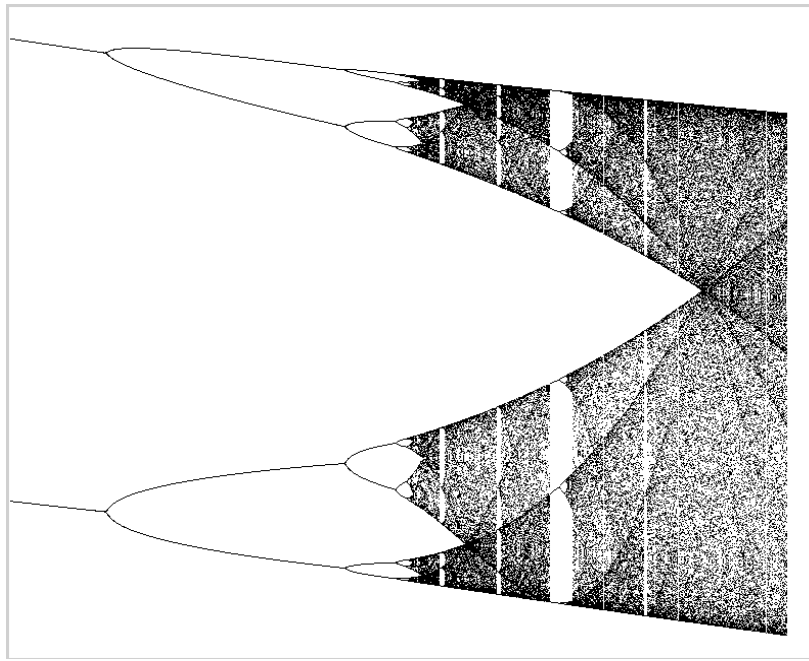


Рисунок 3 – Неравновесный сценарий зависимости объема производства энергии от выбытия капитала

Он имеет вид бифуркационной диаграммы с наличием точек ветвления решений, образованием из них каскада бифуркаций и хаотических процессов, чередованием стадий порядка и динамического хаоса с его структуризацией. Аналогичные сценарии функционирования энергетического комплекса образуются при воздействии других параметров управления.

На рисунке 4 приведена модельная зависимость производимой энергии от масштабной энергоэффективности энергетических технологий $b$, формирующей положительную обратную связь.

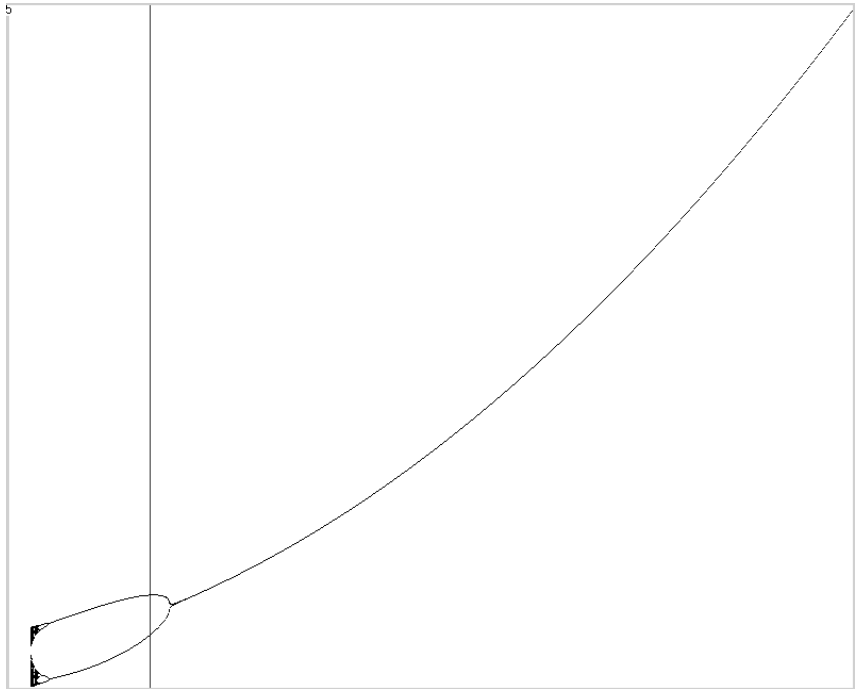


Рисунок 4 – Зависимость объема производства энергии от масштабной энергоэффективности

Виден монотонно возрастающий характер процессов развития энергокомплекса с увеличением их эффективности при росте $b$. При малых $b$ интенсивность ПОС оказывается недостаточной для стабильного развития энергетики и самоорганизуются процессы хаотизации, аналогичные описанным выше. Фрагменты картин протекания процессов в этом случае для разных значений параметров $a$ и $c$ представлены на рисунках 5, 6.

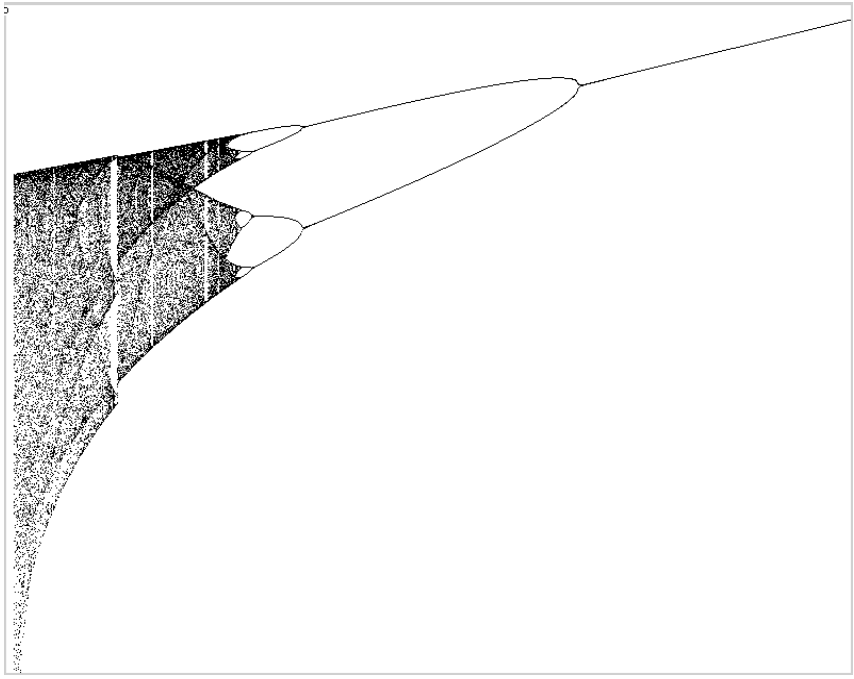


Рисунок 5 – Неравновесный сценарий зависимости объема производства энергии от масштабной энергоэффективности

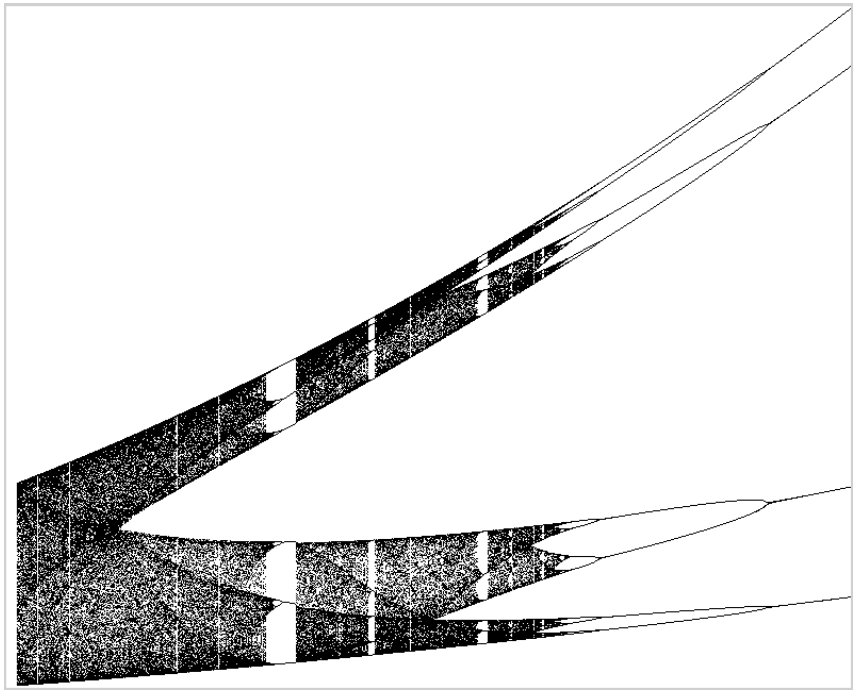


Рисунок 6 – Неравновесный сценарий зависимости объема производства энергии от масштабной энергоэффективности

На рисунке 7 приведена зависимость изменения объема производимой энергии от величины управляющего параметра $c$, характеризующего потери при транспорте энергии. В этом случае, в области положительных $c$ существует всюду однозначная обратная зависимость $y$ от $c$.

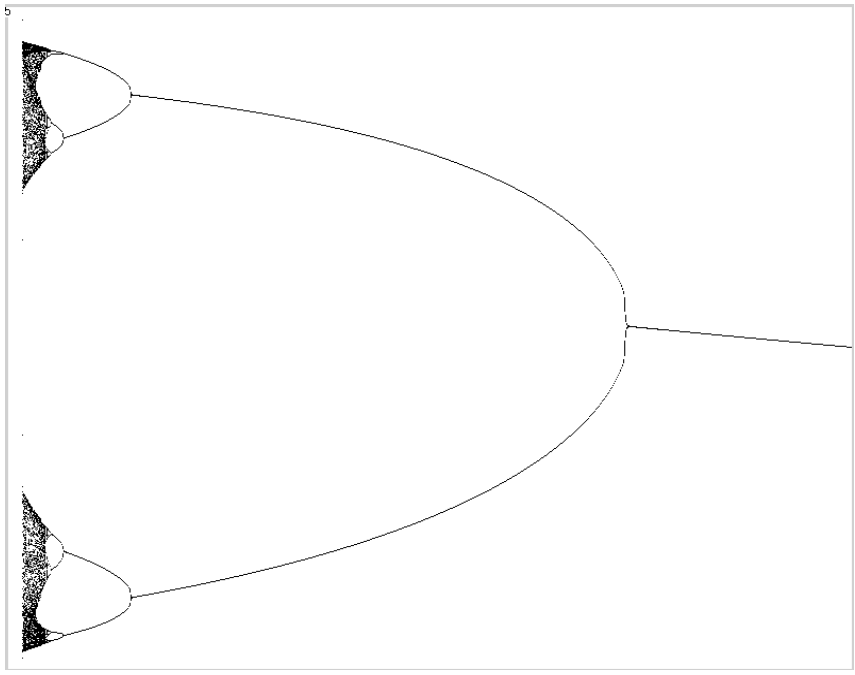


Рисунок 7–Зависимость объема производства энергии от величины потерь энергии при транспорте

Нарушение неравновесности, выявляемое модельным анализом, происходит в форме бифуркационной диаграммы при отрицательных значениях $c$, что содержательно соответствует притоку энергии при транспорте.

**Заключение**

Таким образом, построенная агрегированная макромодель управления энерготехнологическим комплексом производства, передачи, распределения и потребления энергии позволяет выявлять и анализировать фундаментальные общесистемные закономерности функционирования энергетической отрасли и управлять сценариями ее развития.

**Список литературы**


[1] Diligensky N.V., Efimov A.P., Gavrilova A.A. Identification of aggregating models and system regularity of global energy production. Inverse problems: Identification, Design and Control/ 4th International conference, / Moscow, 2003. [Electronic resource]. System requirements: http://www.cosmos.com.ru./4icip.

[2] Годунов С.К. Уравнения математической физики. М. Наука, 1971, 416с.

[3] Дилигенский Н.В., Цапенко М.В. Модельный анализ сценариев взаимодействий инфраструктур энергетики и экономики. Труды IX Международной конференции «Проблемы управления и моделирование в сложных системах». СНЦ РАН, Самара, 2007, с.112-125.

[4] Дилигенский Н.В., Ефимов А.П. Сингулярное вырождение и хаотическое поведение однопараметрических эволюционных систем. Труды IV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», СНЦ РАН, Самара,2002, с.91-100.

# МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕГИОНАЛЬНЫХ ПРОГРАММ ЭНЕРОСБЕРЕЖЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

**М.В. Цапенко**

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

***Ключевые слова**: многокритериальная оценка эффективности, программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности*

**Abstract**
In this paper the problem of multi-criteria estimates of energy programs are considered. Approaches to integrated assessment of the effectiveness of energy programs are suggested.

## Введение

В практике современного менеджмента известны различные подходы к многокритериальной оценке эффективности результатов хозяйственной деятельности организаций (performance measurement). Широкое распространение получили методики: KPI (key performance indicator) – ключевые показатели эффективности [1] и BSC (Balanced Scorecard) – система сбалансированных показателей [2], которые позволяют оценивать результаты деятельности на основе локальных показателей эффективности, проводить их агрегирование и сопоставление с конкурентами или аналогами в том или ином рыночном сегменте.

Государственный сектор экономики также предполагает наличие методов оценивания результатов в режиме программно-целевого подхода, где одним из основных способов реализации государственной политики, в той или иной сфере хозяйствования, являются целевые программы различных уровней – федерального, регионального и муниципального.

На сегодняшний день одним из приоритетных направлений государственной технической политики является сфера энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Рассмотрим конструктивные подходы к многокритериальной оценке эффективности реализации региональных программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности (далее по тексту – программ энергосбережения) и нахождения обобщённых показателей эффективности на основе системы локальных индикативных показателей результативности.

## 1 Система индикативных показателей результативности программ энергосбережения

Оценивание энергоэффективности программ и мероприятий в области энергосбережения в настоящее время является актуальной задачей. На федеральном уровне приняты основополагающие нормативные правовые акты, регламентирующие эту сферу деятельности – Федеральный закон РФ от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» и ряд подзаконных актов, детализирующих положения закона [3, 4].

Для программ энергосбережения приказом Министерства регионального развития Российской Федерации от 07 июня 2010 года № 273 утверждена Методика расчёта значений

целевых показателей [4], которая предусматривает расчёт системы индикативных показателей результативности. В эту систему индикаторов входят 51 целевой показатель региональных программ энергосбережения (84 показателя для муниципальных программ энергосбережения), которые рассчитываются на основе 78 индикаторов (80 индикаторов для муниципальных программ энергосбережения), структурированные по основным функциональным группам – таблица 1.

Таблица 1 – Группы показателей результативности энергетических программ

| №№ | Группа | Содержание | Количество показателей | |
|---|---|---|---|---|
| | | | - для региональных программ | - для муниципальных программ |
| 1 | Группа A | Общие целевые показатели в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности | 8 | 8 |
| 2 | Группа B | Целевые показатели в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, отражающие экономию по отдельным видам энергетических ресурсов | 8 | 8 |
| 3 | Группа C | Целевые показатели в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности в бюджетном секторе | 15 | 28 |
| 4 | Группа D | Целевые показатели в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности в жилищном фонде | 12 | 32 |
| 5 | Группа E | Целевые показатели в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности в системах коммунальной инфраструктуры | 6 | 6 |
| 6 | Группа F | Целевые показатели в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности в транспортном комплексе | 2 | 2 |
| Итого: | | | 51 | 84 |

Законодательство требует расчёт показателей и индикаторов на весь плановый период реализации энергетических программ до 2020 года, в связи с чем, необходимо сформировать совокупность более тысячи количественных оценок, характеризующих различные аспекты реализации программных мероприятий.

Для оценивания на их основе степени достижения поставленных целей и решения сформулированных задач в сфере энергосбережения необходимо структурировать этот массив количественных оценок, определить операции агрегирования частных показателей в обобщённые, построить многоуровневые иерархии критериев, определяющие, в конечном счёте, глобальные системные оценки качества реализации политики в сфере энергосбережения.

## 2 Способы синтеза индикаторов и показателей результативности реализации программ энергосбережения

Рассмотрим варианты синтеза многоуровневых иерархических структур индикаторов и показателей, позволяющие проводить свёртку и обеспечивающие корреляцию количественных оценок с целями и задачами, декларируемыми в программах энергосбережения. Возможные методы подобного агрегирования аннотированы в материалах [5].

Для региональных программ энергосбережения предлагается следующая структура целей, обобщённых и частных критериев – таблица 2.

Таблица 2 — Цели, обобщённые и частные критерии программ энергосбережения

| | |
|---|---|
| *Цель 1: «Снижение энергоёмкости валового регионального продукта»* | |
| Обобщённый критерий: | Относительное уменьшение энергоёмкости валового регионального продукта. |
| Частный критерий: | Относительная динамика энергоемкости валового регионального продукта. |
| *Цель 2: «Бережливое использование энергии и энергетических ресурсов»* | |
| Обобщённый критерий: | Эффективность использования энергии и энергетических ресурсов. |
| Частные критерии: | Относительный объём экономии энергии и энергетических ресурсов в стоимостном выражении. |
| | Эффективность технологий использования первичных энергетических ресурсов. |
| | Доля использования возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов. |
| *Цель 3: «Эффективность расходования бюджетных средств»* | |
| Обобщённый критерий: | Эффективность использования бюджетных расходов на обеспечение энергетическими ресурсами. |
| Частные критерии: | Доля энергетических ресурсов, расход которых определяется с использованием показаний приборов учёта. |
| | Эффективность бюджетных расходов, направляемых на оплату энергетических ресурсов. |
| | Динамика бюджетных расходов, направляемых на оплату энергетических ресурсов. |
| | Доля государственных заказчиков на рынке энергосервисных услуг. |
| *Цель 4: «Повышение энергетической эффективности в жилищном фонде»* | |
| Обобщённый критерий: | Эффективность использования энергетических ресурсов в жилищном фонде. |
| Частные критерии: | Доля энергетических ресурсов, потребляемых (используемых) в жилищном фонде, расчеты за которые осуществляются с использованием приборов учета. |
| | Доля электрической энергии, потребляемой (используемой) в жилищном фонде, расчеты за которую осуществляются с использованием приборов учета. |
| | Доля тепловой энергии, потребляемой (используемой) в жилищном фонде, расчеты за которую осуществляются с использованием приборов учета. |
| | Доля воды, потребляемой (используемой) в жилищном фонде, расчеты за которую осуществляются с использованием приборов учета. |

| | |
|---|---|
| | Доля природного газа, потребляемого (используемого) в жилищном фонде, расчеты за который осуществляются с использованием приборов учета. |
| | Доля жилых домов, в отношении которых проведено энергетическое обследование, в общем числе жилых домов. |
| *Цель 5: «Повышение энергетической эффективности в системах транспортной и коммунальной инфраструктур»* | |
| Обобщённый критерий: | Снижение расходов топлива и других энергетических ресурсов в системах транспортной и коммунальной инфраструктур. |
| Частные критерии: | Относительная динамика количества общественного транспорта с высокой энергетической эффективностью. |
| | Относительная динамика расходов энергии и энергетических ресурсов в системах коммунальной инфраструктуры. |

Расчёт каждого обобщённого критерия осуществляется исходя из учёта совокупности частных критериев, которые, в свою очередь, определяются на основе закреплённых в законодательстве целевых показателей, базирующихся на системе индикаторов результативности. Такая структура позволяет производить свертку локальных показателей и количественно определять степень достижения целей в заданном пространстве обобщённых критериев.

Рассмотрим возможные способы построения частных и обобщённых критериев оценки эффективности для первых двух целей энергетической программы (см. таблицу 2).

Для первой цели способ нахождения обобщенного критерия представлен в таблице 3.

Таблица 3 — Способ нахождения обобщенного критерия, характеризующего первую цель

| *Статус показателя* | *Наименование задач, критериев, и целевых показателей* | *Способ свертки или расчёта* | *Индекс показателя в соответствии с федеральной методикой [4]* |
|---|---|---|---|
| Обобщенный критерий: | Относительное уменьшение энергоёмкости валового регионального продукта, %. | 1А. | |
| Частный критерий: | 1А. Относительная динамика энергоемкости валового регионального продукта, %. | $\left(\frac{1.1_t - 1.1_{2007}}{1.1_{2007}}\right)\cdot 100\%$ | |
| Целевой показатель: | 1.1. Динамика энергоемкости валового регионального продукта, тыс. т у.т./ тыс. руб. | $u2_t / u1_t$ | А.1. |

Как видно, по существу, характеристикой относительного уменьшения энергоёмкости валового регионального продукта является частный критерий относительной динамики энергоёмкости, и в этом случае обобщённый и частный критерии совпадают, а свёртка не реализуется.

Здесь в основу критерия результативности положена характеристика энергоёмкости валового регионального продукта, представляющая отношение суммарного потребления топливно-энергетических ресурсов в натуральном выражения (индикатор *u2,* см. методику [4]) к стоимостной оценке валового регионального продукта (индикатор *u1*).

В качестве базы сравнения для нахождения частного критерия относительной динамики энергоёмкости берётся фиксированное значение целевого показателя в 2007 году. Следует отметить, что в последующих дополнениях и изменениях к методике (в редакции Приказа

Минрегиона РФ от 26.08.2011 №417) в качестве базы сравнения принимается год, предшествующий началу периода реализации энергетической программы.

Рассмотрим алгоритм синтеза обобщенного критерия для второй цели – таблица 4.

Таблица 4 — Способ синтеза обобщенного критерия, характеризующего вторую цель

| *Статус показателя* | *Наименование задач, критериев, и целевых показателей* | *Способ свертки или расчёта* | *Индекс показателя в соответствии с федеральной методикой [4]* |
|---|---|---|---|
| Обобщенный критерий: | Эффективность использования энергии и энергетических ресурсов, %. | 2A + 2B + 2C | |
| Частные критерии: | 2A. Относительный объём экономии энергии и энергетических ресурсов в стоимостном выражении, %. | $\left(\frac{2.1_t + 2.2_t + 2.3_t + 2.4_t}{u11_t \cdot u3_t + u12_t \cdot u4_t + u13_t \cdot u5_t + u14_t \cdot u6_t}\right) \cdot 100\%$ | |
| | 2B. Эффективность технологий использования первичных энергетических ресурсов, %. | $-\left(\frac{2.11_t + 2.12_t}{2}\right) \cdot 100\%$ | |
| | 2C. Доля использования возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов, %. | $\left[2.10_t \cdot (1 + 2.9_t)\right] \cdot 100\%$ | |
| Целевые показатели: | 2.1. Экономия электрической энергии в стоимостном выражении, тыс. руб. | $2.5_t \cdot u11_t$ | B.2. |
| | 2.2. Экономия тепловой энергии в стоимостном выражении, тыс. руб. | $2.6_t \cdot u12_t$ | B.4. |
| | 2.3. Экономия воды в стоимостном выражении, тыс. руб. | $2.7_t \cdot u13_t$ | B.6. |
| | 2.4. Экономия природного газа в | $2.8_t \cdot u14_t$ | B.8. |

| *Статус показателя* | *Наименование задач, критериев, и целевых показателей* | *Способ свертки или расчёта* | *Индекс показателя в соответствии с федеральной методикой [4]* |
|---|---|---|---|
| | стоимостном выражении, тыс. руб. | | |
| | 2.5. Экономия электрической энергии в натуральном выражении, тыс. кВт•ч. | $\left(\frac{1.1_{2007} - 1.1_t}{1.1_{2007}}\right) \cdot u3_{2007}$ | В.1. |
| | 2.6. Экономия тепловой энергии в натуральном выражении, тыс. Гкал. | $\left(\frac{1.1_{2007} - 1.1_t}{1.1_{2007}}\right) \cdot u4_{2007}$ | В.3. |
| | 2.7. Экономия воды в натуральном выражении, тыс. куб. м. | $\left(\frac{1.1_{2007} - 1.1_t}{1.1_{2007}}\right) \cdot u5_{2007}$ | В.5. |
| | 2.8. Экономия природного газа в натуральном выражении, тыс. куб. м. | $\left(\frac{1.1_{2007} - 1.1_t}{1.1_{2007}}\right) \cdot u6_{2007}$ | В.7. |
| | 2.9. Относительное изменение объема производства энергетических ресурсов с использованием возобновляемых источников энергии и (или) вторичных энергетических ресурсов. | $(u15_{t+1} - u15_t) / u15_t$ | А.6. |
| | 2.10. Доля энергетических ресурсов, производимых с использованием возобновляемых источников энергии и (или) вторичных энергетических ресурсов, в общем объеме энергетических ресурсов. | $u15t / u16_t$ | А.7. |

| *Статус показателя* | *Наименование задач, критериев, и целевых показателей* | *Способ свертки или расчёта* | *Индекс показателя в соответствии с федеральной методикой [4]* |
|---|---|---|---|
| | 2.11. Относительное изменение удельного расхода топлива на выработку электрической энергии тепловыми электростанциями. | $(u73_{t+1} - u73_t) / u73_t$ | - |
| | 2.12. Относительное изменение удельного расхода топлива на выработку тепловой энергии | $(u74_{t+1} - u74_t) / u74_t$ | - |

Как видно, обобщённый критерий эффективности использования энергии и энергетических ресурсов представляет собой аддитивный набор трёх частных критериев, характеризующих относительные объёмы экономии ресурсов в стоимостном выражении – 2A, эффективность технологий использования первичных энергоресурсов – 2B и долю использования возобновляемых и вторичных энергетических ресурсов – 2C.

Первый частный критерий является отношением стоимостных оценок суммарной экономии четырех видов базовых энергоресурсов, определяемых относительно базового года сравнения (в этом примере – 2007 год) к общему объёму потребления ТЭР.

Экономия рассчитывается относительно 2007 года через показатель энергоёмкости валового регионального продукта с учётом величин натурального потребления соответствующего вида ресурсов в пересчёте на тарифы в ценах текущего года.

Второй локальный критерий характеризует эффективность использования первичных энергетических ресурсов, и представляет собой среднее арифметическое относительных изменений удельных расходов топлива на выработку электрической и тепловой энергии взятое со знаком минус. Относительные показатели определяются на основе изменений удельных расходов топлива на выработку электрической энергии (*u73*) и тепловой энергии (*u74*). При этом относительные величины определяются в сравнении с предшествующими периодами.

Третий частный критерий характеризует степень использования возобновляемых и вторичных топливно-энергетических ресурсов. Интенсивность их использования определяется как произведение относительного изменения приростов объёмов производства энергетических ресурсов с использованием возобновляемых источников энергии и (или) вторичных энергетических ресурсов на отношение энергетических ресурсов, производимых с использованием возобновляемых источников энергии и (или) вторичных энергетических ресурсов (*u15*) к общему объёму произведённых энергетических ресурсов (*u16*).

Подобным образом, но с различными способами синтеза рассчитываются глобальные критерии эффективности для остальных трех целей энергетической программы. Используются различные способы агрегирования, учитывающие весовые характеристики частных критериев и целевых показателей.

## Заключение

Таким образом, на основе различных способов агрегирования показателей и индикаторов реализуется многокритериальная оценка эффективности реализации энергетических программ. Этот подход позволяет сформировать систему базовых ключей эффективности на основе которых возможна реализация процедур мониторинга и корректировки хода реализации энергетических программ.

## Список литературы


[1] David Parmenter Key Performance Indicators: Developing, Implementing and Using Winning KPI's. — New Jersey, USA: John Wiley & Sons, inc., 2007. – 233 с.

[2] Каплан Роберт С., Нортон Дейвид П. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2003. – 304 с.

[3] Постановление Правительства Российской Федерации от 31 декабря 2009 года № 1225 «О требованиях к региональным и муниципальным программам в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности».

[4] Приказ Министерства регионального развития Российской Федерации от 07 июня 2010 года № 273 «Об утверждении Методики расчета значений целевых показателей в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, в том числе в сопоставимых условиях» (с учётом изменений и дополнений в редакции Приказа Минрегиона РФ от 26.08.2011 № 417).

[5] Дилигенский Н.В., Цапенко М.В. Агрегирование индикативных показателей региональных программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности // Стратегическое планирование и развитие предприятий. Секция 2. / Материалы Двенадцатого всероссийского симпозиума. Москва, 12-13 апреля 2011 г. Под ред. чл.-корр. РАН Г.Б. Клейнера. – М.: ЦЭМИ РАН, 2010 г. – 189 с. (с. 58-59).

# СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЕМ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ПРЕДПРИЯТИЙ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

**И.В. Долотовский, Е.А. Ларин, Н.В. Долотовская, А.В. Ленькова**

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
410054, Саратов, ул. Политехническая, 77, Россия
larin@sstu.ru
тел/факс: +7 (845 2) 99-87-48

***Ключевые слова:*** *система управления, энергоресурсы, эффективность, предприятие переработки углеводородного сырья*

**Abstract**

The bases of a formalization of tasks of systems analysis and multicriterional estimation of the effectiveness of energy complex of enterprises of output and processing of hydrocarbon raw material are examined. Data with respect to the systematic, information- program guarantee and results of the solution are cited the task of control of the consumption of the thermal and electrical energy in enterprise for processing of gas and gas condensate.

## Введение

Энергетический комплекс (ЭК) во взаимосвязи с технологической системой (ТС) предприятий переработки углеводородного сырья (ПП УВС) характеризуется сложной структурой и многофункциональными режимами эксплуатации оборудования, установок и производств. Поэтому для решения задач эффективного планирования, анализа, прогрессивного нормирования и управления потреблением и генерацией топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), водопотреблением и водоотведением за любой заданный промежуток времени с необходимой степенью детализации объекта (аппарат, установка, производство, предприятие) требуется создание специализированных программно-аппаратных комплексов (ПАК), учитывающих технологическую топологию, состав оборудования, режимы эксплуатации, технико-экономические, экологические, климатические и другие факторы.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования ЭК и ТС предприятий по переработке газа, газового конденсата и нефти позволили сформировать методологию оценки и анализа потребления ТЭР, а также разработать комплекс показателей энергетической эффективности и математические модели их расчета с достаточной степенью детализации на каждом иерархическом уровне предприятия, объединенные в программные модули системы управления потреблением энергоресурсов [1, 2].

## 1 Блочно-иерархическая структура ЭК и ТС

Базовая иконографическая модель, отражающая в определенной мере сложность связей между энергетическими и технологическими процессами основного и вспомогательного производств предприятия, представлена в виде блочно-иерархической модели элементов ЭК и ТС ПП УВС (рисунок 1). Модель состоит из шести блоков, расположенных на четырех иерархических уровнях решаемых задач по управлению энергопотреблением.

Два первых блока расположены на верхнем иерархическом уровне – уровне *подсистем и производств*. Блок I описывает структуру ТС, необходимую для преобразования исходного УВС в конечную продукцию. В нем объединены *технологические производства* подготовки и

Рисунок 1 – Блочно-иерархическая модель взаимосвязей элементов энергетического комплекса и технологической системы

переработки сырья, утилизации отходов, хранения, упаковки и транспортирования готовой продукции.

Блок II включает математическое описание структуры и взаимосвязей подсистем ЭК, необходимых и достаточных для обеспечения производств ТС и собственного обеспечения ТЭР, получаемыми от внешних источников, и вырабатываемыми в ТС и ЭК. В общем случае в блок входят базовые *подсистемы* ЭК – топливная, электроэнергетическая и теплоэнергетическая, – а также внутрипроизводственные подсистемы энергообеспечения – водо- и воздухоснабжения, обеспечения кислородом, азотом, инертными газами, холодоснабжения, водоотведения.

Блоки III, IV предназначены для описания объекта на втором иерархическом уровне – уровне *процессов*.

Блок III описывает преобразование УВС в *технологических процессах* в полупродукты, ТЭР и конечные продукты. Для общей технологии преобразования УВС в готовую продукцию характерны термохимические, термокаталитические, массообменные, тепловые, гидродинамические, электролитические, ионообменные процессы, протекающие в непрерывном взаимодействии. При этом ряд процессов относится к так называемым энерготехнологическим процессам, когда наряду с выработкой основной технологической продукции генерируются ТЭР, используемые в других производствах.

Блок IV включает описание процессов генерации, транспортирования и потребления ТЭР в ТС и ЭК, преобразования ТЭР, получаемых от внешних источников в ТС и ЭК, с целью изменения их параметров или физической природы. При наличии энерготехнологических процессов разграничение математического описания в блоках III и IV по отдельным энергоресурсам носит условный характер.

Третий иерархический уровень – *аппаратов* (агрегатов, установок) – содержит блок V, соответствующий описанию конечных элементов ТС и ЭК, в которых реализуются процессы, описанные на предыдущем уровне иерархии. В случае энерготехнологического агрегата принадлежность этого элемента к ТС или ЭК носит условный характер и определяется спецификой конкретного ПП УВС.

Последний уровень иерархии – уровень *энергоресурсов* – содержит блок VI, представляющий матрицу соответствия элементов третьего уровня (аппаратов) математическому описанию задач учета, планирования, нормирования, анализа, оптимизации потребления и генерации различных видов ТЭР.

## 2 Математическое описание системы

В соответствии с приведенной на рисунке 1 топологической моделью взаимосвязей элементов ПП УВС в целом как объект формализованного математического описания представлен на первом уровне объединением двух множеств математических моделей:

$N$ производств ТС (блок I)

$$(1)\quad \Pi_{\text{тс}} = \left\{ \Pi^1_{\text{тс}}, ..., \Pi^n_{\text{тс}}, ..., \Pi^N_{\text{тс}} \right\};$$

и $M$ подсистем ЭК (блок II)

$$(2)\quad \Pi_{\text{эк}} = \left\{ \Pi^1_{\text{эк}}, ..., \Pi^m_{\text{эк}}, ..., \Pi^M_{\text{эк}} \right\};$$

$$(3)\quad \text{ПП УВС} = \Pi_{\text{тс}} \cup \Pi_{\text{эк}},$$

где $\Pi^1_{\text{тс}} ... \Pi^N_{\text{тс}}$ – математические модели производств подготовки, переработки УВС, утилизации отходов, кондиционирования и хранения промежуточных и конечных технологических потоков, транспортирования продуктов;

$П^1_{эк} ... П^M_{эк}$ – математические модели подсистем ЭК, осуществляющих генерацию, преобразование, транспортирование топлива, электроэнергии, тепловой энергии, воды, внутрипроизводственных энергоносителей.

Каждый блок последующих уровней иерархической модели ПП УВС также представлен множествами отдельных элементов:

- $J$ технологических процессов ТС (блок III)

(4) $$ТП_{тс} = \left\{ ТП^1_{тс}, ..., ТП^j_{тс}, ..., ТП^J_{тс} \right\};$$

- $I$ технологических процессов ЭК (блок IV)

(5) $$ТП_{эк} = \left\{ ТП^1_{эк}, ..., ТП^i_{эк}, ..., ТП^I_{эк} \right\},$$

где $ТП^1_{тс} ... ТП^J_{тс}$ – математическое описание термохимических, термокаталитических, массообменных, тепловых и других технологических процессов, необходимых для реализации основной производственной задачи – выпуска продукции;

$ТП^1_{эк} ... ТП^I_{эк}$ – комплекс математических моделей процессов генерации, преобразования, транспортирования и потребления ТЭР.

Формализованное описание блока V включает множества математических моделей аппаратов и установок

- ТС (всего $K$ аппаратов или агрегатов)

(6) $$A_{тс} = \left\{ A^1_{тс}, ..., A^k_{тс}, ..., A^K_{тс} \right\};$$

- ЭК (общее число аппаратов или установок $L$ )

(7) $$A_{эк} = \left\{ A^1_{эк}, ..., A^l_{эк}, ..., A^L_{эк} \right\}.$$

На четвертом иерархическом уровне разработаны математические описания решения задач анализа, оптимизации и нормирования потребления и генерации каждого из $M$ видов энергоресурсов

(8) $$W = \{W_1, ..., W_m, ..., W_M\}.$$

При этом, как было отмечено ранее, по отдельным видам энергоресурсов математические описания процессов входят как во множество (4), так и во множество (5), т.е. пересечение множеств $ТП_{тс}$ и $ТП_{эк}$ не является пустым множеством:

(9) $$ТП_{тс} \cap ТП_{эк} \neq \varnothing.$$

Математическое описание энерготехнологических агрегатов входит в непустое множество, образованное пересечением множеств математических описаний аппаратов ТС $\left(A_{тс}\right)$ и установок ЭК $\left(A_{эк}\right)$:

(10) $$A_{тс} \cap A_{эк} \neq \varnothing.$$

Отображая множества (1.1)–(1.8) математических моделей элементов ПП УВС во множестве функций $F = \{f_1, ..., f_\phi, ..., f_Ф\}$, получим математическую модель для разработки, модернизации, оптимизации ЭК ПП УВС в соответствии с принятыми критериями эффективности.

Частными случаями множества функций $F$ являются следующие отображения:

- функции для решения единичных задач расчета, анализа, оптимизации, нормирования потребления или генерации $m$-го вида ТЭР в $k$-м аппарате, где протекает $j$-й технологический процесс $n$-го производства ТС

(11) $f_{\phi,\text{тс},m} : \left(A^{k,\phi}_{\text{тс},m}, ТП^{j,\phi}_{\text{тс},m}\right) \to П^{n,\phi}_{\text{тс},m}$;

где $f_{\phi,\text{тс},m}$ – отображение $\left(A^{k,\phi}_{\text{тс},m}, ТП^{j,\phi}_{\text{тс},m}\right)$ в $П^{n,\phi}_{\text{тс},m}$ на пространстве технологических $(\Omega_{\text{тс}})$, конструктивных $(Z_{\text{тс}})$ характеристик ТС, экологических / климатических $(S)$, экономических $(Ц)$ факторов для $m$-го вида ТЭР;

- функции для решения единичных задач расчета, анализа, оптимизации, нормирования потребления или генерации $m$-го вида ТЭР в $l$-м аппарате, где протекает $i$-й технологический процесс $m$-й подсистемы ЭК

(12) $f_{\phi,\text{эк},m} : \left(A^{l,\phi}_{\text{эк},m}, ТП^{i,\phi}_{\text{эк},m}\right) \to П^{m,\phi}_{\text{эк},m}$,

$f_{\phi,\text{эк},m}$ – отображение $\left(A^{l,\phi}_{\text{эк},m}, ТП^{i,\phi}_{\text{эк},m}\right)$ в $П^{m,\phi}_{\text{эк},m}$ на пространстве технологических $(\Omega_{\text{эк}})$, конструктивных $(Z_{\text{эк}})$ характеристик ЭК, экологических / климатических, экономических факторов для $m$-го вида ТЭР.

Математическая модель множества функций $F$ (отображений $f_{(1\ldots\Phi),\text{тс},(1\ldots\text{M})}$ и $f_{(1\ldots\Phi),\text{эк},(1\ldots\text{M})}$ в $П^{(1\ldots\text{N}),(1\ldots\Phi)}_{\text{тс},(1\ldots\text{M})}$ и $П^{(1\ldots\text{M}),(1\ldots\Phi)}_{\text{эк},(1\ldots\text{M})}$) в координатном пространстве функционирования объекта, ограниченном технологическими, конструктивными характеристиками ТС, экологическими / климатическими, экономическими факторами в любой промежуток времени (рисунок 2).

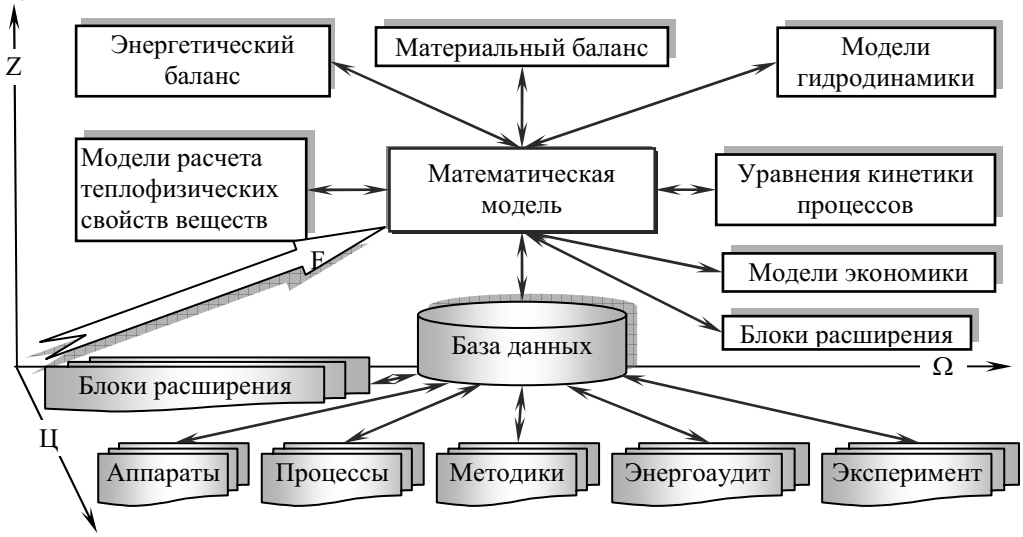



Рисунок 2 – Блочная структура математических моделей программного комплекса

Эти модели являются основой разработанного ПАК [3–5], содержащего совокупность расчетно-информационных блоков, модулей и реляционную базу данных и реализующего определение показателей энергетической эффективности для ПП УВС с любой технологической топологией.

## 3 Структура ПАК

Фундаментальная организация разработанного ПАК основана на блочно-иерархическом принципе и реализована в отдельных его компонентах – программных модулях (ПМ), взаимосвязанных друг с другом. Основой каждого модуля является программное обеспечение, разработанное с использованием метода Stepwise Refinement – пошагового усовершенствования, когда первоначально были определены данные и способы их обработки в целом для ЭК и ТС ПП УВС, после чего процедура определения осуществлялась во все возрастающей степени подробности (производства, установки, аппараты).

При разработке программного обеспечения расчета энергетических характеристик на уровне установок и аппаратов использован метод Encapsulation – инкапсуляции, – в результате чего для пользователя оставлены видимыми только внешние интерфейсы ПМ, которые определяют все допустимые операции над ними (ввод данных, расчет, вывод результатов, передача информации) при скрытой от пользователя программной реализации модуля.

ПМ планирования, анализа и нормирования потребления и генерации ТЭР, водопотребления и водоотведения содержат функции, объединенные в логически законченные блоки расчета (рисунок 2), основными из которых являются блоки расчета: энерготехнологического баланса (ЭТБ); гидродинамики и свойств материальных потоков и ТЭР; кинетики процессов; базы данных параметров и констант по аппаратам и процессам; методических положений учета, нормирования, планирования, регулирования и оптимизации генерации и потребления ТЭР; результатов энергетического аудита и экспериментальных исследований. В свою очередь, блоки ПМ разработанного ПАК объединены в две группы: блоки для определения, нормирования, оптимизации характеристик действующих объектов и блоки для расчета и оптимизации характеристик реконструируемых, модернизируемых и проектируемых ЭК и ТС ПП УВС. Отдельными блоками в исходные данные входят состав сырья и номенклатура продукции предприятия, графики планово-предупредительных и капитальных ремонтов оборудования, база данных по аппаратам, методикам, процессам и другие данные. В исходные данные входят технологические, конструктивные характеристики ЭК и ТС, экологические, климатические и экономические факторы (в том числе комплекс критериев эффективности).

Аппаратная часть разработанного ПАК представлена объединенными в локальную вычислительную сеть автоматизированными рабочими местами пользователей (АРМ) с разграниченными правами и центральный сервер. На сервере располагается блок памяти в виде баз данных: оборудования подсистем предприятия (технологической, топливной, электроэнергетической, теплоэнергетической); регламентных технологических и прогрессивных норм выработки и потребления ТЭР, водопотребления и водоотведения аппаратами, установками, производствами; материальных технологических потоков, по которым осуществляется нормирование ТЭР, водопотребления и водоотведения; внутрипроизводственных и коммерческих приборов учета сырья, продукции, ТЭР и показателей измерений параметров основных нормируемых технологических потоков, выработки и потребления ТЭР; энергетического аудита и технических проектов по рационализации использования ресурсов, структурированных по системам энергоиспользования предприятия и инвестиционной привлекательности; документации нормативно-методического обеспечения с утвержденными методиками расчета показателей потребления и выработки ТЭР, водопотребления, водоотведения, формами отчетности, ГОСТами, РД, инструкциями, правилами, указаниями и документацией по вопросам энергосбережения и нормирования ресурсов. Каждое АРМ содержит сгруппированные блоки ПМ, позволяющие осуществить расчет, анализ, планирование, нормирование ТЭР, водопотребления и водоотведения путем составления ЭТБ аппаратов, установок, производств, предприятия за любой промежуток времени. АРМ содержат также блоки отображения, документирования результатов и формирования запросов в систему управления базой данных, расположенную на центральном сервере.

## 4 Реализация ПАК в системе управления потреблением ТЭР

Формирование режимных карт загрузки оборудования для расчетного интервала времени осуществляется в соответствии с логической схемой (рисунок 3) обмена информацией ТС, ЭК, системы управления (СУ) технологическим процессом ПП УВС, внешней системой энергообеспечения (ЭС). Реализация разработанного ПАК в системах управления ТЭР рассмотрена на примере нагнетательного оборудования (воздуходувки, газодувки и компрессоры) производства серы и установок компримирования товарного газа Астраханского газоперерабатывающего завода, имеющего с целью резервирования и повышения надежности работы два типа привода – электродвигатели и паровые турбины.

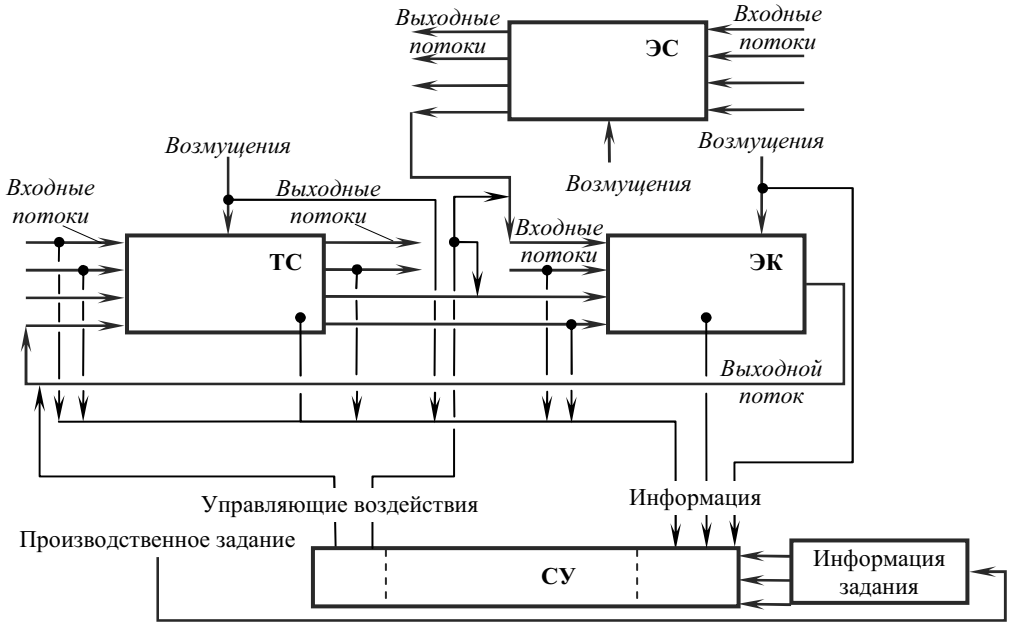



Рисунок 3 – Схема управления потреблением ТЭР

Численный эксперимент с использованием ПАК проводился для условия 100%, 90%, 70% загрузки всех установок производства серы и осушки газа и семи режимов, отличающихся количеством работающего нагнетательного оборудования установок.

На рисунке 4 показаны затраты на электроэнергию (мощность привода $N_э$) и тепловую энергию (мощность привода $N_п$) от внешних источников для условия 90%-й загрузки всех установок производства серы и пониженной степени конверсии сероводорода, следовательно, пониженной выработке пара среднего давления в котлах-утилизаторах (85% от номинальной выработки пара).

Формирование управляющих воздействий СУ (выбор оптимального режима загрузки нагнетательного оборудования) выполнено по критерию суммарных затрат на ТЭР и питательную воду котлов-утилизаторов производства серы.

**Заключение**

Разработанная на основе программно-аппаратного комплекса система управления потреблением энергоресурсов и водопотреблением позволяет определить оптимальные режимы эксплуатации оборудования при изменяющихся ценах на энергоносители от внешних источников и разработать стратегию развития энергетического комплекса предприятий переработки углеводородного сырья с учетом всех влияющих факторов.

**Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (ГК 14. 740.11.0107).

**Список литературы**

[1] Ларин, Е.А., Долотовский, И.В., Долотовская, Н.В. Энергетический комплекс газоперерабатывающих предприятий. Системный анализ, моделирование, нормирование – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 440с.

[2] Долотовский, И.В., Ларин, Е.А., Долотовская, Н.В. Концепция системного анализа и многокритериальной оценки эффективности энергетического комплекса предприятий добычи и переработки углеводородного сырья// Вестник СГТУ. – 2011. – №1 (54). Выпуск 3. – С. 187-192.

[3] Система автоматизированного учета и планирования на предприятии: пат. № 63537 РФ, МПК G06Q 10/00; G 07 C 3/14 / Е.А. Ларин, Н.В. Долотовская, И.В. Долотовский. – №2007106539/22(007086); заявл. 20.02.07; опубл. 27.05.07.

[4] Система «Энергоресурс»: программа для ЭВМ № 2010615353 / Е.А. Ларин, И.В. Долотовский, Н.В. Долотовская. – Заявл. 29.06.10; зарегистр. 20.08.10.

[5] Баланс газа: программа для ЭВМ №2011616684 / И.В. Долотовский, Е.А. Ларин, Н.В. Долотовская. – Заявл. 30.06.2011; зарегистр. 26.08.2011.

# НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ ЕЕ РЕФОРМИРОВАНИЯ

**Л.П. Шелудько[1], Л.И. Пешков[2]**

[1]Самарский государственный технический университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
тел/факс: +7 (846) 278-44-00

[2]ООО «Турбоэнергомаш»
443020, Самара, ул. Венцека, 81, Россия
тел: 8-927-653-11-33

***Ключевые слова:*** *электроэнергетика, реформирование, малая энергетика, мини-ТЭЦ, газотурбинные конвертированные авиадвигатели, диверсификация, моторостроительные предприятия*

**Abstract**
In the article is examined the problem of the development of small power engineering with the power supply of users from mini-CHP with the gas-piston and gas turbine engines.

## Введение

В перестроечный период реформирование энергетики проводилось в соответствии с положениями Концепции Стратегии ОАО РАО «ЕС России» [1]. Экономический спад в стране и применяемая тарифная политика привели к сокращению объема промышленных тепловых нагрузок, уменьшению располагаемой электрической мощности ТЭЦ, к строительству предприятиями собственных мелких котельных и внедрению систем индивидуального отопления и, как следствие, к снижению экономичной выработки электроэнергии на тепловом потреблении. Мероприятия по преобразованию электроэнергетики в самостоятельные генерирующие компании при сохранении государственной собственности на транспорт электроэнергии были проведены с целью сдерживания роста тарифов на энергоносители, повышения топливной экономичности электростанций и предотвращения возникновения дефицита в электроснабжении потребителей. Для экономии топлива и повышения экономичности планировалось техническое перевооружение энергетики, прежде всего с использованием парогазовых технологий и повышением эффективности когенерационной выработки электрической и тепловой энергии. Но в течение пятнадцатилетнего периода реформирования электроэнергетики (1991-2006 гг.) техническое перевооружение электрических станций и сетей практически не осуществлялось. И только несколько лет назад начались работы по их частичной модернизации и реконструкции, в основном, с использованием импортного энергетического оборудования [2]. Оказалось, что в связи с его высокой стоимостью, задержками в финансировании и недостатками в организации работ сроки окупаемости капиталовложений в строительство парогазовых установок возросли до 20-25 лет, причем зачастую временные затраты на их проектирование и строительство превысили пятилетний рубеж. Кроме того, в этот период утратили свой высокий потенциал специализированные научно-исследовательские и проектные организации, распались мощные строительно-монтажные тресты, частично обанкротились и резко снизили выпуск конкурентной продукции отечественные предприятия энергетического машиностроения.

В этих условиях становится стратегически важной ориентация не только на проблемы «большой» энергетики [3], но и на скорейшее формирование условий для развития менее затратной и быстро окупаемой «малой» энергетики, базирующейся на использовании отечест-

венного энергетического оборудования. При этом нужно учитывать особую значимость проблем энергообеспечения потребителей в жилищно-коммунальной сфере городов и сельских населенных пунктов. У них высока степень износа оборудования энергетического хозяйства, систем транспорта электрической и тепловой энергии. В неудовлетворительном состоянии находится значительная часть электрических и тепловых сетей, износ которых достигает 70-75%. Велика доля теплоснабжения потребителей от устаревших котлов, имеющих низкие КПД. Из-за износа энергетического оборудования увеличились ремонтные затраты, возросли потери электрической и тепловой энергии, снизилась надежность энергоснабжения потребителей, повысились тарифы. Так, например, в Самарской области тарифы на электрическую энергию у конечных потребителей зачастую превышают 3 руб. за кВт/ч, на тепловую энергию достигают 1500 руб./Гкал. Потери при транспорте электроэнергии к удаленным потребителям достигают 18-20%. Из-за ухудшения показателей и задержек в техническом перевооружении действующих электростанций, особенно региональных ТЭЦ, стала особенно актуальной задача создания децентрализованных систем энергообеспечения потребителей.

Очевидно, что реальная конкуренция между производителями на энергетическом рынке может возникнуть только при массовом развитии малой и средней энергетики**.**

В настоящее время существуют два направления развития теплофикации:

- модернизация ТЭЦ по парогазовой технологии;
- строительство мини-ТЭЦ на базе газопоршневых и газотурбинных установок малой и средней мощности с формированием на их основе локальных систем теплоснабжения.

Основными преимуществами когенерационных мини-ТЭЦ по сравнению с централизованными системами энергоснабжения являются:

- значительное уменьшение потерь при транспорте электрической и тепловой энергии;
- повышение надежности электро- и теплоснабжения потребителей;
- наличие системной эффективности, связанной с частичным вытеснением с энергетического рынка низко экономичных ТЭС, обеспечением экономии потребляемого топлива и улучшением экологии.

Создание автономных децентрализованных систем энергоснабжения основывается на применении газопоршневого и газотурбинного энергооборудования. Для их внедрения требуются сравнительно небольшие капиталовложения. Вследствие более высокого КПД, себестоимость энергии на мини-ТЭЦ значительно ниже, чем у устаревших паротурбинных электростанций. Мини-ТЭЦ могут использоваться в качестве основного или резервного источника электроэнергии, при работе, как в автономном режиме, так и совместно с централизованными системами электроснабжения и теплоснабжения.

Целесообразность их широкого внедрения определяется следующими факторами:

- тенденцией повышения стоимости топлива и тарифов на электрическую и тепловую энергию;
- высокими потерями при транспорте электроэнергии в отдаленные города и районные центры;
- наличием законодательной базы для создания систем независимого производства энергии;
- возможностью увеличения объема производства относительно дешевой электроэнергии на базе существующего теплового потребления в сфере ЖКХ.

Совместное производство тепла и электроэнергии на мини-ТЭЦ обеспечивает максимальную экономию топливных ресурсов. Коэффициент использования тепла топлива для них достигает 84-86%. Их умеренная стоимость и высокая тепловая экономичность позволяет снизить сроки окупаемости капиталовложений до 4-5 лет, то есть в несколько раз меньших, чем в большой энергетике. При строительстве мини-ТЭЦ также не менее важен фактор их возможного выхода на оптовый и розничный рынки электроэнергии. Доходы от продажи части элек-

троэнергии, временно избыточной для потребителей, могут способствовать сдерживанию роста тарифов для населения.

В США, Великобритании, Германии и в ряде других стран законодательно поддержано развитие независимых систем генерации электроэнергии. Приняты законы, дающие льготы владельцам малых энергетических установок и обязывающие энергетические компании покупать излишки электроэнергии по ценам, близким к отпускным тарифам. Запрещено использование природного газа на вновь вводимых и реконструируемых ТЭЦ и крупных котельных без применения газотурбинных энергетических установок.

В Москве и в ряде областей России приняты Программы развития «малой» энергетики, предусматривающие преимущественное строительство газотурбинных и газопоршневых мини-ТЭЦ с использованием отечественных и импортных энергоустановок. Создание мини-ТЭЦ возможно по различным схемам. Наиболее простой, и дешевый вариант – надстройка котельных газопоршневыми или газотурбинными агрегатами, утилизирующими теплоту отработавших газов двигателей. Но с учетом суточной и сезонной неравномерности тепловых нагрузок отопления и горячего водоснабжения для этого варианта характерно резкое снижение когенерационной выработки энергии и их тепловой экономичности в неотопительный период года. Удельные капиталовложения в мини-ТЭЦ с отечественными газопоршневыми двигателями несколько выше, чем в варианте надстройки этими агрегатами котельных и составляют 500-650 $/кВт, а с зарубежными – 750-850 $/кВт. Высокая степень заводской готовности энергоагрегатов позволяет снизить сроки строительно-монтажных и пуско-наладочных работ до 2-3 месяцев. Полный цикл изготовления и монтажа составляет от 6 месяцев для газопоршневых и до 15-18 месяцев для газотурбинных мини-ТЭЦ мощностью 25-30 МВт.

Строительство независимых энергоисточников должно удовлетворять не только частным финансовым интересам заказчика, но и давать системный экономический эффект. Необходим комплексный подход с учетом экономических и социальных условий региона. Одним из существенных факторов, определяющих экономическую эффективность строительства мини-ТЭЦ, является то, что на них достигается существенная экономия расхода потребляемого газа, тем более с учетом ужесточения лимитов на его поставку и ежегодного увеличения стоимости на 14-15%. Наряду с получением значительной экономии топлива при этом также повышается энергетическая независимость региона. При выборе тепловой схемы и оборудования мини-ТЭЦ должны учитываться климатические факторы, присоединенные тепловые и электрические нагрузки, должен быть выбран открытый или закрытый тип теплофикационной системы, учтены графики потребления тепловой и электрической энергии жителями и социальными объектами для характерных временных периодов года, определена целесообразность наличия связей с электрическими сетями.

При их единичной мощности менее 8-10 МВт более высокие технико-экономические показатели, по сравнению с газотурбинными, имеют газопоршневые мини ТЭЦ, определяемые, в основном, их более высокой тепловой экономичностью. Наряду с этим для них характерен ряд недостатков:

- меньшая, чем у газотурбинных, тепловая мощность, относимая к 1 МВт их электрической мощности;
- сложность размещения в жилой зоне городов из-за повышенных выбросов вредных веществ;
- большие удельные затраты на техобслуживание (прежде всего на масло) и на регламентные работы.

По этим причинам в новых микрорайонах городов более предпочтительно строительство газотурбинных мини-ТЭЦ с мощностью большей 20 МВт. Учитывая сравнительно небольшие затраты, необходимые для строительства мини-ТЭЦ, ориентация на развитие «малой» энергетики позволит привлечь значительные инвестиции от внутренних и внешних инвесторов, раз-

вивать лизинговый принцип финансирования и дать импульс для загрузки отечественных моторостроительных предприятий.

В ряде регионов Самарской области имеется дефицит в электроснабжении малых городов и населенных пунктов, прежде всего в следствие недостаточной пропускной способности ЛЭП и мощности подстанций. Из-за большой степени их износа и повышенной аварийности для многих удаленных населенных пунктов характерна пониженная надежность электроснабжения. В то же время в ведущем моторостроительном предприятии Самарской области – ОАО «Кузнецов» – разработаны газотурбинные двигатели наземного применения мощностью от 4 до 30 МВт, по уровню технологий и экономичности соответствующие передовому международному уровню. Однако, в прошедшие годы из-за недостаточного финансирования многие из этих агрегатов не доведены до высокого эксплуатационного уровня. Большой потенциал Самарского моторостроительного комплекса используется только для производства газовых турбин газоперекачивающих агрегатов ОАО «Газпром». Не уделяется внимание созданию эффективных газовых турбин энергетического назначения. В то же время, это направление является наиболее перспективным для использования научного и производственного потенциала моторостроительных предприятий в условиях значительного сокращения на них оборонных заказов. Несмотря на перечисленные проблемы, «малая» энергетика в стране набирает обороты. Начиная с 2000 года, было введено в эксплуатацию свыше 600 газотурбинных установок отечественного производства с диапазоном мощностей от 2 до 30 МВт. При этом около 70% этих агрегатов были пущены в 2005-2011 годах.

При реализации программ развития объектов «малой» энергетики в Самарской области, на базе ГТУ, разработанных в ОАО «Кузнецов», наиболее перспективны следующие направления:

- создание мини ТЭЦ на базе двигателя НК-127 мощностью 4 МВт;
- в малых городах и микрорайонах экономически эффективно строительство мини-ТЭЦ электрической мощностью до 50 МВт с использованием энергоблоков на базе газотурбинных двигателей НК-14Э и НК-18Э;
- использование сжиженного природного и попутного нефтяного газа как основного и резервного топлива на мини-ТЭЦ и в котельных.

В Самарских техническом и аэрокосмическом университетах разработаны технические решения, обеспечивающие повышение электрической, тепловой мощности и экономической эффективности газотурбинных мини-ТЭЦ за счет применения в их составе противодавленческих паровых турбин, использования в отопительный период работы промежуточного дожигания топлива в котлах-утилизаторах, применения в них сжиженного газа.

В качестве примера эффективного применения газотурбинных установок, разработанных в Самаре, следует отметить строительство и ввод в г.Уральске (Республика Казахстан) ГТУ-ТЭЦ мощностью 54 МВт с двигателями НК-18ЭСТ. Важно, что при должной организации работ, своевременном финансировании, поддержке строительства местными органами власти и при установлении эффективных кооперативных связей с рядом предприятий России, Украины и Казахстана удалось обеспечить кратковременный период проектирования и строительства ГТУ-ТЭЦ. Уже через 12 месяцев после начала финансирования (декабрь 2009 г.) был произведен пуск первого агрегата. При этом важно, что практически все энергетическое оборудование было произведено в странах СНГ. Ввод в эксплуатацию этой ГТУ-ТЭЦ решил проблему дефицита электроэнергии в Западно-Казахстанской области, повысил надежность ее энергоснабжения, учитывая, что она не была связана с централизованной энергосистемой Казахстана.

Системная эффективность мероприятий по развитию малой энергетики и строительству мини-ТЭЦ определяется следующими факторами:

- необходимостью ограничения темпа роста тарифов на энергоносители и повышения надежности энергообеспечения потребителей, особенно в малых городах и населенных пунктах;
- возможностью значительной экономии топлива, повышения эффективности электро- и теплоснабжения потребителей, обеспечения их энергетической независимости;
- экономической целесообразностью использования газопоршневых и газотурбинных энергоустановок малой мощности, производимых на отечественных моторостроительных предприятиях.

**Заключение**

Анализируя выше изложенное, можно прийти к выводу о необходимости частичной корректировки Энергетической стратегии России[2] с учетом актуальности и экономической эффективности развития в регионах страны «малой» энергетики, связанной, прежде всего, с вводом в эксплуатацию в новых микрорайонах, малых городах и населенных пунктах многих газопоршневых и газотурбинных мини-ТЭЦ. Для этого необходима диверсификация продукции, производимой отечественными моторостроительными предприятиями авиационного профиля, привлечение в эту отрасль инвестиций с целью доводки до конкурентного уровня уже разработанных и выпускаемых конвертированных энергоустановок, созданных на базе авиадвигателей. Их серийное производство может в короткие сроки обеспечить строительство быстро окупаемых экономичных газотурбинных и парогазовых мини-ТЭЦ в России и странах СНГ, а также позволит успешно выйти на энергетические рынки ряда зарубежных стран Ближнего и Среднего Востока.

**Список литературы**

[1] Концепция Стратегии ОАО РАО «ЕС России» на период 2003-2008гг. «5+5».
[2] Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена постановлением Правительства РФ № 1715р от 13 июня 2009 г.
[3] Пешков Л.И., Шелудько Л.П. Об экономической стратегии модернизации ТЭЦ территориальных генерирующих компаний. «Вести в электроэнергетике». №5, 2005г. С.39-44.

# РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ И ФИЗИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ ЗАРЯДА ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

**В.Е. Гвоздев, Г.И. Таназлы, А.И. Таназлы**

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия
wega55@mail.ru
тел: +7 (347) 272-74-65, факс: +7 (347) 273-78-35

***Ключевые слова:*** *емкостной накопитель энергии, зарядное устройство, функциональная структура, физическая структура*

**Abstract**
In this article describes energy's capacitor stores charge's system's functional and physical structure designing.

## Введение

Емкостные накопители электрической энергии используются в достаточно большом количестве технических устройств. Частной, однако не имеющей исчерпывающего решения проблемой, возникающей при разработке таких накопителей энергии, является проблема создания высоковольтных (100 – 200 киловольт) систем заряда, который питается от достаточно низковольтного (например, 20 вольт) источника питания. В настоящей статье рассматривается ряд вопросов разработки таких систем заряда.

## 1 Структура системы электропитания импульсной нагрузки

Проблеме преобразования низковольтного постоянного напряжения в высоковольтное для заряда и разряда емкостных накопителей энергии посвящено достаточно большое количество литературных источников, среди которых можно выделить следующие [1,2,3,4].

Однако разработка устройств для заряда емкостных накопителей энергии с высокими техническими характеристиками является сложной научно-технической задачей, не имеющей в настоящее время исчерпывающего решения.

В [1] рассматривается структурная схема системы электропитания импульсной нагрузки. Характеристики импульсной нагрузки и имеющейся в распоряжении разработчика системы электроснабжения, как правило, не согласованы. Поэтому возникает необходимость включения между системой электроснабжения (в рассматриваемом случае - источник низковольтного постоянного напряжения) и нагрузкой дополнительного устройства, которое называют источником вторичного электропитания (ИВЭП), задачей которого и является согласование характеристик системы электроснабжения и нагрузки. Наиболее общая структура ИВЭП с емкостным накопителем энергии (ЕНЭ), приведенная на рисунке 1, как и любое устройство преобразовательной техники, содержит энергетическую часть и систему управления (СУ). Энергетическая часть, в свою очередь, включает в свой состав в общем случае три функциональные части: собственно емкостный накопитель энергии, зарядное устройство (ЗУ), разрядное устройство (РУ).

При этом функцию согласования характеристик ИВЭП с системой электроснабжения выполняют ЗУ и ЕНЭ, а функцию согласования с характеристиками импульсной нагрузки РУ и ЕНЭ.

В рассматриваемом случае ИВЭП предназначен для питания импульсных нагрузок и построен так, что ЗУ и РУ функционируют на различных интервалах времени и слабо взаимодействуют между собой.

Влияние процессов в разрядном контуре на процессы в зарядном проявляются в изменении только одного параметра - напряжения на ЕНЭ в начале зарядного процесса. Поэтому в рассматриваемом случае процессы заряда и разряда ЕНЭ можно рассматривать независимо.

Система управления обрабатывает сигналы, поступающие в общем случае из четырех каналов входной информации: $U_d$, $U_{O.C1}$, $U_C$, $U_{O.C2}$, и формирует управляющие сигналы на входах двух блоков энергетической части - ЗУ и РУ. Первый из входных каналов несет информацию о входном напряжении $U_d$ , которое может изменяться в процессе работы по различным причинам. Сигнал $U_{O.C1}$ информирует о состоянии зарядного устройства в данный момент времени. В зависимости от типа и принципиальной схемы ЗУ в качестве $U_{O.C1}$ используется один или несколько параметров, характеризующих состояние ЗУ. Сигнал $U_C$ содержит информацию об энергии, запасенной в емкостном накопителе на данный момент времени, который используется для корректировки зарядного процесса. Система управления осуществляет анализ сигнала $U_C$ и сравнение этого сигнала с теоретически полученной величиной. В соответствии с разностью этих величин осуществляется коррекция процесса заряда. Кроме этого система управления обеспечивает режимы работы элементов и узлов системы, гарантирующие их надежную работу. Сигнал $U_{O.C2}$ несет информацию о состоянии нагрузки. В рассматриваемом нами случае он может быть простейшим и предназначен для блокировки ЗУ на время разряда емкостного накопителя.

На основании полученной информации СУ формирует согласованные управляющие воздействия $U_{УПР\,1}$ и $U_{УПР2}$, определяющие все параметры зарядного процесса: закон изменения зарядного тока, алгоритмы включения секций ЗУ (если они есть), время отключения ЗУ от ЕНЭ на время его разряда и т.д. Любая из составных частей структуры, приведенной на рисунке 1 (за исключением ЕНЭ) не является обязательной для всех случаев применения ИВЭП.

Из структурной схемы (рисунок 1) следует, что основным элементом системы заряда емкостных накопителей энергии являются зарядное устройство.

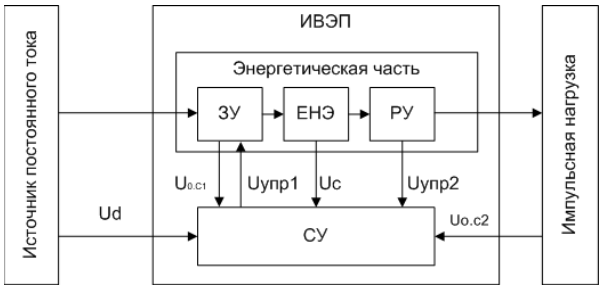



Рисунок 1 – Структурная схема системы электропитания импульсной нагрузки

Основные требования, предъявляемые к ЗУ, сводятся к тому, что оно должно обеспечивать более равномерное, чем это обусловлено нагрузкой потребление энергии от источника постоянного тока. Кроме этого ЗУ должно обеспечивать согласование напряжения системы электроснабжения с напряжением на ЕНЭ в конце интервала заряда (в рассматриваемом случае напряжение системы энергоснабжения равно 20 В, а напряжение на ЕНЭ в конце интервала заряда равно 100…200 кВ).

Кроме этого ЗУ должно обеспечивать отключение ЕНЭ от системы энергоснабжения на время его разряда и реализацию требуемых алгоритмов управления, как по энергетическим, так и по динамическим характеристикам (способность пропускать необходимое количество энергии при заданных временных ограничениях).

Так как зарядные устройства входят в класс систем силовой электроники, на них в полной мере распространяются требования, предъявляемые к таким системам: высокий КПД, малая масса, объем, высокие показатели надежности.

## 2 Сопоставительный анализ методов преобразования энергии в зарядных устройствах емкостных накопителей энергии

Анализ различных зарядных устройств [1, 2, 4, 5] емкостных накопителей энергии показывает, что основным элементом эффективных ЗУ является звено, осуществляющее преобразование постоянного тока в переменный, т.е. звено переменного тока. Различные варианты реализации этого звена и определяют методы преобразования энергии, являясь одновременно основой для классификации зарядных устройств емкостных накопителей.

Рассмотрим возможные методы преобразования энергии в зарядных устройствах емкостных накопителей в соответствии со структурной схемой, приведенной на рисунке 2, где на уровне «Преобразование энергии» рассматриваются два класса устройств: с механическим преобразованием энергии и с электрическим преобразованием энергии. На уровне «Получение переменного напряжения» для класса устройств с механическим преобразованием энергии выделены машинные генераторы, а для класса устройств с электрическим преобразованием энергии - прерыватели и инверторы.

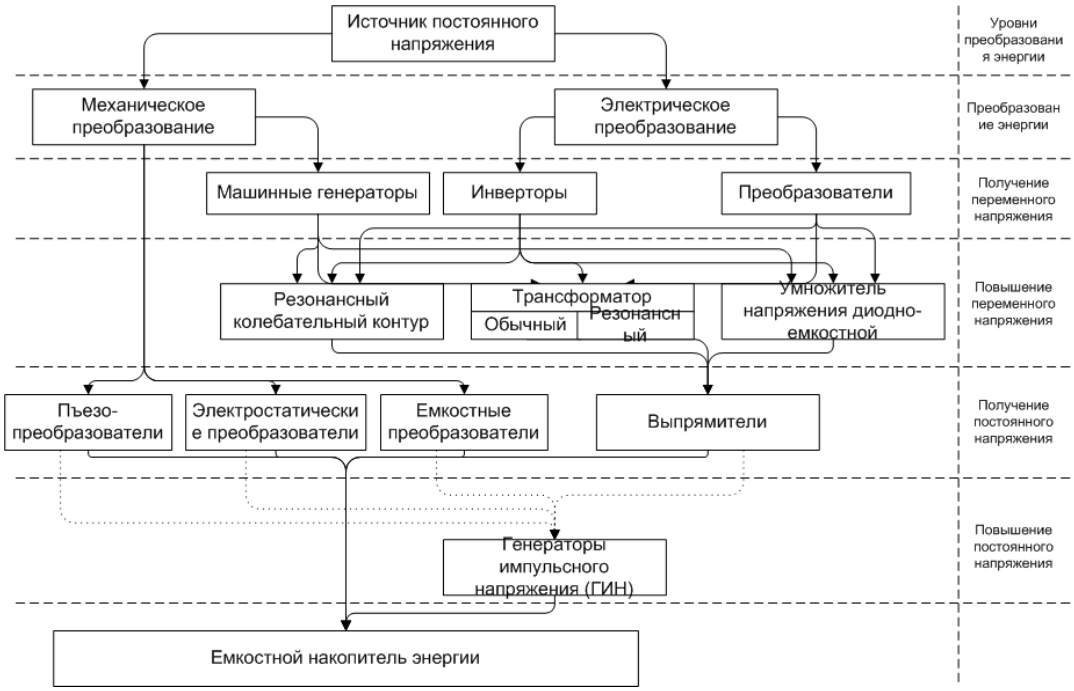



Рисунок 2 – Структурная схема методов преобразования энергии в ЗУ ЕНЭ

Поскольку получение высоких напряжений непосредственно на выходе как машинных генераторов, так и прерывателей и инверторов затруднено, на структурной схеме приведены методы повышения переменного напряжения, которые осуществляются с помощью резонансных контуров, трансформаторов и диодно-емкостных умножителей напряжения. Все перечисленные методы повышения переменного напряжения для передачи энергии емкостному накопителю требуют применения выпрямителей. В случае, если величина полученного после вы-

прямителя напряжения недостаточна, на блок-схеме на уровне «Повышение постоянного напряжения» применяется генератор импульсного напряжения (ГИН). Обособленными на блок-схеме являются методы получения высокого постоянного напряжения с помощью пьезопреобразователей, электростатических преобразователей, поскольку при использовании этих методов этапы «Получение переменного напряжения», «Повышение переменного напряжения», «Получение постоянного напряжения» не требуются.

В ряде случаев для увеличения коэффициента усиления зарядного устройства по напряжению возможно каскадное включение некоторых элементов рассматриваемой структурной схемы.

Рассмотрение различных путей от источника постоянного напряжения к емкостному накопителю по структурной схеме (рисунок 2) приводит к перечислению возможных методов преобразования энергии в зарядных устройствах емкостных накопителей.

Сопоставительный анализ различных методов преобразования энергии, а также схем зарядных устройств может производиться по следующим критериям:

- коэффициент усиления по напряжению;
- время заряда емкостного накопителя;
- коэффициент полезного действия;
- масса;
- габариты;
- надежность;
- помехозащищенность;
- управляемость;
- устойчивость к излучению;
- промежуточные уровни преобразования энергии;
- сопряжение с промежуточными уровнями преобразования энергии.

На данном этапе рассмотрения не представляется возможным определить численные значения приведенных критериев, поскольку речь идет о классах технических устройств, и отдельные устройства внутри каждого класса при оценке их по выше приведенным критериям, во-первых, могут существенно отличаться друг от друга и, во-вторых, численные значения перечисленных критериев для конкретных устройств в полном объеме, как правило не определены. Их определение для каждого устройства представляется самостоятельной задачей.

Следует также отметить, что вопрос о независимости приведенных критериев или о степени и характере их зависимости должен решаться в каждом конкретном случае.

Поэтому проведем рассмотрение возможных методов преобразования энергии в зарядных устройствах методом экспертных оценок с использованием трехбалльной шкалы «+» - преимущество, «-» - недостаток, «0» - не определено.

В таблице 1 приведены экспертные оценки основных методов преобразования энергии, представленных на структурной схеме (рисунок 2).

Отдельным классом рассматриваются пьезоэлектрические, электростатические и емкостные преобразователи энергии [6]. К основным их достоинствам относится высокая помехозащищенность и отсутствие или минимальное количество уровней промежуточного преобразования энергии. К недостаткам следует отнести наличие уровней преобразования электрической энергии в механическую и обратного преобразования, что снижает оценки по таким критериям, как время заряда емкостного накопителя, КПД, масса, габариты, управляемость.

Таблица 1 – Экспертные оценки методов преобразования энергии

| | Методы преобразования энергии и их оценки | | | |
|---|---|---|---|---|
| Критерии | Механическое преобразование | | Электрическое преобразование | |
| | Пьезо, электростатические, емкостные преобразователи | Машинные генераторы | Инверторы | Прерыватели |
| Коэффициент усиления по напряжению | НО | - | + | - |
| Время заряда емкостного накопителя | - | - | + | + |
| Коэффициент полезного действия | - | - | + | + |
| Масса | - | - | + | + |
| Габариты | - | - | + | + |
| Надежность | НО | - | + | + |
| Помехозащищенность | + | + | - | - |
| Управляемость | - | + | + | + |
| Устойчивость к излучению | - | + | - | - |
| Промежуточные уровни преобразования энергии | + | - | - | - |
| Сопряжение с промежуточными уровнями преобразования энергии | + | + | + | - |

Несколько большее количество преимуществ по сравнению с только что рассмотренными методами преобразования энергии в зарядных устройствах имеет метод, основанный на применении машинных генераторов, которые (с использованием промежуточных уровней преобразования энергии) могут обеспечить помехозащищенность и относительно высокую устойчивость к излучению. Предпочтительным среди рассматриваемых методов преобразования энергии в зарядных устройствах, в соответствии с проводимой экспертной оценкой, является метод, основанный на применении автономных инверторов, основные недостатки которых ограничиваются низкой помехозащищенностью и устойчивостью к излучению, а также необходимостью для получения требуемого коэффициента усиления по напряжению применения промежуточных уровней преобразования энергии.

Метод преобразования энергии, основанный на применении прерывателей проигрывает инверторному методу в КПД и эффективности сопряжения с устройствами промежуточных уровней преобразования энергии.

## 3 Требования, предъявляемые к зарядным устройствам емкостных накопителей энергии

В [1] рассматривается структурная схема, определяющая факторы, влияющие на основные показатели зарядного устройства (рисунок 3). В этой структурной схеме устанавливаются взаимосвязи между такими показателями зарядного устройства как КПД, коэффициент использования источника питания, масса, объем и структурой и параметрами энергетической части ЗУ, алгоритмами управления и режимом заряда ЕНЭ.

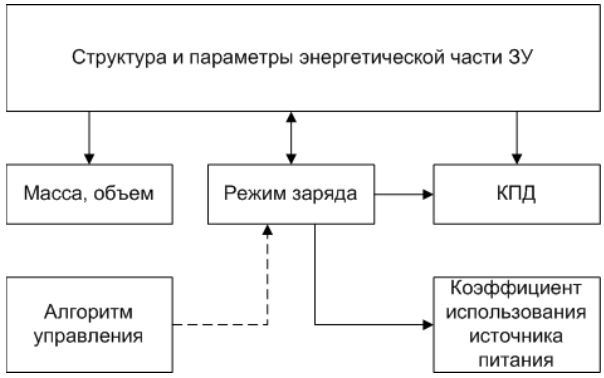



Рисунок 3 – Функциональные характеристики простейшего потока событий

Режимы работы различных элементов ЗУ определяются прежде всего совокупностью временных зависимостей токов в силовых цепях ЗУ - режимом заряда. Однако режим заряда является не единственным фактором, влияющим на показатели ЗУ, сам он зависит от ряда других первичных факторов.

Первую группу первичных факторов, влияющих на показатели ЗУ, представляют собой внутренние параметры и схема энергетической части ЗУ (рисунок 3). В ЗУ с неуправляемым зарядным процессом показатели определяются только факторами этой группы, причем влияют они на показатели как непосредственно (в выражения для различных показателей входят внутренние параметры: величины индуктивностей, емкостей и т.д.), так и косвенно, определяя временные зависимости токов, напряжений в различных цепях ЗУ. Изменение временных зависимостей токов приводит к изменению различных функционалов этих зависимостей (действующих, максимальных, средних значений), которые определяют все основные показатели ЗУ.

В ЗУ с управляемым зарядным процессом на показатели действует также и вторая группа первичных факторов, определяемая алгоритмом управления зарядным процессом. Воздействие этих факторов определяется только влиянием их на зарядный режим. (рисунок 3). Наиболее распространенными алгоритмами управления зарядным процессом принято считать [1, 3] следующие алгоритмы:

- с постоянным зарядным током;
- с постоянной потребляемой от источника мощностью;
- с минимальным временем заряда;
- с максимальным КПД.

Массогабаритные параметры ЗУ в решающей степени зависят от схемы и внутренних параметров его энергетической части, поэтому исследовать влияние зарядного режима на эти показатели можно только для определенного не слишком широкого класса ЗУ.

На уровне получения переменного напряжения (рисунок 2) по результатам экспертной оценки в соответствии с примененными критериями предпочтительным является применение инверторов. Известно, что инверторы представляют собой обширную группу устройств сило-

вой электроники, обеспечивающих преобразование постоянного напряжения в переменное и обладающих широким спектром функциональных характеристик.

Зарядное устройство, как правило кроме автономного инвертора, включает в себя такие функциональные блоки как токоограничивающие элементы и дозаторы энергии. На первом уровне выбора схемы влиянием этих блоков можно пренебречь. Исходя из этого, сформулируем требования к схемам автономных инверторов, предназначенных для работы в зарядных устройствах ЕНЭ.

- Обеспечение устойчивой работы схемы инвертора в диапазоне изменения параметров нагрузки от короткого замыкания (разряженная накопительная емкость) до холостого хода (полностью заряженная накопительная емкость).
- Максимально возможная и регулируемая раскачка напряжения в инверторе.
- Максимально возможная (для заданных типов вентилей) мощность, снимаемая с одного конструктивного модуля.
- Коэффициент полезного действия.
- Помехоустойчивость.
- Возможность работы без реактивных коммутирующих элементов.
- Дозирование энергии силовой схемой.
- Перегрузочная способность.
- Возможность реализации различных траектории заряда ЕНЭ.
- Надежность.

## 4 Классификация зарядных устройств и их схемные

Классификация зарядных устройств сходна с классификацией базовых преобразователей переменного или постоянного напряжения в постоянное, имеющих кроме всего прочего элементы, присущие зарядным устройствам. Эти элементы, способы регулирования тока в ЗУ, основные типы базовых преобразователей и возможные их сочетания классифицируются структурной схемой [1], которая применяется в зависимости от параметров ЕНЭ и источников питания (рисунок 4). Выбирая за основу данную классификацию, рассмотрим представленные виды ЗУ с учетом требований технического задания.

Простыми являются нерегулируемые преобразователи, к которым относятся неуправляемые выпрямители и инверторы с неизменным алгоритмом работы на ЕНЭ. Наиболее распространенными среди таких преобразователей являются преобразователи с жесткой выходной характеристикой. Для использования преобразователей с жесткой выходной характеристикой в качестве ЗУ их необходимо дополнить токоформирующими элементами (ТФЭ), которые ограничивают ток в различных цепях ЗУ в зависимости от требований.

Наиболее простым и универсальным ТФЭ может быть резистор, который включается последовательно в зарядную цепь ЕНЭ, однако использование резистивного ТФЭ связано с большими потерями энергии, поэтому его использование ограничено маломощными ЗУ (рисунок 5б).

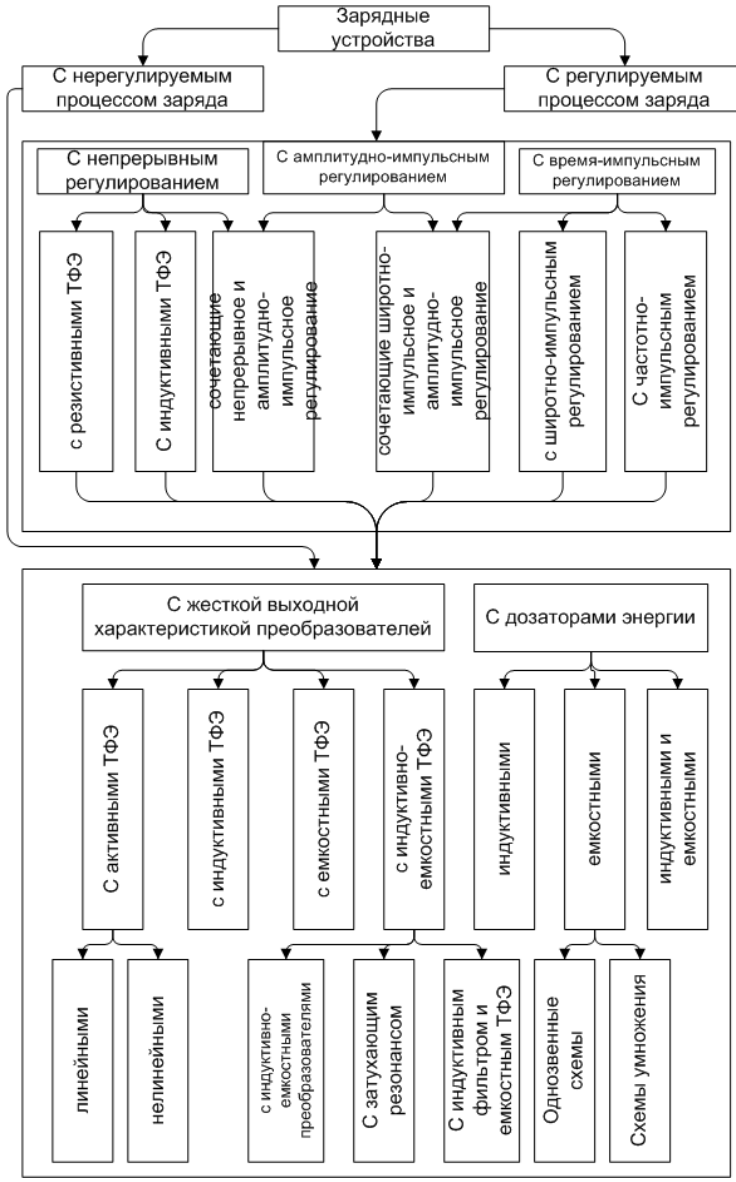



Рисунок 4 – Классификация зарядных устройств емкостных накопителей

Лучшими показателями обладают ТФЭ на реактивных элементах: индуктивностях, емкостях или их сочетаниях (рисунок 5 в, г, д, е, ж). Но в отличии от резистивных ТФЭ они применяются, как правило, в цепях переменного тока. Особенно хорошие показатели получаются в схемах с затухающим резонансом.

Другой класс базовых преобразователей составляют преобразователи, где ЕНЭ являются составной частью ЗУ. Величина энергии, передаваемая в ЕНЭ, определяется, т.е. дозируется, параметрами схемных элементов преобразователя (рисунок 6 а, б, в, г, д, е), поэтому они называются преобразователями с дозаторами энергии. Эта энергия коммутирующих элементов, которая передается в нагрузку преобразователей с вынужденной или естественной коммута-

цией. Сюда же относится схема ЗУ с умножителями напряжения (рисунок 7 а, б, в), в которых емкости умножителя являются дозаторами.

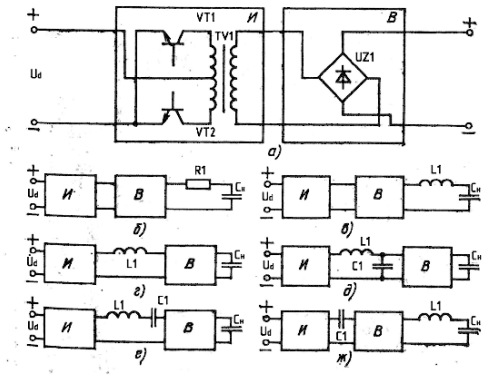



Рисунок 5 – Схемы зарядных устройств на базе преобразователей с жесткими выходными характеристиками с различными ТФЭ:

а) базовая схема;
б) схема с резистивными ТФЭ;
в) схема с индуктивным ТФЭ в цепи постоянного тока;
г) схема с индуктивным ТФЭ в цепи переменного тока;
д), е) схемы с индуктивно-емкостными ТФЭ;
ж) схема с индуктивным и емкостным ТФЭ, разнесенных по цепям переменного и постоянного тока

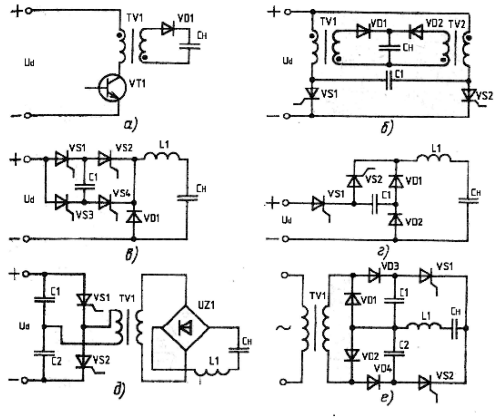



Рисунок 6 – Схемы зарядных устройств с индуктивными и емкостными дозаторами, которые являются схемными элементами преобразователей

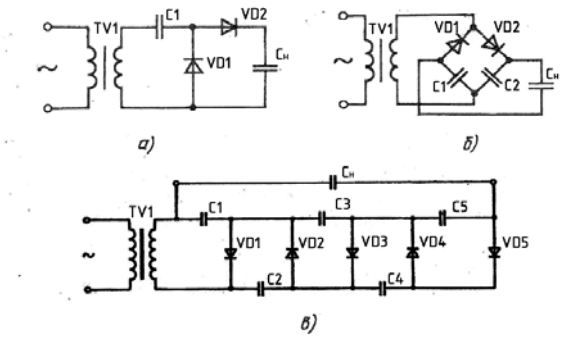



Рисунок 7 – Схемы зарядных устройств с емкостными дозаторами и умножением выходного напряжения

Однако данный класс преобразователей ЗУ не позволяет обеспечить коэффициент усиления по напряжению( $K_u$) $K_u>10^2$ . Необходимость заряда ЕНЭ до напряжения, значительно превышающего напряжение источников питания ($K_u=10^3…10^4$ ), предопределяет, как правило, использование трансформаторов, которые наиболее эффективно используются в ЗУ с регулируемым процессом заряда. К данному классу ЗУ принадлежат тиристорные регуляторы переменного напряжения (рисунок 8), а также полупроводниковые инверторы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения. К ним также относятся амплитудно-импульсные регуляторы (АИР), которые реализуются в виде регулирующих транзисторов или подмагничиваемых дросселей и трансформаторов (рисунок 9), которые могут входить в состав ЗУ на базе инверторов с жесткой выходной характеристикой. К ним относятся инверторы с жесткой выходной характеристикой, но питающиеся от источника с регулируемым выходным напряжением.

Класс регулируемых ЗУ достаточно широк, в него входят и ЗУ с группой инверторов, выходные выпрямители которых включены последовательно, а алгоритм работы построен так, что по мере заряда ЕНЭ к первому инвертору поочередно подключаются и остальные, и суммарное напряжение на выходе увеличивается ступенчато [7], а регулирующий элемент стабилизирует ток в пределах одной ступени, что уменьшает потери в регулирующем элементе или ТФЭ и повышает общий КПД ЗУ.

Следует выделить ЗУ с фазовым регулированием, когда два источника переменного напряжения с одной частотой инвертирования, работающих на одну нагрузку, в течении времени заряда ЕНЭ меняют фазу выходного напряжения относительно друг друга от противофазной до синфазной по заданному алгоритму (рисунки 10-11).

Другой принцип заложен в регулируемых ШИМ инверторах, когда группа из n инверторов работает с фазовым сдвигом $\pi/n$. В этом случае реализуется два принципа регулирования: непрерывного регулирования и амплитудно-импульсного регулирования, когда на выходе n последовательно включенных выпрямителей ток в начальный момент регулируется длительностью импульсов, затем по мере увеличения длительности их амплитуда сначала удваивается, а при длительности $t=\pi/2$ амплитуда возрастает в n раз [8] (рисунки 12-13).

Перечисленные способы регулирования процесса заряда ЕНЭ чаще всего используются комплексно, т. е. в сочетании тех или иных способов. Это позволяет использовать преимущества каждого из способов и уменьшить присущие ему недостатки.

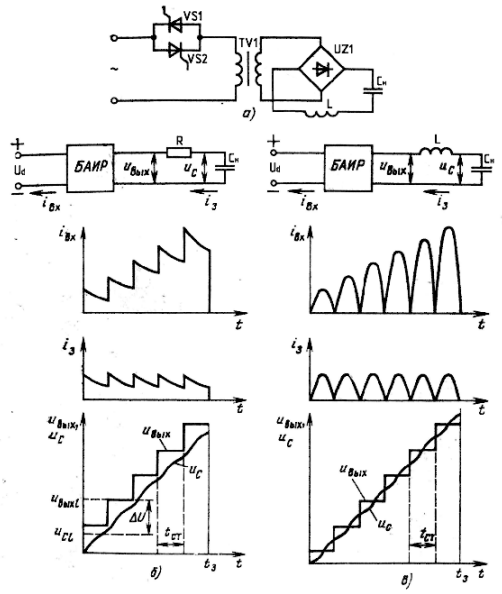



Рисунок 8 – Схемы и временные диаграммы для зарядных устройств
с импульсным регулированием зарядного процесса:

а) при импульсно-фазовом регулировании;
б) при амплитудно-фазовом регулировании и резистивном токоформировании;
в) при амплитудно-импульсном регулировании и индуктивном токоформировании.

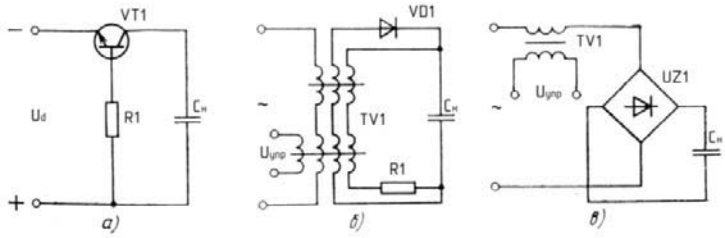



Рисунок 9 – Схемы зарядных устройств с непрерывным регулированием зарядного процесса

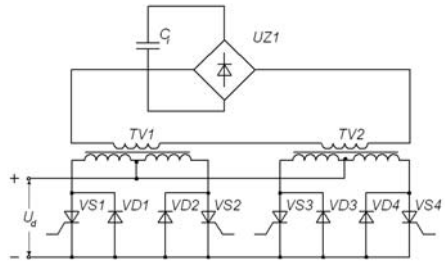



Рисунок 10 – Регулирование мощности на нагрузке сдвоенным однофазным инвертором

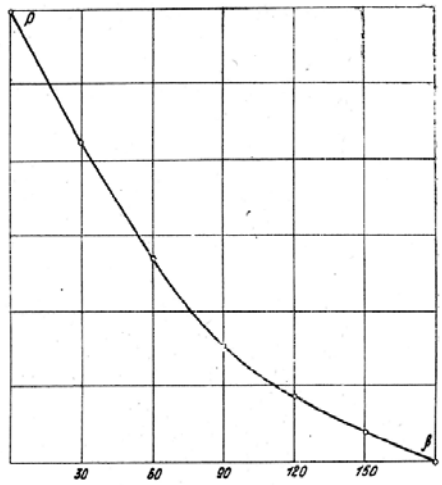



Рисунок 11 – Зависимость выходной мощности инвертора от угла регулирования β

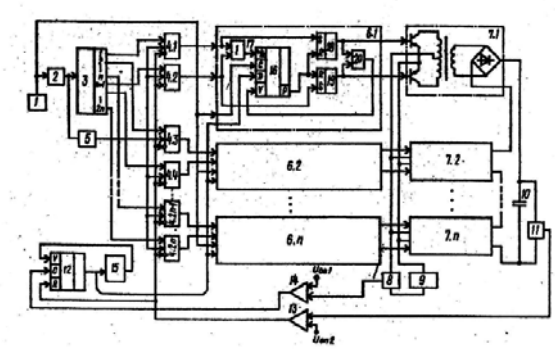



Рисунок 12 – Схема каскадного ЗУ с ШИМ-регулированием входного тока

Рисунок 13 – Алгоритм изменения выходного напряжения в зависимости от изменения длительности выходных импульсов

Как уже упоминалось выше, значительное повышение выходного напряжения достигается применением выходных трансформаторов. В соответствии с представленной структурной схемой классификации ЗУ процесс заряда может регулироваться, как на первичной, так и на вторичной стороне трансформатора. К тому же применение трансформаторов позволяет суммировать выходные напряжения нескольких источников переменного напряжения.

В статье [9] приведен сравнительный анализ ЗУ различных типов. Результаты анализа сведены в Таблицу 2. В ней представлены характеристики ЗУ по массогабаритным параметрам, коэффициенту полезного действия и коэффициенту использования источника $К_и$.

Таблица 2 – Сравнение различных способов воздействия на зарядный режим ЗУ

| *Устройство* | Способ воздействия | М, г | ή | $K_u$ |
|---|---|---|---|---|
| *Базовый преобразователь* | Транзисторный преобразователь постоянного напряжения в постоянное | 2000 | 0,935 | 1,0 |
| *Нерегулируемые ЗУ* | С резистивным ТФЭ | 10200 | 0,365 | 0,57 |
| | С индуктивным ТФЭ | 30500 | 0,84 | 0,64 |
| *Регулируемые ЗУ при зарядке постоянным зарядным током* | Непрерывное регулирование | 16600 | 0,48 | 1,0 |
| | Время - импульсное регулирование | 7300 | 0,891 | 0,5 |
| | Амплитудно - импульсное регулирование с резистивным ТФЭ | 5350 | 0,893 | 0,5 |
| | Сочетание АИР и ВИР (при 15 ступенях) | 2940 | 0,902 | 0,5 |
| | Сочетание АИР и НР (при 15 ступенях) | 3310 | 0,856 | 0,5 |
| *Регулируемые ЗУ с ИР и НР в различных режимах* | Режим неизменной потребляемой мощности | 4550 | 0,844 | 1,0 |
| | Компромиссный режим | 3570 | 0,854 | 0,84 |

**Заключение**

Обобщая результаты анализа, можно сделать вывод — наилучшими показателями по исследуемым параметрам обладает ЗУ на основе преобразователя с выходным трансформатором.

Ограничения по массогабаритным показателям ЗУ вынуждают разработчиков применить в составе ЗУ полупроводниковые преобразователи, которые, как видно из таблицы, снижают массогабаритные показатели, увеличивают КПД и коэффициент использования источника. Изучение работ в этой области доказывает: применение преобразователей повышенной частоты позволяет не только снизить массогабаритные показатели ЗУ, но и с высокой точностью управлять процессом заряда [10, 11].

**Благодарности**

Исследования, описанные в данной статье, поддержаны грантом РФФИ № 10-08-00359-а.

**Список литературы**

[1] Булатов О.Г., Иванов В.С., Панфилов Д.И. Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей – М.: Радио и связь, 1986. – 180с.

[2] Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В. Накопители энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400с.

[3] Кныш В.А. Полупроводниковые преобразователи в системах заряда накопительных конденсаторов. – Л.: Энергоатомиздат, 1981. - 160 с.
[4] Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. Киев. Наукова Думка. 1982.
[5] Маршак И.С., Дейников А.С., Жильцов В.П. Импульсные источники света. – М.: Энергия, 1978. – 472с.
[6] Ромаш Э.М., и др. Высокочастотные транзисторные преобразователи. – М.: Радио и связь, 1988. – 235с.
[7] А.с. № 834843 (СССР) Панфилов Д.И. и др. Устройство для заряда емкостного накопителя., БИ № 20, 1981.
[8] А.с. № 1780150 (СССР) Никитин А.В. и др. Устройство для заряда емкостного накопителя., БИ № 40, 1992.
[9] Малькявичюс Р.С. Статический преобразователь для заряда конденсаторной батареи и его влияние на питающую сеть. – В кн.: Электромагнитное совмещение силовых полупроводниковых преобразователей. – Таллин, 1981, с. 85…88.
[10] А.с. № 552681 (СССР) Иванов В.С, и др. Устройство для заряда емкостного накопителя энергии от сети переменного тока., БИ № 42, 1976.
[11] Патент № 2021643 (РФ). Додотченко В.В., Николаев А.Г. Система для питания импульсной нагрузки, БИ 19, 1994.

**Biography**

1) ***Гвоздев Владимир Ефимович,*** зав.каф. АПрИС УГАТУ. Дипл. инж. по электронике (УАИ). Д-р техн. наук по автоматизированным системам управлениям (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. мат. моделирования, прикладной статистики. управления сложными объектами.
2) ***Таназлы Георгий Иванович,*** доц. каф. АПрИС УГАТУ. Дипл. магистра. по информатике и ВТ (УГАТУ, 2002 г.). Канд. техн. наук по математическому моделированию, численным методам и комплексам программ (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. мат. моделирования.
3) ***Таназлы Андрей Иванович,*** асп. каф. ТК УГАТУ. Диплом специалиста по защите информации (УГАТУ, 2009 г.). Иссл. в области мат. моделирования.

# АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕННОГО МОНИТОРИНГА ЭНЕРГОПОКАЗАТЕЛЕЙ

**А.А. Темичев, Е.И. Андреев, А.В. Кычкин**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Кафедра информационных технологий и автоматизированных систем
614013, Пермь, ул. профессора Поздеева, Россия
ak@itas.pstu.ru
тел: 8-952-644-96-57

***Ключевые слова**: My-JEVis, VIDA, энергоданные, мониторинг, ошибки, надежность, тестирование*

**Abstract**
The architecture of system of the distributed monitoring of company Envidatec My-JEVis is considered. The difficulties arising at operation and development of such systems are revealed. The description of the developed software of automatic testing is presented and results of its experimental approbation are resulted.

## Введение

Вопросы рационального управления потреблением энергии решаются путем создания эффективных, активно развивающихся информационных систем телеметрии и управления, адекватно воспринимающих любые производственно-технологические изменения на объекте исследования. В соответствии с международными стандартами такие системы классифицируются как системы мониторинга энергетических показателей. Доминантным представителем такой системы является информационно-измерительная система My-JEVis компании Envidatec (Гамбург, Германия), обеспечивающая автоматический энергоучет, выявление и устранение нерациональных расходов энергоресурсов, а также поддержание энергопотребления на технологически обоснованном уровне [1].

Мониторинг энергопоказателей на основе My-JEVis представляет собой всеобъемлющую операцию, включающую в себя не только работу операторов оборудования, загружающих данные в систему непосредственно на «месте», но и работу сложных автоматических программно–аппаратных комплексов – VIDA, взаимодействующих с серверами посредством защищенных каналов сети Интернет [2]. Очевидно, что такие универсальные комплексы объединяются в сеть передачи измерительной и управляющей информации, обладающей значительной географической протяженностью. Архитектура информационно-измерительной системы My-JEVis представлена на рисунке 1.

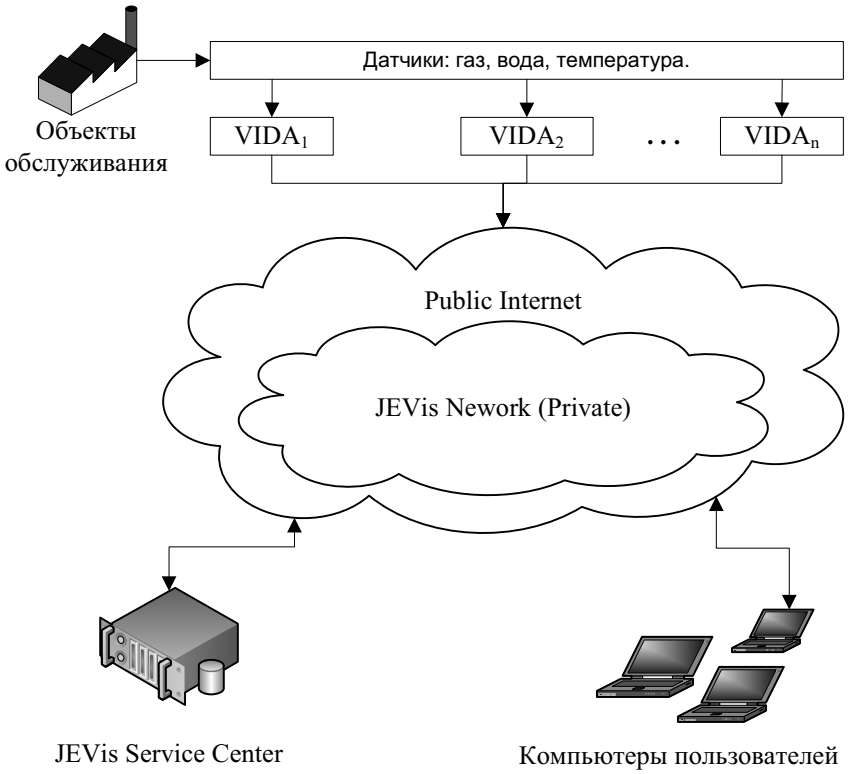



Рисунок 1 – Архитектура системы энергоменеджмента My-JEVis

Однако большое количество разнообразных требований к таким инсталляциям и особенности конкретных заказчиков в значительной степени затрудняют их внедрение и отработку процедур My-JEVis на крупных объектах. С целью минимизации человеческого фактора и повышения эффективности сбора и обработки энергопоказателей с распределенного объекта представляется актуальной и перспективной задача автоматического контроля надежности мониторирования на основе имитации сетей устройств VIDA с программами формирования ошибок различной природы для отладки процедур их выявления.

Под надежностью системы распределенного мониторинга будем понимать работоспособность и отказоустойчивость сбора, передачи, хранения и обработки данных, поступающих с измерительных устройств, количество которых непрерывно растет. Практическое применение системы контроля в составе постоянно расширяющейся My-JEVis дает возможность диагностировать оборудование VIDA, а также проводить отладку и корректировку программного обеспечения (ПО). Важность этого момента играет решающую роль, поскольку только на ранних этапах жизненного цикла ПО можно внести последние коррективы и протестировать систему перед запуском на реальном оборудовании.

## 1 Программный симулятор VIDA

Для обеспечения автоматического контроля надежности системы распределенного мониторинга энергопоказателей был разработан программный тестер, представляющий собой специальное средство, имитирующее сети устройств VIDA, который формирует данные, схожие с показателями энергопотребления, температуры, давления и др., и может быть многократно

запущен в любом сегменте сети Интернет, образуя облачную технологию. Структурная схема разработанного программного средства тестирования, представлена на рисунке 2.

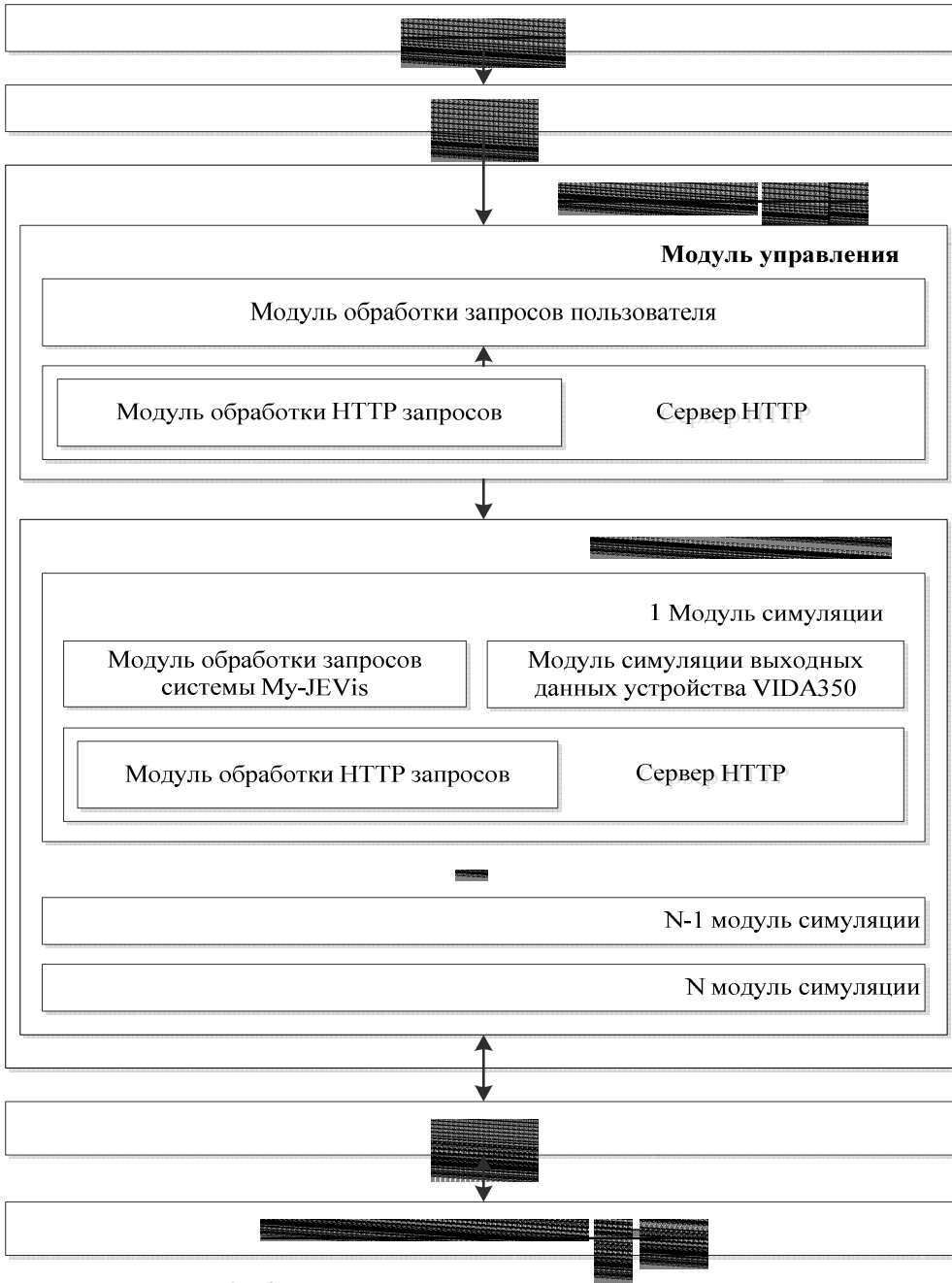



Рисунок 2 – Структурная схема программного средства тестирования

Охарактеризуем назначение основных элементов программного симулятора ПЛК VIDA350:

- «Модуль управления», – управляет параметрами модулей симуляции, в соответствии с командами пользователя. Включает в себя:

1) «Сервер HTTP» – используется для приема управляющих HTTP запросов, поступающих в симулятор устройства VIDA350 от пользователя.
2) «Модуль обработки HTTP запросов» – входит в состав HTTP сервера и используется для разбора поступивших HTTP запросов и выделения из них компонентов пользовательского управляющего запроса.
3) «Модуль обработки запросов пользователя» – используется для обработки различных типов управляющих запросов, принятых от пользователя.

- «Модуль симуляции» – симулирует выходные данные одного ПЛК линейки VIDA350. Одновременно может функционировать множество модулей симуляции, их количество определяется пользователем. Включает в себя:
  1) «Сервер HTTP» – используется для приема HTTP запросов, поступающих в симулятор устройства VIDA350 от системы My-JEVis и генерации HTTP ответов.
  2) «Модуль обработки HTTP запросов» – входит в состав HTTP сервера и используется для разбора поступивших HTTP запросов и выделения из них компонентов запроса системы My-JEVis, и передачи их модулю обработки запросов системы My-JEVis.
  3) «Модуль обработки запросов системы My-JEVis» – для обработки различных типов запросов от системы My-JEVis.
  4) «Модуль симуляции выходных данных устройства VIDA350» – для генерации данных, отправляемых в систему My-JEVis.

## 2 Модели типовых ошибок

Формирование данных с ошибками осуществляется в соответствии с математическими моделями представленными ниже. Для описания математических моделей типовых ошибок возникающих в измерительных комплексах VIDA при обработке данных, введем следующие обозначения: $e_1$ – индикатор ошибки первого типа; $e_2$ – индикатор ошибки второго типа; $e_3$ – индикатор ошибки третьего типа; $e_4$ – индикатор ошибки четвертого типа; $t_p$ – период однократного запроса равный 24 часам, или 1440 минутам; $t_{csr}$ – временной период между соседними измерениями, полученный в ПЛК(в минутах); mv – максимальное значение измеряемого параметра, заданное в системе My-JEVis; cv – текущее значение измеряемого параметра, полученное измерительным комплексом VIDA с датчика.
Модель получения выходных данных с измерительного комплекса VIDA можно представить в следующем виде:

$$D_{out}(t) = \sum_{i=0}^{t} data_i\left(e_{1i}, e_{2i}, e_{3i}, e_{4i}\right),$$

где $0 \le \left(i = i + t_{csr}\right) \le t_p$ .

Значение функции $data_i\left(e_{1i}, e_{2i}, e_{3i}, e_{4i}\right)$ представляет единичный элемент (строку), полученную за время $t_{csr}$, совокупность которых образует блок данных.
Значение функции $D_{out}(t)$ представляет собой блоки данных, сформированные за время $t_p \in t$

$$D_{out}(t) = \begin{cases} \text{Данные без ошибок}, e_1 = 0, e_2 = 0, e_3 = 0, e_4 = 0; \\ \text{Данные с ошибками}, e_1 = 1 \vee e_2 = 1 \vee e_3 = 1 \vee, e_4 = 1. \end{cases}$$

Далее рассмотрим параметры $e_1$, $e_2$ , $e_3$ , $e_4$ . Эта группа параметров задается пользователем при настройке программного тестера.

1) Параметр $e_1$ может принимать следующие значения:

$$e_1 = \begin{cases} 0, \text{если передача данных прошла успешно;} \\ 1, \text{если был сбой при передаче данных.} \end{cases}$$

2) Параметр $e_2$ может принимать следующие значения:

$$e_2 = \begin{cases} 0, \text{если } t_{csr} \text{ не изменяется в течение } t_p; \\ 1, \text{если } t_{csr} \text{ изменяется в течение } t_p. \end{cases}$$

3) Параметр $e_3$ может принимать следующие значения:

$$e_2 = \begin{cases} 0, \text{если } t_{csr} \text{ не изменяется в течение } t_p; \\ 1, \text{если } t_{csr} \text{ изменяется в течение } t_p. \end{cases}$$

4) Параметр $e_4$ может принимать следующие значения:

$$e_2 = \begin{cases} 0, \text{если } mv \le cv \text{ в течение } t_p; \\ 1, \text{если } mv \ge cv \text{ в течение } t_p \text{ хотя бы один раз.} \end{cases}$$

Вероятности каждого типа ошибок можно представить следующими формулами:

1) Вероятность ошибки сбоя передачи данных по каналу связи.
Зная, что любая сеть обычно является резервируемой системой, то вероятность ее отказа можно представить как:

$$P_{e_1} = 1 - \left(1 - \left[1 - P(t)\right]^{m+1}\right),$$

где: $P_{e_1}$ – вероятность безотказной работы резервированной системы,

$P(t) = e_p^{-\lambda \cdot t}$ – вероятность безотказной работы нерезервированной системы при экспоненциальном законе распределения надёжности,
$m$ – кратность резервирования.

2) Вероятность ошибки, связанной с возможной непостоянностью периода снятия показаний с объекта телеметрии:

$$P_{e_2} = \frac{t_{csr}}{t_p}.$$

3) Вероятность ошибки, связанной с не отформатированным временным периодом снятия показаний:

$$P_{e_3} = \frac{t_{csr}}{t_p}.$$

4) Вероятность ошибки, связанной с превышением допустимого для измерения значения измеряемой величины:

$$P_{e_4} = \frac{t_{csr}}{t_p}.$$

Комбинированные вероятности появления ошибок:

1) Вероятность одновременного проявления всех ошибок:

$$P_{errors} = P_{e_1} \times P_{e_2} \times P_{e_3} \times P_{e_4},$$

2) Вероятность безошибочных данных:

$$P_{noerrors} = \overline{P_{e_1}} \times \overline{P_{e_2}} \times \overline{P_{e_3}} \times \overline{P_{e_4}},$$

3) Вероятность возникновения какой либо одной ошибки:

$$P_{error} = P_{e_1} \times \overline{P_{e_2}} \times \overline{P_{e_3}} \times \overline{P_{e_4}} + \overline{P_{e_1}} \times P_{e_2} \times \overline{P_{e_3}} \times \overline{P_{e_4}} + \overline{P_{e_1}} \times \overline{P_{e_2}} \times P_{e_3} \times \overline{P_{e_4}} + \overline{P_{e_1}} \times \overline{P_{e_2}} \times \overline{P_{e_3}} \times P_{e_4}.$$

## 3 Опытное тестирование

Экспериментальное тестирование разработанной системы тестирования заключалось, прежде всего, в проверке работоспособности базовой функциональности: генерирования данных без ошибок.

Сравнив данные, сгенерированные системой тестирования для измерителя линейки VIDA, и данные, полученные системой My-JEVis, была выявлена их полная идентичность, что подтвердило работу программного симулятора в режиме формирования безошибочных данных.

Аналогичным образом была проведена оценка работоспособности системы тестирования в режиме формирования ошибок. Результат проверки приведен в таблице 1. Введены следующие обозначения: N1 – количество пакетов данных, сформированных симулятором; N2 – количество принятых пакетов в My-JEVis; N3 – количество сформированных симулятором ошибок; N4 – количество распознанных ошибок системой My-JEVis; P – процент обнаружения ошибок, P = N4 / N3 * 100%. Количество выборок принято кратным количеству регистрируемых данных с интервалом 15 минут за сутки, то есть 96.

Таблица 1 – Результаты идентификации системой My-JEVis ошибок, сформированных системой тестирования

| № п/п | Наименование теста | N1 | N2 | N3 | N4 | P,% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Проверка ошибок связи | 960 | 912 | 48 | 48 | 100 |
| 2 | Отправка данных с непостоянным временным периодом | 960 | 960 | 480 | 480 | 100 |
| 3 | Отправка данных с не отформатированным временем | 960 | 960 | 240 | 240 | 100 |
| 4 | Отправка данных с недопустимым значением | 480 | 480 | 96 | 96 | 100 |

## Заключение

Разработанная программная система тестирования была успешно интегрирована в систему энергоменеджмента My-JEVis компании ENVIDATEC GmbH. Опытная эксплуатация тестера позволила выявить граничные условия эффективной работы системы My-JEVis и оценить показатели надежности при поступлении нестандартных/некорректных входных данных; данных, содержащих ошибки; многократно масштабированных источников данных (более 500 000 имитируемых сигналов); данных, одновременно поступающих из различных точек земного шара по сети Интернет. Функции системы показали 100-процентное обнаружение ошибок при заданных условиях проверки.

Применение предложенного программного средства автоматического контроля надежности в составе My-JEVis в значительной степени повышает оперативность адаптации системы к различным условиям работы. Исследование результатов функционирования имитационных моделей VIDA позволит разработчикам проводить тестирование и отладку программных процедур на начальных этапах создания ПО, значительно сокращая риски возникновения сбоев на объектах мониторирования.

## Список литературы

[1] Р.А. Файзрахманов, Т. Франк, А.В. Кычкин, А.Б. Федоров. Рациональное управление потреблением энергии с помощью информационной системы энергоменеджмента My-JEVis. Электротехника. 2011. №11.

[2] Франк Т. Практика энергетического менеджмента // Энергосбережение. 2006. № 3.

# ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ РОЗНИЧНОГО РЫНКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

**С.К. Андрюшкевич, С.П. Ковалёв, А.С. Кубышкин, А.М. Трегубов**

Конструкторско-технологический Институт Вычислительной Техники СО РАН
630090, Новосибирск, ул. Академика Ржанова, 6, Россия
askbox@gmail.com, kovalyov@nm.ru, alexander.kubyshkin@gmail.com, alexeytregubov@gmail.com
тел: +7-913-925-02-68, +7-916-200-92-62, +7-913-934-76-41, +7-905-950-91-53

***Ключевые слова:*** *MDUS, PLC, автоматизация процессов, аспектно-ориентированное программирование, информационно-вычислительный комплекс, информационно-измерительный комплекс, интеграция, Интеллектуальные сети, мониторинг энергоэффективности, программы энергосберегающих мероприятий, розничный рынок электроэнергии*

**Abstract**

This paper looks at the issues of building automation systems in the retail market of electric energy based on Smart grid technology. The authors observe the advantages of different kinds of signal keying that goes via PLC-modems; explain the need of electricity object certification; analyze the usage of DLMS/COSEM standard on the measuring layer. The authors suggest using the aspect-oriented programming for program development and design, to follow the MDUS concept and support IEC 61968 protocol on the data-processing layer. These suggestions have been approved in the process of development software platform "Energius-Accounting" which provides automation of technological and business processes in the retail market of electric energy and provides automation of energy efficiency monitoring.

## Введение

Актуальность автоматизации управления процессами розничного рынка электроэнергии объясняется стремлением электросетевых компаний увеличивать долю полезного отпуска в общем объеме отпущенной потребителям электроэнергии. Сложность построения автоматизированных систем объясняется сложностью технологических и бизнес-процессов, заложенных в предметной области. Выбор конкретной автоматизированной системы усложняется разнородностью процессов и систем среди организаций отрасли. Большая часть систем обеспечивает детальный контроль и анализ энергопотребления каждого абонента, что стало возможным вследствие удешевления технологий построения Интеллектуальных сетей (Smart Grid) на базе «умных» счетчиков электроэнергии (Smart Meters), способных регистрировать большое количество параметров, передавать их по силовым линиям в центры обработки информации и принимать управляющие команды.

Цель доклада – выявить основные проблемы автоматизации управления процессами розничного рынка электроэнергии и тенденции их решения. По традиции, рассматриваются проблемы двух уровней: «нижний» уровень измерительного оборудования (информационно-измерительный комплекс, ИИК) и «верхний» уровень программного управления (информационно-вычислительный комплекс, ИВК).

## 1 Проблемы уровня ИИК

### 1.1 Проблемы взаимодействия со счётчиками электроэнергии по каналам PLC

Современные потребности поставщиков электроэнергии на розничном рынке превосходят имеющиеся на сегодняшний момент технические возможности технологий PLC. Инфор-

мации, которую хотят получать электросетевые компании с «умных» счетчиков, так много, что она не может быть передана по силовым линиям в необходимом объеме. Проблемы, с которыми сталкивается технология PLC, связана со следующими явлениями:

- искажение;
- затухание;
- помехи.

Искажения появляются в результате неоднородностей в электрической сети, порождающей отраженные сигналы, которые поступают в пункт назначения прямого сигнала с задержками и с отклонениями по частоте и по амплитуде. Наличие нескольких путей от источника к приемнику в разветвленной электрической сети тоже является причиной искажения сигнала.

Затухание сигнала возникает вследствие низкой проводимости материалов, из которых сделаны провода. В России распространены алюминиевые провода, проводимость которых ниже, чем у медных. Также затухание является следствием наличия в электрической сети коммутационных элементов. Наличие выключателей, некачественных соединений («скруток», переходников) снижает уровень сигнала.

Помехи возникают в результате работы подключенных к сети устройств-потребителей электроэнергии. Это могут быть зарядные устройства, галогенные лампы, кондиционеры и прочие бытовые устройства.

Проблемы передачи сигналов на физическом уровне пытаются решить с помощью усовершенствования технологий, применяемых при манипуляции сигналов, и развития более надежных помехоустойчивых алгоритмов шифрования сигналов.

С помощью различных видов манипуляции сигнала стремятся повысить как помехоустойчивость передачи сигнала, так и скорость. Амплитудная манипуляция (Amplitude Shift Keying, ASK) имеет низкую скорость передачи данных и слабо защищена от помех по сравнению с частотной манипуляцией (Frequency Shift Keying, FSK), так как при помехах амплитуда сигнала подвергается влиянию значительно больше, чем частота или смещение по фазе. Фазовая манипуляция (Phase Shift Keying, PSK) является наиболее информативной, т.к. каждому значению фазы соответствует $log_2M$ битов информации ($M$ – количество позиций поворота фазы). Но при увеличении позиций поворота фазы больше 8 помехоустойчивость резко снижается, поэтому на высоких скоростях используются амплитудно-фазовые методы манипуляции.

В конце 1990-х годов был утвержден стандарт IEC-61334 [3] для передачи данных по электросетям среднего и низкого напряжения. Этот стандарт определяет набор способов частотной модуляции сигнала, среди которых широкое распространение в электросетевых компаниях получила частотная манипуляция с расширением спектра (The spread frequency shift keying, S-FSK). Данный вид манипуляции обеспечиваем высокую надёжность передачи данных. Скорость передачи данных для полосы частот согласно стандарту CENELEC-A составляет 2.4 кБит/с.

В настоящий момент наиболее перспективными являются дифференциальная кодовая манипуляции (Differential Code Shift Keying, DCSK) и мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM).

DCSK является открытым стандартом [2], специфицированным HomePlug C&C. Согласно спецификации скорость для полосы частот CENELEC A достигает 7.5 кБит/с. Компания Yitran имеет патент на высокоскоростную модуляцию DCSK. Скорость передачи данных для полосы частот CENELEC A достигает 60 кБит/с. Для этого стандарта имеются перспективы увеличения скорости до 500 кБит/с.

В настоящий момент активно продвигается технологии на основе мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). При таком виде манипуляции увеличение пропускной способности происходит не за счет сокращения длительности передаваемых символов, а благодаря увеличению числа информаци-

онных каналов (поднесущих). Скорость передачи данных для полосы частот CENELEC A достигает 128 кБит/с. Это молодая перспективная технология сейчас только начинает проникать в электросетевые компании в качестве высокоскоростного решения для работы с PLC.

Альтернативой передачи данных по силовым линиям является беспроводная передача данных. Среди низкоскоростных беспроводных технологий большую популярность набирает технология ZigBee [7], разработанная альянсом ZigBee Aliance. Технология ZigBee основывается на протоколе IEEE 802.15.4 (физический и канальный уровень модели OSI), и покрывает сетевой, транспортный и сессионный уровни модели OSI. Скорость передачи данных достигает 20 кБит/с (250кБит/с) при частоте 868 MHz (2450MHz). В технологии ZigBee используется фазовая манипуляция с количеством позиций поворота фазы 2 и 4. Среди недостатков технологии можно отметить необходимость замены батареи в устройствах, излучение, небольшие расстояния.

Совершенствование цифровых сигнальных процессоров и способов модуляции сигналов в сеть лишь частично решают проблемы затухания и искажения сигнала. Из-за неоднородной среды передачи данных сигнал, пришедший в приёмник может сильно отличаться от оригинального. Для повышения показателя помехоустойчивости применяют различные алгоритмы шифрования исходного сигнала. Достоверность передачи данных повышает использование при передаче сигнала корректирующих кодов [9] (коды Рида-Соломона, сверточные коды), позволяющих обнаруживать и исправлять ошибки в передаваемом сигнале, не прибегая к повторной отсылке сигнала. При сверточном кодировании часто применяется операция перфорирования. Она уменьшает размер зашифрованного сигнала, и может повысить вероятность обнаружения ошибки. В случае возникновения пакетов ошибок (непрерывно идущих друг за другом) вследствие длительных пропаданий или искажений сигнала, вместе с корректирующими кодами используют перемежение, меняющее порядок символов в сигнале, не увеличивая его длину.

На российском розничном рынке электроэнергии большое значение при выборе PLC-технологии передачи данных имеет надёжность, так как качество электросетевого хозяйства может сильно влиять на качество передачи данных негативным образом. Высоконадежным зарекомендовавшим себя решением является решение на основе DCSK манипуляции. Но перспективная молодая PLC-технология на основе OFDM манипуляции также демонстрирует высокие показатели скорости и надёжности, поэтому её нельзя сбрасывать со счёта при выборе оборудования для построения Интеллектуальных сетей.

### 1.2 Отсутствие документации на схемы электросетей у владельцев

Для предварительной оценки жизнеспособности той или иной реализации PLC технологии в каждом конкретном случае требуется понимать топологию сети, расстояния между её узлами, характеристики силовых линий. Обладая такой информацией можно заранее определить, подходит ли рассматриваемое решение для поставленной задачи. Может оказаться, что качество силовых низкое, и сигнал затухает в них раньше, чем дойдет до очередного узла-повторителя. Наличие подобной информации может помочь определить максимальное количество счётчиков, которое может обслуживать концентратор, не выходя за границы установленных норм. Знание топологии сети может пригодиться также и на этапе пуско-наладки системы на основе PLC для выявления причин отсутствия сбора данных с установленных «умных» счётчиков. В России ситуация такова, что документация отсутствует или не актуальна не только в ЖКХ, но зачастую и в самих электросетевых компаниях нет представления о том, как проходят кабели от подстанций к домам и к другим подстанциям в случае кольцевых схем электроснабжения.

Постоянная актуализация документации на электросетевое хозяйство и ведение этой информации в программном обеспечении ИВК на этапе развертывания системы способна значительно упростить и удешевить применение технологий Интеллектуальных сетей.

### 1.3 Применение нестандартных протоколов взаимодействия со счетчиками

Ещё одна проблема автоматизированных систем на рынке электроэнергии – взаимодействие уровня ИВК с уровнем ИИК. Отсутствие стандартных протоколов взаимодействия со счётчиками и концентраторами данных, позволяющих осуществлять единым образом терминологически и программно весь спектр требуемых функций, во многом сужает выбор оборудования ИИК и комплексов ИИК-ИВК для электросетевых компаний. Во-первых, зачастую оборудование одного производителя не может работать с оборудованием другого производителя. Во-вторых, оборудование разных производителей различается не только по своим количественным характеристикам (количество поддерживаемых тарифов, время хранения данных в памяти счетчика), но функционально (возможность отключения/включения нагрузки счётчика) и терминологически (профиль как массив приращений электроэнергии за заданным период и профиль как массив показаний, зафиксированных с заданной периодичностью). В-третьих, для взаимодействия с разнородным оборудованием уровня ИИК система ИВК должна содержать в себе драйвера для каждого из видов оборудования. Если какой-то драйвер отсутствует в системе, то потребуется его разработка, что может стать причиной отказа от рассматриваемых кандидатов программного обеспечения для ИВК.

Для решения этих вопросов была образована Ассоциация пользователей DLMS (Device Language Message Specification User Association, DLMS UA). В неё входят многие производители средств учета энергоносителей. Основной целью ассоциации является обеспечение интероперабельной среды для моделирования и обмена данными со счётчиков энергоресурсов. Разработанные ассоциацией DLMS/COSEM стандарты определяют объектную модель данных в счётчике, систему идентификации объектов, способы доступа к модели на физическом, канальном, транспортном уровнях модели OSI. Часть стандартов была принята международной электротехнической комиссией [5] (IEC-62056). С помощью DLMS/COSEM концентратор одного производителя сможет опрашивать счётчики другого производителя в случае, например, если потребуется расширение парка счётчиков вследствие увеличения количества абонентов, при условии что используемые счётчики более не производятся.

Единая модель объектов счетчика решает проблему расхождения терминов, используемых разными производителями. По аналогии с объектным подходом в программировании, COSEM спецификация описывает допустимый набор объектов, атрибутов объекта и его методов, что отвечает на вопросы: что за объект используется, какие в данные хранятся в объекте, что можно сделать с этими данными. Наконец, стандарт позволяет повторно использовать программный код драйвера, что значительно снижает время и затраты на разработку новых драйверов для взаимодействия со счётчиками.

## 2 Проблемы уровня ИВК

### 2.1 Отсутствие тиражных решений ИВК, позволяющих автоматизировать весь спектр задач розничного учета путем конфигурирования

Среди проблем создания ИВК следует выделить отсутствие тиражных решений, позволяющих выполнять не только полный спектр функциональных задач, но и обеспечивать выполнение пересекающихся сквозных бизнес-процессов сетевой компании и смежных организаций.

На современных электросетевых компаниях для создания программного обеспечения ИВК, как правило, рассматриваются три варианта решений:

- комплексирование систем различных производителей;
- заказ готовых модулей систем;
- разработка системы «с нуля».

Комплексирование систем различных поставщиков (так же известен как «лоскутная автоматизация») является одним из распространённых подходов к построению систем ИВК. Для

этого используют готовые программные продукты, обладающие необходимой функциональностью способные автоматизировать некоторые бизнес-процессы розничного учета. В отличие от технологии, при которой производится поставка модулей одного поставщика, различные программные продукты предоставляют гораздо меньше возможности по интеграции, так как изначально разрабатывались как самостоятельные решения. Построение ИВК из готовых программных компонентов возможно, однако этот метод не может гарантировать результат ввиду отсутствия контроля над функциональностью подключаемых программных продуктов, что существенно усложняет процесс развития системы. Разработчики программных продуктов, из которых комплексируется ИВК, обладают собственными представлениями о направлениях развития их решений и в случае возникновения необходимости расширения продукта под требования заказчика ИВК, в составе которого была задействована система, время подготовки необходимой версии, согласования интерфейсов, формата обмена данными может оказаться недопустимо большим для заказчика ИВК.

Технология и методология поставки готовых компонентов на базе типовой программной платформы, например Oracle Utilities [1] или SAP for Utilities [11], состоит в анализе существующих бизнес-процессов предприятия, реорганизации бизнес-процессов под требования программных модулей соответствующих продуктов, внедрении модулей. Сегментация функций системы по модулям выполняется архитекторами соответствующих продуктов на основе опыта работы с зарубежными заказчиками, где степень специализации программных продуктов, видов деятельность более устоявшаяся, чем в России. Поэтому при внедрении таких модулей в России возникают сложности. Такая технология не предоставляет необходимой гибкости для построения ИВК, потребности в которых существуют в настоящее время на российских предприятиях. Это связано с тем, что единицей поставки является модуль, вне зависимости от объема используемой функциональности. В случае если заказчику для решения задачи требуется задействование функций двух модулей, то независимо от количества используемых функций требуется выполнить полноценное внедрение обоих модулей. Однако это не всегда технически возможно и экономически оправдано.

Современные требования к ИВК вынуждают поставщиков разрабатывать системы, ориентированные на заказчиков, глубоко погруженные в предметную область, обладающие высокими показателями удобства комплексирования для решения различных задач, относительно низкой стоимостью внедрения и сопровождения. Такими свойствами обладают системы, разработанные «с нуля» под конкретного заказчика, однако высокая стоимость и длительность процесса разработки, а также непредсказуемость результата не позволяют квалифицировать этот подход как технологию. Экономически и технически оправданным является технология, по которой система создается из готовых функциональных элементов, комплексируемых с возможностью прямого и обратного трассирования требований заказчика. Необходимые базовые возможности для создания такой технологии предоставляет аспектно-ориентированный подход [6], который позволяет выявлять пересекающиеся функциональные элементы и обеспечивать их консолидацию в ходе проектирования и функционирования системы, с возможностью неразрушающего расширения системы новыми классами решаемых задач.

Реализовать аспектно-ориентированную технологию построения ИВК возможно путем разработки платформы, функционально покрывающей потребности автоматизации розничного учета. Согласно этой технологии комплексирование конечной системы происходит путем выбора необходимого набора функциональных элементов (не модулей), определении правил их связывания (описание аспектов) для выполнения сквозных, пересекающихся бизнес процессов и организации специализированных АРМ. Аспектно-ориентированная технология построения ИВК позволяет добиться высокой гибкости при адаптации, увеличить степень повторного использования компонентов при автоматизации пересекающихся бизнес-процессов розничного учета.

### 2.2 Разнородность AMI систем

Розничный рынок электроэнергии характеризуется большим количеством участников. Политика диверсификации рисков и невозможность единственного поставщика удовлетворить все потребности заказчиков единовременно приводит к высокой разнородности не только измерительного оборудования на базе «умных» счётчиков в ведомстве одной электросетевой компании, но и к разнородности программного обеспечения, позволяющего полноценно взаимодействовать с этим оборудованием. Отсутствие интеграционного слоя, как средства управления всеми AMI системами (системами улучшенной инфраструктуры измерений, Advanced metering infrastructure systems) единым образом, а с другой стороны как средство предоставления доступа к данным для других систем электросетевой компании, затрудняет использование AMI систем и вызывает диссинергию от их совместного использования.

В качестве решения аналогичной проблемы совет LightHouse Council, образованный по инициативе компания SAP AG совместно со своими потребителями и партнерами, предлагает использовать концепцию MDUS – Meter Data Unification and Synchronization [8] (унификация и синхронизация данных счетчиков). MDUS предназначен для интеграции AMI систем с продуктом SAP for Utilities, с одной стороны он реализует адаптеры для AMI систем, с другой стороны – адаптер для SAP for Utilities.

Развивая идею MDUS, можно прийти к модели, в которой центральное место в автоматизированной системе управления процессами на розничном рынке электроэнергии занимает интеграционная платформа, к которой подключаются модули, автоматизирующие технологические процессы и бизнес процессы электросетевой компании и её контрагентов (управляющие компании, сбытовые компании, прочие). Таким образом, мы получаем единое расширяемое решение с унифицированным хранилищем данных (Data warehouse), разрешающее терминологические несоответствия всех компонентов автоматизированной системы, изолирующее конечного пользователя от сложностей системы и избыточной информации.

Реализация концепции MUDS в виде интеграционной платформы позволяет производить интеграцию с разнородными AMI системами, с различными системами, автоматизирующими технологические и бизнес-процессы на розничном рынке электроэнергии. Интеграционная платформа образует единое непротиворечивое терминологическое пространство, обеспечивает хранение и доставку накопленных знаний и фактов о предметной области.

### 2.3 Отсутствие российских стандартов обмена информацией между автоматизированными системами учета электроэнергии

Наличие или отсутствие интеграционного уровня не избавляет от необходимости использования протоколов организации взаимодействия между системами, автоматизирующими процессы на розничном рынке электроэнергии. Российских стандартов, описывающих способы обмена данными рассматриваемой предметной области, не достаточно. Однако работа по стандартизации активно ведется в зарубежных комиссиях по стандартизации. Международной электротехнической комиссией разрабатывается серия стандартов IEC 61968 [4], призванных установить стандарты в части обмена данными между системами электросетевых компаний. В частности эти стандарты описывают верхнеуровневые интерфейсы для чтения данных со счётчиков, управления счётчиками (IEC 61968-9) и расширения Общей информационной модели (Common Information Model, CIM) в части распределения электричества (IEC 61968-11). Адаптация и использование таких стандартов в российской практике способно упростить процесс интеграции систем.

Для реализации стандарта IEC 61968 можно использовать технологию web-сервисов. Реализация такого подхода возможна на уровне MDUS-AMI, где основной процесс получения данных со счётчиков связан с реализацией функций AMI-системы:

- удалённый опрос счётчиков, сбор и хранение широкого спектра параметров электроэнергии с периодом интеграции до 15 минут;

- оперативный сбор и хранение событий счётчика;
- тарификация потребляемой электроэнергии в зависимости от времени суток;
- управление нагрузкой счетчика (выключение/отключение/ограничение);
- чтение показаний счётчика по запросу.

При наличии большого числа AMI-систем и развитой SOA архитектурой автоматизированной системы электросетевой компании вместо прямых обращений к сервисам других систем эффективнее будет использовать корпоративную сервисную шину (Enterprise Service Bus, ESB).

На уровне взаимодействия MDUS с бизнес-системами электросетевой компании набора стандартов IEC 61968 может быть недостаточно, но это нельзя считать недостатком стандарта, поскольку причина несоответствия может заключаться в различиях в предметной области электроэнергетики и автоматизируемого процесса в каждом конкретном случае.

Принятие или адаптация стандарта IEC 61968 государственной комиссией по стандартизации России является необходимым условием для нормального протекания интеграционных процессов на розничном рынке электроэнергии. Стандарт позволяет решать большую часть задач по интеграции автоматизированных систем в области электроэнергетики. Отсутствие стандарта препятствует развитию вычислительной инфраструктуры электросетевых компаний, снижает эффективность автоматизированных систем и увеличивает затраты на их интеграцию.

### 2.4 Отсутствие российских стандартов в области технологического управления

Технология Интеллектуальных сетей относительно нова для российского рынка электроэнергии. Процесс поддержания её жизнеспособности находится в состоянии становления. Стандарты и рекомендации по её эксплуатации не выработаны. Однако задача по обеспечению инфраструктуры автоматизированной системы в рабочем состоянии является основной в том смысле, что без нее исполнение бизнес-процессов будет невозможно.

Для нормальной работы автоматизированной системы в ней должны быть предусмотрены модули, обеспечивающие контроль над исполнением технологических процессов. Часть этих модулей может быть реализована на уровне ИИК, аппаратными средствами повышая надёжность функционирования системы. Но основная часть должна быть реализована на уровне ИВК, чтобы пользователь системы централизованно мог, основываясь на предоставленной ему информации о протекании того или иного технологического процесса, в момент сбоя оперативно принять правильное решение. Среди технологических процессов электросетевой компании можно выделить основные:

- ведение оборудования, находящегося в ведении эксплуатационной службы электросетевой компании;
- мониторинг состояний оборудования и программного обеспечения, участвующего в сборе результатов измерений и их передачи в ИВК;
- верификация данных, поступивших в ИВК;
- управление нагрузкой, задание тарифного расписания.

Сейчас у каждого участника розничного рынка электроэнергии есть свои представления о том, что должно входить в состав этих процессов, поэтому существующим решениям приходится проходить этап притирки собственных модулей к процессам электросетевых компаний.

Существующую проблему решит формирование модели технологических процессов управления Интеллектуальной сетью, которой будут пользоваться все участники рынка. Модель обеспечит единое понимание процессов, упростит их автоматизацию и даст возможность повторного использования разработанных решений. Реализация модели должна предоставлять набор автоматизированных рабочих мест (АРМ) для сотрудников эксплуатационной службы электросетевой компании, обслуживающих организаций и прочих технологических структур.

### 2.5 Отсутствие достаточной нормативно-правовой базы, регулирующей отношения на розничном рынке электроэнергии

Построение технологической инфраструктуры не является целью электросетевой компании само по себе. Задачи, которые ставит перед собой организация, осуществляя масштабное техническое перевооружение, находятся на уровне бизнеса. Для электросетевой компании основной бизнес-задачей является увеличение доли полезного отпуска в общем объеме отпущенной потребителям электроэнергии. К этому процессу примыкают прочие бизнес-процессы, связанные с документооборотом, биллингом, прогнозированием и управлением рисками, другие внутренние и внешние процессы по отношению к электросетевой компании. В автоматизированной системе на уровне ИВК должны быть предусмотрены модули, автоматизирующие эти процессы, позволяя через соответствующие АРМ, решать бизнес-задачи. Однако отсутствие достаточной нормативно-правовой базы, регулирующей отношения на розничном рынке электроэнергии в России, не позволяет делать это эффективно. Из-за этого модели процессов разных систем могут не соответствовать предъявляемым к ним требованиям со стороны участников этих процессов. Более того участники могут предъявлять противоречивые требования, и разрешение этих противоречий, удовлетворение каждого участника, поиск компромиссов между ними могут стать серьёзной проблемой при построении автоматизированной системы. Ввиду неоднозначного понимания бизнес-процессов их участниками интеграция между системами их моделирующими не может быть полноценной или являться тиражируемым решением.

Выходом из сложившейся ситуации является формирование модели бизнес-процессов электросетевой компании, закрепление этой модели законодательно и её реализация в конечном программном продукте или продуктах, совместимых друг с другом благодаря единому пониманию предметной области. В архитектуре автоматизированной системы с интеграционным слоем для решения каждой бизнес-задачи должен существовать соответствующий аспект, модуль или АРМ.

### 2.6 Отсутствие автоматизированного мониторинга энергоэффективности объектов и эффективности проводимых энергосберегающих мероприятий для актуализации государственных программ энергосбережения

С момента выхода Федерального закона № 261 [10] у электросетевых компании появилась потребность взаимодействия с системами мониторинга энергосбережения, так как эти компании являются непосредственным поставщиком энергоресурса и поэтому являются участником процесса мониторинга энергосбережения.

Автоматизированный мониторинг энергосберегающих мероприятий предполагает наличие двух информационных массивов на объекте мониторинга:

- данные о потреблении топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) за базовый год (сейчас это 2009), а также за все последующие года;
- данные о проводимых мероприятиях на объекте.

Однако здесь системы управления энергосбережением регионального и федерального уровня сталкиваются сразу с рядом проблем при взаимодействии с электросетевыми компаниями:

- Отсутствие достоверных данных о потреблении ТЭР на объекте, взятых с уровня ИВК. Это объясняется тем, что зачастую на объектах, принадлежащих бюджетным учреждениям, оприборивание либо еще не произведено, либо ведется по нормативам (например, в зависимости от занимаемой площади).
- Отсутствие интеграционных связок с ресурсоснабжающими и сбытовыми организациями. Даже если данные о потреблении ТЭР по объектам известны, то они не всегда доступны для систем мониторинга энергосбережения (тем более в автоматическом режиме).

- Несогласованность информационных моделей энергообъектов на уровне ИВК и систем управления энергосбережением регионального и федерального уровня. Системы управления энергосбережением оперируют агрегированными данными. По временной шкале масштаб редко бывает более детальным, чем месяц. По объектам степень детализации не идет дальше общедомового учета. Для систем управления энергосбережением важно знание о том, какая часть потребления энергоресурса была учтена счётчиками, а какая – вычислена по нормативам.
- Недостаток информации для актуализации программ энергосбережения. Для планирования мероприятий на очередной срок требуется реализация алгоритмов методик оценки потенциального энергетического эффекта от планируемых на объекте мероприятий. Сами по себе эти алгоритмы просты, но требуют достаточно много знаний об объекте. Например, такое мероприятие как замена ламп на энергосберегающее требует знание нормативной освещенности для различных типов помещений, имеющихся в объектах определенного типа. На основании этой информации вычисляется необходимое количество лам нужной мощности для замены. К сожалению, не для всех типов объектов сейчас имеется такая информация.

Для решения этих проблем предлагается в системах уровня ИВК реализовать интеграцию с системами управления энергосбережением регионального и федерального уровня путем гармонизации информационных моделей энергообъектов. Важную роль в этом процессе играет формирование интеграционного НСИ этих систем. Интеграционная связка между двумя системами возможна только при наличии согласованного ведения мастер-данных, а именно: объектов (потребителей – здания, помещения; сетей – ЛЭП, ТП; генераторов – ЭС, ТЭЦ), учетных показателей (точек поставки и точек измерения), тарифных данных.

### 2.7 Применение способов преодоления проблем ИВК розничного учета электроэнергии на практике

Описанные в докладе способы преодоления проблем ИВК были использованы при реализации программного продукта «Автоматизированная система учета энергоносителей «Энергиус-Учёт» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613308). В настоящий момент этот программный продукт в рамках пилотного проекта построения Интеллектуальной сети внедряется в одном из крупных городов России. Авторы доклада принимают непосредственное участие в создании и развитии данного программного обеспечения.

«Энергиус-Учёт» спроектирован с применением аспектно-ориентированного программирования. Данный подход продемонстрировал, что продукт, построенный на его основе, проявляет высокую степень гибкости, легко адаптируется под требования заказчика, под его технологические и бизнес-процессы. Сама программа представляет собой интеграционную платформу. Для взаимодействия с различным оборудованием уровня ИИК и AMI системами к ней подключаются специальные адаптеры. При работе с интеллектуальными PLC счётчиками, функционирующими по протоколу DMLS/COSEM, в качестве адаптеров выступают драйвера, которые понимают модель объектов COSEM. В случае работы с AMI системами реализуются адаптеры на основе стандартных протоколов, как IEC 61968, и специализированных протоколов. К интеграционному слою подключаются различные компоненты и автоматизированные рабочие места, через них реализуются сквозные и пересекающиеся процессы розничного рынка электроэнергии. Примером реализации смежного с розничным учетом электроэнергии процесса может служить модуль энергосбережения интегрированный с программой «Энергиус-Учёт». Он использует результаты выполнения задач розничного рынка для выполнения собственных задач расчета энергоэффективности и мониторинга. Единство понятий определяется единством мастер-данных, расположенных в хранилище данных (Data warehouse) интеграционной платформы.

Программный продукт «Энергиус-Учёт» демонстрирует эффективность применения предложенных способов преодоления проблем в построении информационно-вычислительных комплексов на розничном рынке электроэнергии.

**Заключение**

Автоматизация процессов на розничном рынке электроэнергии в России находится на начальном этапе. На этом этапе важно сформировать базовые принципы, на основе которых будут строиться все отношения между участниками этого рынка, выбрать ключевые технологии автоматизиции этих отношений.

На уровне информационно-измерительного комплекса проблемы организации передачи данных в Интеллектуальных сетях решаются с помощью выбора оборудования на основе PLC технологий с OFDM или DCSK манипуляцией или беспроводных технологий ZigBee. Оценку эффективности той или иной технологии позволяет выполнить документация на электросетевое хозяйство, постоянно поддерживаемая в актуальном состоянии, или актуализируемая путем плановых мероприятий паспортизации. Разработка и применение оборудования, поддерживающего протокол DLMS/COSEM, позволит упростить интеграцию оборудования различных производителей и реализацию драйверов, которые будут обеспечивать взаимодействие ИВК и ИИК.

На уровне информационно-вычислительного комплекса технические проблемы носят интеграционный характер и решаются применением архитектуры, реализующей концепцию MDUS с интеграционным слоем в качестве ключевого элемента, и принципов аспектно-ориентированного программирования, обеспечивающих гибкость и степень повторного использования компонентов. Взаимодействие других модулей с интеграционным слоем во многих случаях решает протокол IEC 61968, разработанный специально для отрасли электроэнергетики зарубежными специалистами. Его применение в России будет значительно способствовать автоматизации процессов отрасли.

Реализации ИВК препятствует отсутствие сформулированных технологических и бизнес-процессов, принятых всеми участниками розничного рынка электроэнергии. Решение проблемы – формирование модели этих процессов и закрепление их статуса на законодательном уровне. Итогом деятельности должны стать системы, автоматизирующие эти процессы в соответствие с моделью. Эти системы должны через автоматизированные рабочие места обеспечивать функции управления и контроля над технологическими и бизнес-процессами.

Улучшение интеграционных характеристик автоматизированных систем на розничном рынке электроэнергии позволит решать проблемы в смежных областях, в частности в области энергосбережения. Использование преимуществ Интеллектуальных сетей на уровне ИИК и интеграционного слоя на уровне ИВК решает проблему дефицита информации в системах управления регионального и федерального уровней путём повышения степени взаимодействия систем, унификации и гармонизации моделей предметных областей электроэнергетики и энергосбережения.

Предложенные решения были успешно апробированы в программном продукте «Энергиус-Учёт», являющемся разработкой авторов доклада.

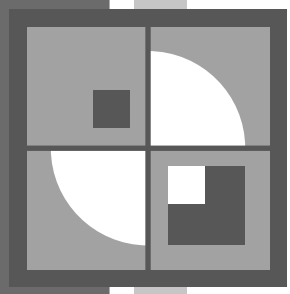
**Список литературы**


[1] Applications for utilities. Electric Utilities // Официальный ресурс компании Oracle. URL: http://www.oracle.com/us/industries/utilities/039711.htm (дата обращения 18.09.2011)

[2] HomePlug Command & Control (C&C). Overview. White Paper. – HomePlug Powerline Alliance. 2008. URL: www.yitran.com/Common/FilesBinaryWrite.aspx?id=647 (дата обращения 30.04.2012).

[3] IEC-61334, Distribution automation using distribution line carrier systems. International Electrotechnical Comission, 2001.

[4] IEC-61968, Application integration at electric utilities - System interfaces for distribution management. International Electrotechnical Comission, 2009.
[5] IEC-62056, Electricity metering – Data exchange for meter reading, tariff and load control. International Electrotechnical Comission, 2006.
[6] Kiczales G., Lamping J., Mendhekar A., Aspect-oriented programming. Published in proceedings of the European Conference on Object-Oriented Programming (ECOOP). Finland, Springer-Verlag LNCS 1241. June 1997.
[7] Lonn J., OlssonJ. ZigBee for wireless networking. 2005. URL: http://www.itn.liu.se/~shago/Exjobb/ZigBee.pdf (дата обращения 30.04.2012).
[8] K.Heimann. SAP for Utilities: Leading the Charge for Long-Term Energy Efficiency. 2009. URL: http://www.osisoft.com/resources/articles/articles-content/SAP_for_Utilities__Leading_the_Charge_for_Long-Term_Energy_Efficiency.aspx (дата обращения 30.04.2012).
[9] Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки // Пер. с англ. - М.: Мир. 1986.
[10] Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации".
[11] Решение SAP для предприятий энергетики // Официальный ресурс компании SAP. URL: http://www.sap.com/cis/pdf/SAP_for_utilities.pdf (дата обращения 18.09.2011).



# Modernization of Regional Public Health Management
# Модернизация управления региональным здравоохранением

# ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЕМ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ

**В.А. Виттих[1], Г.Н. Гридасов[2], Е.А. Гриценко[2], С.И. Кузнецов[2], С.В. Кузнецов[1], И.М. Назаркина[3], Т.В. Тяпухина[4], Л.С. Федосеева[3]**

[1]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

[2]Министерство здравоохранения и социального развития Самарской области
443010, Самара, ул. Чапаевская, 181, Россия
zdravso@samregion.ru
тел: +7 (846) 334-27-02, тел/факс: +7 (846) 270-91-14

[3] ММУ «Городская клиническая поликлиника № 15» г.о. Самары
443111, Самара, ул. Фадеева, 56а, Россия
polik15@saminfo.ru
тел: +7 (846) 251-97-35

[4]Самарский областной медицинский информационно-аналитический центр
443095, Самара, ул. Ташкентская, 159, Россия
miac@medlan.samara.ru
тел: +7 (846) 256-17-95, факс: +7 (846) 256-17-95

***Ключевые слова:*** *холонический подход, самоорганизация, социальное партнёрство, проблемная ситуация, коммуникативные действия, подушевный принцип финансирования, фондодержание, информационное обеспечение*

**Abstract**
The paper presents the principles of the Samara region public health management system modernization. The principles are founded on the holonic approach with the activization of self-organising mechanisms and social partnership.

## Введение

В настоящее время во всех регионах Российской Федерации реализуются программы модернизации здравоохранения. Масштабность осуществляемых преобразований в отрасли, большое количество участников процессов оказания медицинской помощи и все более активизирующееся гражданское общество в России требуют совершенствования системы государственного управления отраслью с более активным вовлечением общественности.

В связи с этим по заказу Минэкономразвития Самарской области в 2011 году АНО «Совет по вопросам управления и развития Самарской области» подготовил Доклад с рекомендациями по модернизации системы управления здравоохранением Самарской области на основе холонического подхода с активизацией механизмов самоорганизации и социального партнёрства (далее – Доклад).

Целью работы была разработка предложений по совершенствованию системы управления здравоохранением в Самарской области для научно-методического содействия Правительству Самарской области в повышении эффективности принимаемых совместно с бизнесом и общественностью решений, направленных на улучшение здоровья населения региона и профилактику заболеваний.

В данной статье излагаются основные положения подготовленного Доклада.

## 1 При построении системы управления здравоохранением предлагается использовать в качестве основы холонический подход

Концепция холонической системы[1] основана на понятии «холон», введённом А. Кёстлером[2]. Термин «холон» (holon) образован от греческого «holos» – весь, целый, с суффиксом «on», обозначающим «часть», «частица». Холон, будучи целостностью, одновременно является частью другой целостности. В холонической системе каждый холон, являясь автономным и способным формировать свои собственные планы, стратегии и контролировать их выполнение, в то же время может кооперироваться с другими холонами в соответствии с определенными правилами, а также быть частью другого холона.

Основным направлением модернизации системы управления здравоохранением Самарской области должно стать повышение эффективности использования возможностей отдельных холонов, входящих в сложную систему здравоохранения. Прежде всего, речь идет об использовании интеллектуальных и волевых ресурсов людей в процессах принятия решений, причём не только менеджеров, но и врачей, медсестёр и населения (пациентов). А это предполагает переход от жёсткой бюрократической системы управления к управлению, свойственному холоническим системам, базирующимся не только на иерархических, но и на гетерархических принципах. Гетерархия предполагает обмен информацией между холонами «по горизонтали». Такая гетерархическая организация управления, построенная на переговорах «каждого с каждым» и «равного с равным», обладает гибкостью и оперативностью, но имеет недостаточно высокую надёжность, поскольку участники кооперации взаимодействуют в рамках временно действующих соглашений и одновременно имеют обязательства перед несколькими различными партнёрами. Поэтому для обеспечения стабильности при решении задач, требующих долговременного сотрудничества на основе единоначалия, холоны могут самоорганизовываться в иерархии. Таким образом, в холонических системах гибкость гетерархии сочетается со стабильностью иерархии.

## 2 Центральным элементом холонической модели системы оказания медицинской помощи должен стать лечащий врач

Отдельные врачи (атомарные холоны), объединяются в отделения, несколько отделений входят в состав поликлиники или больницы, все они объединены в систему здравоохранения муниципального образования. Лечебные учреждения, каждое из которых является самостоятельным юридическим лицом, взаимодействуют между собой, опираясь на действующие нормативные правовые акты, и образуют единую систему оказания медицинской помощи в регионе.

Ключевые вопросы организации работы медицинского учреждения, в котором все стороны (пациенты, врачи, администрация) взаимодействуют как равные партнёры на основе договорных отношений, регламентов взаимодействия, решаются каждой из сторон самостоятельно на своем уровне компетенции. Использование холонического подхода в организации работы медицинских учреждений создает условия для реализации творческого потенциала человека и увеличение его роли.

Это достигается за счёт следующих принципов управления:

- доведение целей и основных задач медицинского учреждения до сотрудников;
- уважение и доверие к каждому сотруднику вместо жёстких правил и контроля;
- ориентированность на достижение удовлетворённости пациентов;
- работа в команде;

[1] Виттих В. А. Эволюционное управление сложными системами // Известия Самарского научного центра РАН. 2000. Т. 2. № 1. С.53–65.

[2] Koestler A. The Ghost in the Machine // London: Arcana books, 1989.

- делегирование полномочий;
- обучение навыкам управления руководителей среднего и первичного уровня;
- внутренний аудит качества работы, в т. ч. коллегами и подчинёнными.

### 3 При модернизации управления здравоохранением необходимо опираться на механизмы самоорганизации и социального партнёрства

Способность к самоорганизации холонических систем позволяет находить в самих людях, в каждом человеке резервы повышения качества жизни, эффективности экономики и государственного управления[3]. На ключевой роли самоорганизации акцентировал внимание классик социологии Питирим Сорокин, который писал, что «один из самых главных факторов, определяющих функционирование и развитие любой системы, лежит внутри нее самой. В этом смысле любая внутренне интегрированная система является автономным саморегулирующимся, самоуправляемым или, если угодно, «сбалансированным» единством»[4].

Именно в результате процессов самоорганизации устанавливаются партнёрские отношения между элементами социальной системы[5]. При этом само понятие «социальное партнёрство» претерпевает изменения. Если в недавнем прошлом оно определяло только механизм регулирования отношений между работниками и работодателями, то в настоящее время этот термин обозначает отношения, в которые вступают любые субъекты социальной коммуникации (организации, группы, личности) для объединения усилий и ресурсов в решении социально значимой проблемы в сфере разделяемой партнерами ответственности.

Активизация механизмов самоорганизации в здравоохранении предполагает усиление ответственности каждого субъекта системы и, прежде всего врача, при возрастании его полномочий и возможностей. Врач общей практики, участковый терапевт или педиатр не только лечит пациента, но и выступает в качестве координатора в организации оказания медицинской помощи на всех этапах, взаимодействует с санитарно-противоэпидемиологическими, социальными и образовательными учреждениями.

За пациентом следуют денежные средства, выделяемые на него фондом обязательного медицинского страхования. Врач должен иметь возможность распоряжаться этими средствами, используя их наиболее эффективным способом. Это предполагает внедрение метода подушевого финансирования первичного звена, постепенный переход на полное фондодержание при должной наполненности тарифа.

Тогда врач не только морально, но и материально будет заинтересован в снижении заболеваемости, продлении сроков и повышении качества жизни каждого из своих пациентов за счет усиления роли профилактики, формирования здорового образа жизни, выявления факторов риска развития хронических социально значимых заболеваний, внедрения современных медицинских технологий, основанных на принципах доказательной медицины. Всё это приведёт к повышению ответственности каждого врача как за здоровье пациентов, так и за экономическую стабильность учреждения.

Для получения оптимальных результатов от внедрения данной системы финансирования необходимо использовать механизмы экономической заинтересованности медицинских работников в результатах лечения (дифференцированный подход к оплате труда). Уровень оплаты труда врачей должен напрямую зависеть от достижения установленных показателей качества их работы. Это осуществляется на основе набора показателей деятельности и формализо-

[3] Виттих В. А. Механизмы социальной самоорганизации. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIII межд. конф. Самара: Самарский научный центр РАН, 2011. С.10–17.
[4] Сорокин П. А. Социальная и культурная динамика. М. : Астрель, 2006.
[5] Виттих В.А. Социальное партнёрство как основа организации процессов управления в информационном обществе // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIII межд. конф. Самара : Самарский научный центр РАН, 2011. С.365–368.

ванной модели оценки результатов деятельности, в которой обязательно должен учитываться показатель удовлетворённости пациентов от контакта с системой здравоохранения (Европейское бюро экспертов ВОЗ, 1983.).

Повысить удовлетворенность населения работой учреждений здравоохранения возможно путем усиления социального партнерства пациентов, медицинских работников, государственных и общественных организаций, бизнеса по наиболее актуальным направлениям. Алма-Атинская декларация[6] четко и недвусмысленно обозначает высочайший приоритет социального партнёрства в здравоохранении, выделяя этот тезис в отдельный пункт: «Люди имеют право и обязанность участвовать на индивидуальной и коллективной основе в планировании и осуществлении их медико-санитарного обслуживания».

### 4 Для поддержки общественного здравоохранения целесообразно развивать государственно-частное партнёрство

На основании опыта зарубежных стран эксперты предлагают выделение следующих направлений государственно-частного партнерства в здравоохранении:

- привлечение учреждений всех форм собственности на равных правах к реализации государственного заказа;
- увеличение роли и ответственности частных страховых компаний в реализации программы государственных гарантий оказания бесплатной медицинской помощи населению;
- привлечение частных компаний для совместного строительства и оснащения учреждений, оказывающих медицинские услуги по программе государственных гарантий;
- увеличение финансирования медицинских услуг за счет средств работодателей и населения через расширение роли ДМС и увеличение соплатежей;
- передача в управление частным компаниям медицинских учреждений, находящихся в государственной и муниципальной собственности;
- внедрение рыночных инструментов управления.

### 5 В управлении здравоохранением усилить роль общественных профессиональных организаций, функционирующих на основе механизмов самоорганизации и самоуправления

В зарубежных странах с развитым гражданским обществом роль общественных профессиональных организаций очерчена совершенно однозначно: это ответственное саморегулирование предметных вопросов врачебной деятельности по соответствующим специальностям. В силу этого ассоциации медицинских работников организуют сертификацию специалистов, разрабатывают стандарты оказания медицинской помощи, критерии достижения клинического результата, рассматривают вопросы этики и деонтологии.

В России роль профессиональных ассоциаций ограничена и, несомненно, требует развития, хотя ассоциации медицинских работников созданы в каждом субъекте. На федеральном уровне можно отметить, прежде всего, Российскую медицинскую ассоциацию[7] с созданным на ее основе Российским медицинским союзом и Национальную медицинскую палату[8].

[6] Принята Международной конференцией по первичной медико-санитарной помощи, Алма-Ата, 12 сентября 1978 года (http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/declarations/almaata78.shtml)
[7] Российская медицинская Асоциация. – URL: http://www.rmass.ru/
[8] http://www.nacmedpalata.ru/

### 6 Внедрить инструменты, обеспечивающие реальное участие населения в управлении здравоохранением

Деятельность населения и общественных организаций крайне важна и в законодательной сфере в области здравоохранения, и в решении проблем медицинского образования, и в использовании медицинской информации и технологий, и, конечно, в медицинской этике. На сегодняшний день существуют довольно много специальных площадок для диалога государственных органов власти с общественными организациями: общественные советы по защите прав пациентов при Росздравнадзоре РФ и территориальных отделениях этой службы, координационные советы по обеспечению и защите прав граждан в системе обязательного медицинского страхования, а также Общественный совет при Минздравсоцразвития России, общественные слушания в министерствах, институт общественной экспертизы законопроектов, личные обращения граждан, интернет-форумы и блогосфера.

Но эффективность имеющихся инструментов для диалога государства и общественности еще низка, в т. ч. и из-за недостаточной активности граждан и низкой мотивации общественных организаций.

Одним из способов мотивации участия общественных организаций в управлении здравоохранением является моральная удовлетворённость от видимых конкретных результатов их деятельности. Это достигается, в частности, доступом общественных организаций к контролю над соблюдением прав пациентов на уровне медицинских учреждений. Наиболее широкими возможностями здесь обладают общества защиты прав потребителей, полномочия которых зафиксированы в статье 45 Закона РФ от 07.02.1992 № 2300-1 (ред. от 18.07.2011) «О защите прав потребителей». Однако сейчас их деятельность может распространяться только на платные медицинские услуги и не охватывает систему обязательного медицинского страхования.

Возможна и финансовая мотивация деятельности общественных организаций пациентов. В разных странах 30–60 % объединений пациентов пользуются спонсорской поддержкой со стороны фармакологических компаний.

В качестве предложения по обеспечению участия широких слоев населения в управлении здравоохранением можно рассмотреть создание специального электронного ресурса по образцу сайта «большого» правительства президента РФ (http://большоеправительство.рф/). Важнейшей задачей этого сайта является обновление стратегических программ и вовлечение активных, неравнодушных граждан в систему управления государством. Должны быть предусмотрены разнообразные каналы, по которым мнение граждан будет аккумулироваться, анализироваться и становиться доступным для тех, кто готовит решения государственного уровня.

В качестве мер по усилению роли общественности можно предложить:

- внедрение процедуры комиссионного решения вопросов;
- внедрение комплекса мер обеспечения независимости суждений (форумы, закрытое голосование, анкетирование);
- мотивация общественных организаций, в т. ч. финансовая;
- развитие интерактивных технологий обратной связи;
- обеспечение доступа общественных организаций пациентов к контролю над соблюдением прав пациентов на уровне медицинских учреждений, в т. ч. за ведением реестров больных по отдельным нозологиям и за ходом реализации государственных программ лекарственного обеспечения.

### 7 Для своевременного и эффективного принятия управленческих решений создать в здравоохранении Самарской области систему мониторинга проблемных ситуаций

Под проблемными ситуациями понимаются в данной работе потенциально решаемые проблемы, связанные с дефектами коммуникаций, управления и организации в системе оказания медицинской помощи.

Содержанием анализа проблемной ситуации является определение: сущности проблемы; её принадлежности к тому или иному субъекту отношений; новизны проблемной ситуации для выявления уже встречавшихся прецедентов и аналогий; причин возникновения и развития; взаимосвязи с другими, уже классифицированными и систематизированными проблемами; степени полноты и достоверности информации о проблемной ситуации; возможности разрешения проблемы; актуальности и срочности решения проблемы (с обязательным участием максимального количества заинтересованных субъектов – возможно через специализированный раздел сайта Минздравсоцразвития Самарской области).

Крайне необходимым является создание системы аккумуляции и систематизации любых сигналов в отношении деятельности системы оказания медицинской помощи. Наиболее рационально организовать это посредством специализированного интернет-сервиса на сайте Минздравсоцразвития Самарской области.

Технология решения проблемных ситуаций в системе здравоохранения в общем виде состоит в систематизации всей совокупности отдельных процессов в отрасли с созданием для каждого из них своего регламента. Регламент должен содержать наименование и описание предметной сути процесса, перечень участвующих в нем субъектов, законодательную базу, корректный алгоритм реализации процесса и, обязательно, индикативные показатели достижения требуемого конечного результата с перечнем возможных отклонений. Далее, в идеале, необходимо построение модели деятельности системы, при помощи которой возможно прогнозирование возникновения проблем – наиболее желаемый для практики управления «проспективный» метод выявления.

### 8 При подготовке реестра проблемных ситуаций и нормативных правовых документов, определяющих развитие регионального здравоохранения, обеспечить учёт мнения населения и экспертов, опрошенных в ходе подготовки Доклада

Для выявления ограничений, существующих сейчас в здравоохранении Самарской области, было проведено анкетирование населения (опрошены 1200 человек из 31 административной территории Самарской области по анкете, размещенной в приложении 9) и интервьюирование экспертов (опрошены 21 эксперт – специалист в области здравоохранения, включая 8 специалистов федерального значения, и 14 представителей общественных организаций).

При опросе экспертов – специалистов в области здравоохранения были выявлены следующие основные ограничения действующей в Самарской области системы оказания медицинской помощи: недостаточно высокое качество профессиональной подготовки медицинских специалистов; низкая мотивация медицинских специалистов для работы по специальности; низкая мотивация населения к ответственному отношению к здоровью; недостаточное развитие общеврачебной практики; отсутствие фондодержания; низкая роль общественности, в т. ч. медицинского сообщества в принятии и реализации управленческих решений; отсутствие эффективной, простой и высокодоступной системы автоматизированного мониторинга удовлетворённости населения услугами в сфере здравоохранения; отсутствие системы добровольной аккредитации учреждений здравоохранения; отсутствие стандартов оказания медицинской помощи по многим нозологиям и существование потребности в актуализации имеющихся; необходимость развития производственной и школьной медицины; проблемы в организации сельского здравоохранения и др.

Названные ограничения, конечно, существуют не только в самарском здравоохранении, но и в других регионах России, но работа по их минимизации возможна и необходима в рамках отдельных территорий.

К наиболее актуальным проблемам здравоохранения Самарской области, по мнению населения, относятся: кадровый дефицит (23,4% из числа опрошенного населения); низкая материально-техническая оснащенность лечебных учреждений (14,5 %), низкая заработная плата медицинского персонала (12,8 %), большая очередность и длительное время ожидания лечения, диагностического обследования (10,7 %). Следует отметить, что число респондентов, отметивших наличие названных ограничений, выше в сельских районах.

Возможными путями решения проблем сельского здравоохранения могут быть:

- пересмотр порядка получения сельским населением специализированной медицинской помощи;
- развитие общеврачебной практики с интеграцией со службой социального обслуживания при сохранении поликлинической системы оказания медицинской помощи;
- переориентация маломощных больничных учреждений (с числом коек не более 100) на оказание экстренной медицинской помощи в радиусе 15–30-минутной транспортной доступности;
- создание на базе крупных ЦРБ (ЦГБ) в пределах часовой транспортной доступности межмуниципальных медицинских центров мощностью от 250 до 400 коек для обслуживания населения прилегающих районов общей численностью от 100 тыс. человек;
- увеличение финансового норматива на медикаменты для экстренной медицинской помощи с расширением их ассортимента на ФАП.

### 9 Для повышения качества лекарственного обеспечения населения Самарской области разработать региональные регламенты совместной деятельности органов управления, представителей фармацевтического бизнеса в лице профессиональных общественных организаций, медицинских учреждений и уполномоченных представителей гражданского сообщества, их общественных организаций

В качестве модели объединения участников процессов лекарственного обеспечения населения можно представить саморегулируемые организации, деятельность которых регламентируется Федеральным Законом от 01.12.2007 № 315-ФЗ «О саморегулируемых организациях», но которые не получили пока своего развития в сфере здравоохранения и фармацевтической деятельности. Учитывая опыт деятельности таких организаций за рубежом и в некоторых сферах деятельности в нашей стране, можно ожидать, что такая модель может стать эффективной площадкой для решения вопросов взаимодействия власти, бизнеса и граждан и будет способствовать повышению качества фармацевтических услуг.

При этом существует (и в Самарской области активно используется) реальный опыт сотрудничества представителей фармацевтического сообщества с министерством и его профильным управлением по вопросам регулирования фармацевтической деятельности в рамках общественной организации «Самарская областная фармацевтическая организация» (ОО «СОФА»). Совет ОО «СОФА» состоит из 29 представителей производственных, оптовых и розничных фармацевтических компаний, фармацевтической науки и образования, а также органа управления фармацевтической деятельностью, которые могут и должны быть задействованы в качестве экспертов по вопросам фармацевтической деятельности.

В региональных регламентах целесообразно установить критерии оптимального уровня обеспеченности населения и медицинских организаций области отдельными видами фармацевтических услуг с учетом географического принципа. К таким критериям следует отнести: количество населения, обслуживаемого одной аптекой, расстояние между аптеками, количест-

во фармспециалистов на душу населения, а также уровень минимальной надбавки на лекарственные средства и др.

Предлагается разработка мотивационных схем участия коммерческих аптек в государственных программах (тарифы, налогообложение), порядка проведения конкурса между аптечными организациями на выполнение фармацевтической услуги по программам лекарственного обеспечения граждан за счет бюджетных средств, а также единой информационной системы оказания фармацевтической услуги по программам лекарственного обеспечения граждан за счет бюджетных средств (по реестрам больных, по программе льготного и бесплатного лекарственного обеспечения), создание условий и поэтапный переход на лекарственное обеспечение, основанное на принципах лекарственного страхования.

**10 Всемерно создавать условия для формирования ответственного отношения человека к здоровью и состоянию среды обитания, готовности к оказанию самопомощи и взаимопомощи в экстренных ситуациях и при хронических заболеваниях**

Для решения этой задачи требуется, чтобы каждый человек имел определенный набор исходных знаний и доступ к информационным базам для повышения осведомленности о здоровом образе жизни и мерах по само- и взаимопомощи, принимаемых в ситуациях, угрожающих жизни и здоровью человека.

Мотивация к ведению здорового образа жизни относится к сфере солидарной ответственности институтов семьи, образования, здравоохранения, различных общественных организаций и средств массовой информации.

Представляется полезным: разработать региональные практические рекомендации (стандарты) оказания само- и взаимопомощи при основных неотложных состояниях с размещением их в сети Интернет с широким информированием населения Самарской области об адресе их размещения; обеспечить медицинские учреждения и места массового скопления людей учебно-методическими материалами, поясняющими правила само- и взаимопомощи; создать в учреждениях первичной медицинской помощи пункты (кабинеты) индивидуального прогнозирования неотложных состояний для обучения типовым приемам само- и взаимопомощи и обеспечения типовыми инструкциями (памятками), создать систему обучения добровольцев из существующих в Самарской области волонтерских служб и центров консультативной помощи молодым семьям методам пропаганды здорового образа жизни, разработать меры для создания отделений медицинской профилактики и реабилитации на базе образовательных учреждений.

**11 Для организации эффективного взаимодействия субъектов (медицинские учреждения, органы власти, акторы бизнеса, гражданского общества и собственно население), участвующих в коммуникативных действиях в сфере здравоохранения, разработать интегрирующую онтологическую модель сферы здравоохранения Самарской области**

Создание единой системы поддержки коммуникативных действий следует рассматривать в качестве одного из стратегических направлений повышения эффективности деятельности на всех уровнях управления здравоохранением в регионе.

Для этого предлагается начать разработку недорогих автономных настольных информационно-аналитических систем на основе онтологий, удовлетворяющих, прежде всего, потребности в справочной и образовательной информации всех субъектов, взаимодействующих в сфере здравоохранения Самарской области, разработать технологии регулирования доступа к информационным ресурсам разнородных владельцев.

Необходимым элементом единой информационной системы регионального здравоохранения являются современные информационные системы лечебно-профилактических учреж-

дений. Задачей администрации здесь является создание качественного автоматизированного рабочего места врача.

Для реализации изложенных в Докладе положений предлагаются следующие *основные рекомендации* по модернизации системы управления здравоохранением Самарской области на основе холонического подхода с активизацией механизмов самоорганизации и социального партнёрства:

1) Ввести в разряд приоритетных региональных задач воспитание каждого человека в духе солидарности и гуманизма, а также рачительного отношения к своему собственному здоровью, рассматривая её решение как необходимое условие гармоничного развития нашего общества.
2) Развивать систему межсекторных партнёрских отношений между государственными структурами, коммерческими предприятиями (бизнесом) и общественными организациями на основе механизмов самоорганизации для решения социально значимых проблем в сфере разделяемой партнёрами ответственности.
3) Разработать и поддерживать в актуальном состоянии реестр проблемных ситуаций в здравоохранении, который будет выполнять консолидирующую функцию, содействуя объединению усилий власти, бизнеса, общественных организаций и населения на решении социально значимых проблем региона.
4) Проводить реструктуризацию системы здравоохранения (в том числе определение числа и мощности стационарных учреждений) с учётом приоритетности первичной медико-санитарной помощи и внедрения принципов доказательного управления, базирующихся на мониторировании обоснованной потребности населения в получении специализированных стационарных и консультативных медицинских услуг.
5) Реализовать подушевой принцип финансирования медицинской помощи с постепенным переходом на полное фондодержание при должной наполненности тарифа, адекватной затратам на выполнение программы госгарантий. Довести ресурсы обеспечения системы ОМС до федеральных нормативов. Привести объёмы медицинской помощи, оказываемой по программе обязательного медицинского страхования в соответствие с территориальной Программой государственных гарантий, в зависимости от наполненности подушевого тарифа.
6) Разработать порядок получения сельским населением специализированной медицинской помощи в зонах действия межмуниципальных медицинских центров (ММЦ) и областных учреждений здравоохранения Самарской области. В состав типового комплекса ММЦ должны входить многопрофильный стационар, диагностический центр, поликлиника, отделение скорой медицинской помощи.
7) Осуществлять лекарственное обеспечение граждан на основании данных постоянного мониторинга обеспеченности населения области различными видами фармацевтических услуг, с разработкой мероприятий и программ решения проблемных ситуаций при активном привлечении к их решению фармацевтических организаций разной формы собственности. Создать механизм эффективной коммуникации между представителями фармацевтического бизнеса, системы здравоохранения, исполнительной власти и общества с целью разработки механизмов решения проблемных ситуаций.
8) В области информационного обеспечения создать:
   8.1) систему поддержки коммуникативных действий органов управления здравоохранением, медицинских организаций, бизнеса и гражданского общества, предполагающую равную доступность информации для каждого пользователя, имеющего право на доступ к ней;
   8.2) автоматизированную систему управления распределением ресурсов ЛПУ в реальном масштабе времени;

8.3) единую информационную систему персонифицированного учета потребления медицинских услуг, лекарственных средств, социальных услуг, предусматривающую мониторинг закупок в медицинских организациях, оборота и рецептурного отпуска, а также персонифицированного учёта отпуска лекарственных средств и изделий медицинского назначения.

Предлагаемые подходы позволят оптимальным образом использовать преимущества иерархического и гетерархического управления, развить инициативу людей и повысить степень профессиональной и гражданской ответственности каждого участника процессов охраны здоровья. Это будет способствовать дальнейшему развитию гражданского общества и построению системы здравоохранения, в полной мере ориентированной на человека, обеспечивающей соблюдение его прав на получение качественной своевременной помощи, на достойную жизнь.

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТАТИСТИКИ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ. РЕГИОНЫ РОССИИ

**В.Д. Фурасов[1], Т.В. Тюпикова[2]**

[1]Государственный университет управления
109542, Москва, Рязанский проспект, 99, Россия
furasov@mail.ru
тел: +7 (495) 371-70-88

[2]Объединенный институт ядерных исследований
141980, Московская обл., Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6, Россия
tanya@jinr.ru
тел: +7 (49621) 6-38-01

***Ключевые слова:*** *динамические нестационарные модели, эволюционные индексы, табели о рангах, линии развития, региональная статистика здравоохранения*

**Abstract**
Under discussion are issues of construction of non-stationary discrete dynamic models that are comparable with the results of statistical observation. The main postulates of the discussed approach are illustrated in the report in the models that form the basis of the comparative analysis of statistics in Health Care. Statistical data on population sickness rate, the number of hospital beds and doctors are considered on the unified basis. A special role belongs here to the table of ranks, where the development values, together with the regions of Russia, occupy the positions according to their evolution indices.

## Введение

Обсуждаются вопросы построения нестационарных дискретных динамических моделей, совместимых с результатами статистического наблюдения. Основные положения развиваемого подхода в докладе иллюстрируются на моделях, лежащих в основе сравнительного анализа региональной статистики здравоохранения. С единых позиций в работе рассматриваются статистические данные заболеваемости населения, числа больничных коек и численности врачей [1]. Особая роль принадлежит здесь табелям о рангах, в которых показатели развития, а вместе с ними и регионы России, занимают места в соответствии со своими эволюционными индексами.

Основой для написания статьи послужили монографии [2,3] и цикл работ, подытоженный в [4]. В названный цикл входят, в частности, работы [5-8].

## 1 Исходные соотношения

В работе рассматриваются общие вопросы, связанные с построением совместимых с результатами наблюдения динамических моделей в условиях ограниченной реально доступной статистической информации. В рамках развиваемого подхода каждому процессу социально-экономического развития $y(k)$, наблюдаемому на промежутке времени $k \in [k_0, k_1]$, вместе с дискретной нестационарной динамической моделью

$$x(k+1) = a(k)x[k],$$

где

$$a(k) = [a_1(k),...,a_n(k)] = y(k+1)y^{\mathrm{T}}[k] / \| y[k] \|^2, \quad x[k] = [x(k),\ldots,x(k-n+1)]^{\mathrm{T}}, \quad n = k_1 - k_0,$$

ставится в соответствие эволюционный индекс

$$ei(k_0,k_1)=a_1(k)+...+a_n(k).$$

Его введение $ei(k_0,k_1)$ позволяет говорить об эволюционном спаде моделируемого процесса социально-экономического развития на наблюдаемом промежутке времени, если $ei(k_0,k_1)<1$, и – о подъеме, когда $ei(k_0,k_1)>1$. Вместе с эволюционными индексами в рассмотрение вводятся табели о рангах – таблицы, в которых каждый процесс (показатель) развития и, следовательно, регион или страна занимает место в соответствии со своим эволюционным индексом. Направление упорядочивания эволюционных индексов по убыванию или возрастанию определяется направленностью, позитивной или негативной, рассматриваемой группы показателей развития.

Вектором развития наблюдаемого процесса социально-экономического развития $y(k)$, $k\in[k_0,k_1]$, называется пара $(ei(k_0,k_1),\ i(k_1\,|\,k_0))$, образованная эволюционным индексом $ei(k_0,k_1)$ и базисным темпом роста $i(k_1\,|\,k_0)=y(k_1)/y(k_0)$. На приводимых далее рисунках точка пересечения прямых $ei(k_0,k_1)=1$ и $i(k_1\,|\,k_0)=1$ может рассматриваться в качестве «полюса» или «центра» развития. На юго-западе от него с условием эволюционного спада $ei(k_0,k_1)<1$ выполняется неравенство $i(k_1\,|\,k_0)<1$. На северо-востоке выполнение условия эволюционного подъема $ei(k_0,k_1)>1$ сопровождается неравенством $i(k_1\,|\,k_0)>1$. Отрезок, соединяющийся центр развития с концом вектора $(ei(k_0,k_1),\ i(k_1\,|\,k_0))$, называется линией развития моделируемого процесса социально-экономического развития.

## 2 Заболеваемость населения

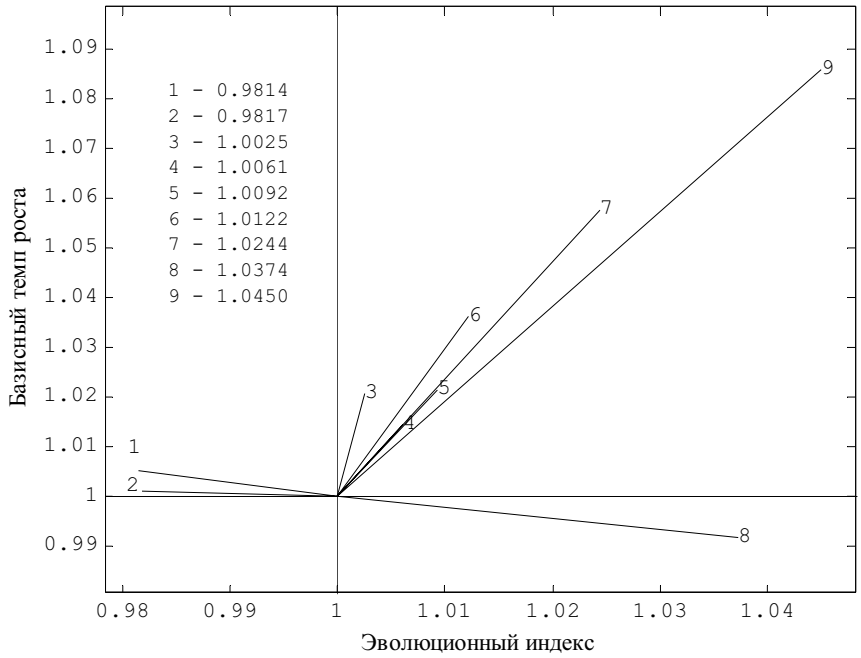
В соответствии с [1, с. 316, 317] заболеваемость населения характеризуется числом заболеваний у больных с впервые в жизни установленным диагнозом, выявленных в течение года при обращении в лечебно-профилактическое учреждение или при профилактическом осмотре. Расчет заболеваемости на 1000 человек населения осуществляется по данным Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации, как отношение числа заболеваний у больных с впервые в жизни установленным диагнозом к среднегодовой численности населения.

### 2.1 Заболеваемость населения по федеральным округам Российской Федерации

Линии развития заболеваемости населения, рассчитанные по данным [1, с. 312-314], относящимся к 2006-2010 гг., приведены на рисунке 1. Вместе с линиями развития на рисунке 1 показана табель о рангах заболеваемости населения по федеральным округам России. В развёрнутой форме она записывается таким образом:

1 - Северо-Кавказский федеральный округ…….0.9814,
2 - Центральный федеральный округ..…… 0.9817,
3 - Российская Федерация..……...1.0025,
4 - Уральский федеральный округ……1.0061,
5 - Сибирский федеральный округ……1.0092,
6 - Приволжский федеральный округ……...1.0122,
7 - Северо-Западный федеральный округ……1.0244,
8 - Южный федеральный округ……1.0374,
9 - Дальневосточный федеральный округ……1.0450.

Очевидно, что условию эволюционного спада заболеваемости $ei(2006,2010)<1$ здесь удовлетворяют только Северо-Кавказский и Центральный федеральные округа.




1 – Северо-Кавказский федеральный округ, 2 – Центральный федеральный округ, 3 – Российская Федерация, 4 – Уральский федеральный округ, 5 – Сибирский федеральный округ, 6 – Приволжский федеральный округ, 7 – Северо-Западный федеральный округ, 8 – Южный федеральный округ, 9 – Дальневосточный федеральный округ

Рисунок 1 – Линии развития заболеваемости на 10 000 человек населения по федеральным округам Российской Федерации

На приведенном рисунке Северо-Кавказский и Центральный федеральные округа, удовлетворяя условию эволюционного спада, удовлетворяют неравенству $i(2010\,|\,2006) > 1$. Противоположным неравенствам $ei(2006, 2010) > 1$ и $i(2010\,|\,2006) < 1$ здесь удовлетворяет Южный федеральный округ. Остальные федеральные округа (Уральский, Сибирский, Приволжский, Северо-Западный и Дальневосточный) вместе с эволюционным индексом Российской Федерации удовлетворяют на рисунке 1 и условию эволюционного подъема $ei(2006, 2010) > 1$ и неравенству $i(2010\,|\,2006) > 1$.

### 2.2 Заболеваемость населения по регионам России, образующим федеральным округа

Табели о рангах заболеваемости населения по регионам Российской Федерации 2006-2010 гг. даются следующими таблицами эволюционных индексов.

***Центральный федеральный округ:*** Ярославская область - 0.9265, Тамбовская область - 0.9450, г. Москва - 0.9452, Липецкая область - 0.9525, Курская область - 0.9701, Белгородская область - 0.9705, Смоленская область - 0.9707, Владимирская область - 0.9851, Тульская область - 0.9900, Калужская область - 1.0060, Орловская область - 1.0122, Воронежская область - 1.0152, Ивановская область - 1.0180, Брянская область - 1.0189, Московская область - 1.0221, Тверская область - 1.0381, Рязанская область - 1.0524, Костромская область - 1.0637.

***Северо-Западный федеральный округ:*** Ленинградская область - 0.9898, Псковская область - 0.9929, Новгородская область - 1.0005, г. Санкт-Петербург - 1.0031, Вологодская область - 1.0303, Калининградская область - 1.0421, Республика Карелия - 1.0639, Архангельская область - 1.0640, Мурманская область - 1.0771, Республика Коми - 1.0824.

***Южный федеральный округ:*** Республика Калмыкия - 0.9608, Ростовская область - 0.9741, Волгоградская область - 0.9909, Астраханская область - 0.9986,Краснодарский край - 1.0323, Республика Адыгея - 1.1391.

***Северо-Кавказский федеральный округ:*** Республика Дагестан - 0.9029, Карачаево-Черкесская Республика - 0.9145, Республика Северная Осетия - Алания- 0.9390, Ставропольский край - 0.9854, Кабардино-Балкарская Республика - 1.0181, Чеченская Республика - 1.0607, Республика Ингушетия - 1.4529.

***Приволжский федеральный округ:*** Пензенская область - 0.9339, Чувашская Республика - 0.9378, Пермский край - 0.9792, Ульяновская область - 0.9811, Республика Башкортостан - 0.9881, Оренбургская область - 0.9894, Республика Мордовия - 1.0041, Республика Татарстан - 1.0110, Самарская область - 1.0272, Республика Марий Эл - 1.0464, Кировская область - 1.0509, Саратовская область - 1.0551, Удмуртская Республика - 1.0656, Нижегородская область - 1.0749.

***Уральский федеральный округ:*** Тюменская область - 0.9466, Свердловская область - 1.0067, Курганская область - 1.0138, Челябинская область - 1.0627.

***Сибирский федеральный округ:*** Кемеровская область - 0.9729, Республика Тыва - 0.9736, Томская область - 0.9853, Новосибирская область - 0.9948, Республика Хакасия 0.9983, Омская область - 1.0007, Алтайский край - 1.0065, Красноярский край - 1.0118, Республика Алтай - 1.0197, Республика Бурятия - 1.0306, Иркутская область - 1.0478, Забайкальский край - 1.1066.

***Дальневосточный федеральный округ:*** Магаданская область - 0.9481, Чукотский автономный округ - 1.0233,Хабаровский край - 1.0291, Приморский край - 1.0346, Камчатский край -1.0437, Республика Саха (Якутия) - 1.0488, Сахалинская область - 1.0549, Амурская область - 1.0818, Еврейская автономная область - 1.0880.

Анализ построенных табелей о рангах показывает, что из 80 рассчитанных эволюционных индексов условию эволюционного спада заболеваемости населения $ei(2006,2010)<1$ удовлетворяют 32.

В десятку лучших входят эволюционные индексы Республики Дагестан, Карачаево-Черкесской Республики, Ярославской и Пензенской областей, Чувашской Республики, Республики Северная Осетия – Алания, Тамбовской области, Москвы, Тюменской и Магаданской областей, лежащие в интервале [0.9029, 0.9481].

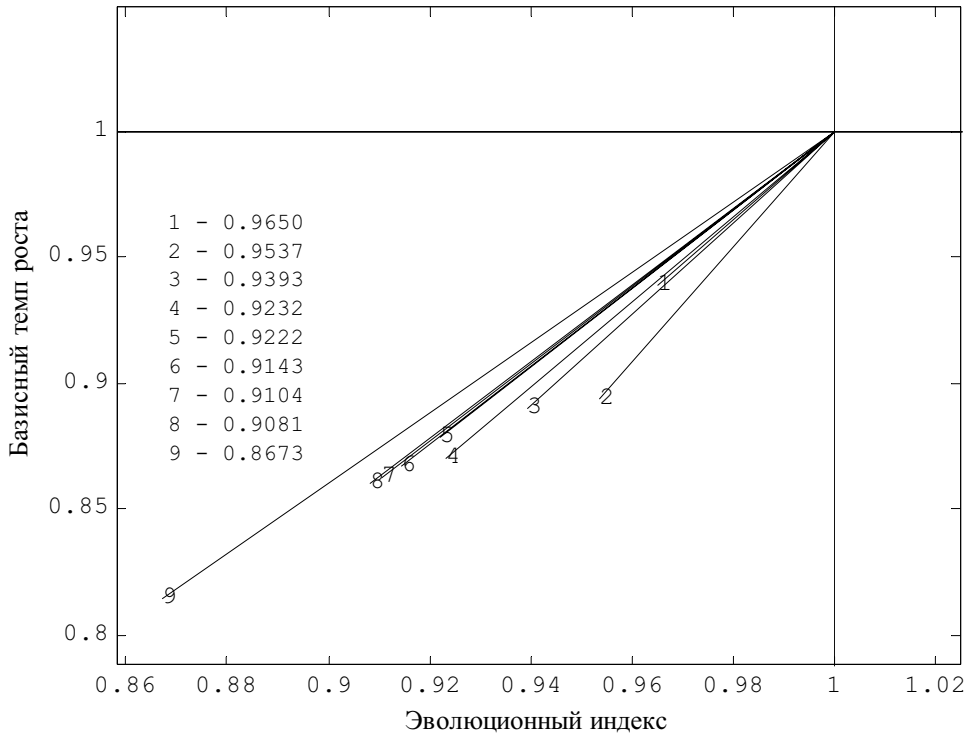
Худшими являются эволюционные индексы Архангельской области, Удмуртской Республики, Нижегородской, Мурманской и Амурской областей, Республики Коми, Еврейской автономной области, Забайкальского края, Республики Адыгея и Республики Ингушетия, изменяющиеся в диапазоне [1.0656, 1.4529].

## 3 Число больничных коек на 1000 человек населения

В больничных учреждениях учету, как отмечается в [1, с. 316], подлежат койки, оборудованные необходимым инвентарем и готовые принять больных, независимо от того, заняты они больными или нет.

### 3.1 Число больничных коек по федеральным округам Российской Федерации

Линии развития и табели о рангах числа больничных коек, рассчитанные по данным [1, с. 290, 291], относящимся к 2006-2010 гг., приведены на рисунке 2.




1 – Северо-Кавказский федеральный округ, 2 – Дальневосточный федеральный округ, 3 – Сибирский федеральный округ, 4 – Уральский федеральный округ, 5 – Северо-Западный федеральный округ, 6 – Южный федеральный округ, 7 – Российская Федерация, 8 – Приволжский федеральный округ, 9 – Центральный федеральный округ

Рисунок 2 – Линии развития числа больничных коек на 10 000 человек населения по федеральным округам Российской Федерации

В отличие от предыдущего рисунка, где большинство федеральных округов удовлетворяло неравенствам $ei(2006,2010)>1$, $i(2010\,|\,2006)>1$, на рисунке 2 все федеральные округа удовлетворяют условию эволюционного спада $ei(2006,2010)<1$ и неравенству $i(2010\,|\,2006)<1$. Удовлетворяют последним неравенствам на этом рисунке и показатели Российской Федерации.

### 3.2 Число больничных коек по регионам России, образующим федеральным округа

Табели о рангах числа больничных коек по регионам Российской Федерации 2006-2010 гг. даются следующими таблицами эволюционных индексов.

***Центральный федеральный округ:*** Ивановская область - 0.9573, Калужская область - 0.9320, Ярославская область - 0.9317, Тверская область - 0.9305, Смоленская область - 0.9192, Курская область - 0.9187, Тамбовская область - 0.9137, Орловская область - 0.9088, г. Москва - 0.9072, Воронежская область - 0.9017, Белгородская область - 0.8832, Тульская область - 0.8678, Владимирская область - 0.8666, Рязанская область - 0.8626, Липецкая область

- 0.8163, Брянская область - 0.8044, Московская область - 0.7396, Костромская область - 0.7046.

***Северо-Западный федеральный округ:*** Мурманская область - 1.0936, Республика Коми - 0.9820, Республика Карелия - 0.9713, Архангельская область - 0.9405, г. Санкт-Петербург - 0.9179, Псковская область - 0.9020, Ленинградская область - 0.8859, Калининградская область - 0.8642, Новгородская область - 0.8623, Вологодская область - 0.8175.

***Южный федеральный округ:*** Волгоградская область - 0.9580, Астраханская область - 0.9323, Краснодарский край - 0.9060, Ростовская область - 0.8925, Республика Адыгея - 0.8916, Республика Калмыкия - 0.8733.

**Северо-Кавказский федеральный округ:** Республика Ингушетия - 1.1253, Чеченская Республика - 1.1253, Кабардино-Балкарская Республика - 0.9918, Республика Северная Осетия – Алания - 0.9875, Республика Дагестан - 0.9633, Ставропольский край - 0.9054, Карачаево-Черкесская Республика - 0.8701.

***Приволжский федеральный округ:*** Республика Марий Эл - 0.9697, Ульяновская область - 0.9507, Оренбургская область - 0.9492, Самарская область - 0.9452, Республика Башкортостан - 0.9314, Саратовская область - 0.9222, Республика Мордовия - 0.9195, Пензенская область - 0.9140, Чувашская Республика - 0.9045, Пермский край - 0.8972, Нижегородская область - 0.8940, Республика Татарстан - 0.8515, Удмуртская Республика - 0.8494, Кировская область - 0.8236.

***Уральский федеральный округ:*** Курганская область - 0.9819, Свердловская область - 0.9596, Тюменская область - 0.9284, Челябинская область - 0.8667,

***Сибирский федеральный округ:*** Республика Бурятия - 1.0263, Алтайский край - 0.9820, Красноярский край - 0.9691, Томская область - 0.9636, Кемеровская область - 0.9528, Республика Хакасия - 0.9504, Иркутская область - 0.9502, Новосибирская область- 0.9253, Республика Тыва - 0.9232, Забайкальский край - 0.8940, Республика Алтай - 0.8772, Омская область - 0.8620.

***Дальневосточный федеральный округ:*** Приморский край - 1.0108, Сахалинская область - 0.9959, Хабаровский край - 0.9933, Еврейская автономная область - 0.9452, Магаданская область - 0.9372, Амурская область - 0.9233, Камчатский край - 0.9110, Республика Саха (Якутия) - 0.8568, Чукотский автономный округ - 0.7410.

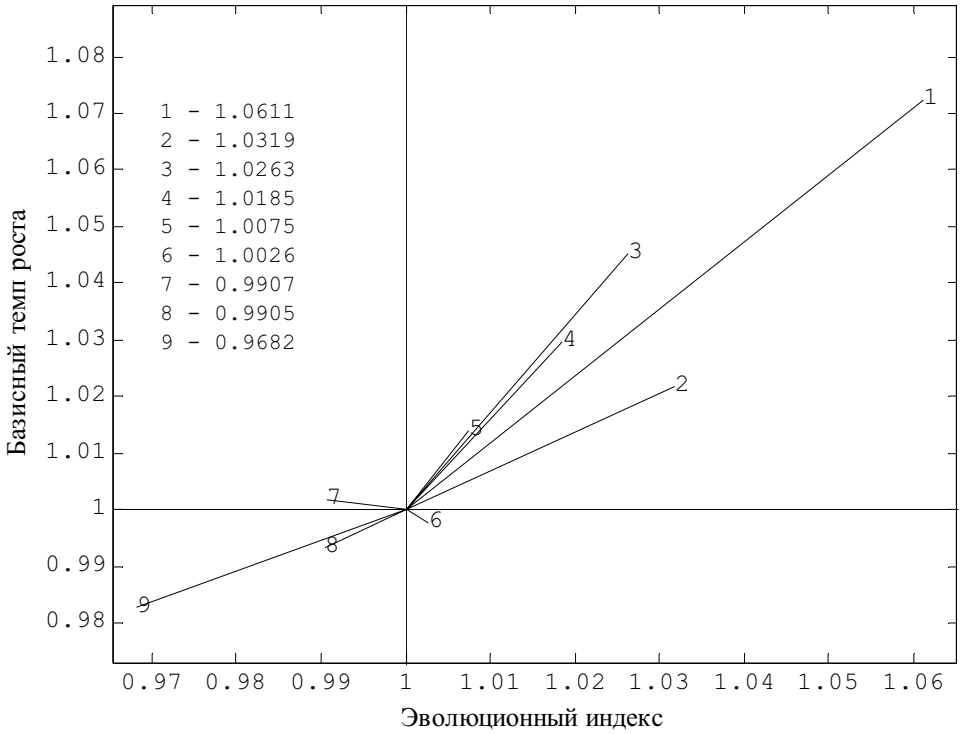
В рассчитанных табелях о рангах, положительной динамикой обладают только Республика Ингушетия, Чеченская Республика, Мурманская область, Республика Бурятия и Приморский край, эволюционные индексы, которых удовлетворяют условию эволюционного подъема $ei(2006,2010)>1$.

## 4 Численность врачей на 10 000 человек населения

Согласно [1, с. 316] в общую численность врачей включаются все врачи с высшим медицинским образованием, занятые в лечебных, санитарных организациях, учреждениях социального обеспечения, научно-исследовательских институтах, учреждениях, занятых подготовкой кадров, в аппарате органов здравоохранения и др.

### 4.1 Численность врачей по федеральным округам Российской Федерации

Табель о рангах и линии развития численности врачей, отвечающие статистике 2006-2010 гг, приведённой в [1, с. 290, 291], показаны на рисунке 3.




1 – Уральский федеральный округ, 2 – Дальневосточный федеральный округ, 3 – Северо-Западный федеральный округ, 4 – Сибирский федеральный округ, 5 – Российская Федерация, 6 – Приволжский федеральный округ, 7 – Центральный федеральный округ, 8 – Южный федеральный округ, 9 – Северо-Кавказский федеральный округ

Рисунок 3 – Линии развития численности врачей на 10 000 человек населения по федеральным округам Российской Федерации

Вместе с эволюционным индексом Российской Федерации условию эволюционного подъема $ei(2006,2010)>1$ на рисунке 3 удовлетворяют Уральский, Дальневосточный, Северо-Западный, Сибирский федеральные округа, удовлетворяющие неравенству $i(2010\,|\,2006)>1$, и Приволжский федеральный округ, удовлетворяющий неравенству $i(2010\,|\,2006)<1$. Нечто подобное происходит и с федеральными округами, удовлетворяющими условию эволюционного спада $ei(2006,2010)<1$. Южный и Северо-Кавказский федеральные округа здесь удовлетворяют неравенству $i(2010\,|\,2006)<1$, а Центральный – неравенству $i(2010\,|\,2006)>1$.

### 4.2 Численность врачей по федеральным округам Российской Федерации

Табели о рангах числа больничных коек по регионам Российской Федерации 2006-2010 гг. даются следующими таблицами эволюционных индексов.

***Центральный федеральный округ:*** Курская область - 1.0976, Ярославская область - 1.0615, Тверская область - 1.0223, Орловская область - 1.0191, Рязанская область - 1.0160, Ивановская область- 1.0097, Калужская область - 0.9979, Смоленская область - 0.9924, Белго-

родская область - 0.9908, Брянская область - 0.9904, Тамбовская область - 0.9770, Воронежская область- 0.9738, Владимирская область - 0.9678, г. Москва - 0.9677, Липецкая область - 0.9539, Тульская область - 0.9532, Костромская область - 0.9520, Московская область- 0.9437.

***Северо-Западный федеральный округ:*** Мурманская область - 1.1422, Архангельская область - 1.0388, Республика Коми - 1.0342, Республика Карелия - 1.0265, Псковская область - 1.0253, Новгородская область - 1.0089, г. Санкт-Петербург - 1.0087, Ленинградская область - 0.9863, Вологодская область - 0.9705, Калининградская область - 0.9605.

***Южный федеральный округ:*** Астраханская область - 1.0152, Ростовская область - 0.9999, Волгоградская область - 0.9998, Республика Адыгея- 0.9952, Краснодарский край - 0.9750, Республика Калмыкия- 0.9289.

***Северо-Кавказский федеральный округ:*** Республика Ингушетия - 1.3929, Чеченская Республика - 1.1878, Кабардино-Балкарская Республика - 1.0123, Республика Северная Осетия – Алания - 1.0090, Республика Дагестан - 0.9641, Карачаево-Черкесская Республика - 0.8797, Ставропольский край- 0.8615,

***Приволжский федеральный округ:*** Оренбургская область- 1.0615, Кировская область - 1.0584, Нижегородская область - 1.0101, Пензенская область - 1.0096, Саратовская область - 1.0058, Республика Мордовия - 1.0048, Пермский край - 1.0046, Удмуртская Республика- 1.0038, Чувашская Республика - 1.0009, Республика Татарстан - 0.9974, Ульяновская область - 0.9938, Республика Башкортостан - 0.9910, Самарская область - 0.9674, Республика Марий Эл - 0.9673.

***Уральский федеральный округ:*** Тюменская область - 1.0702, Свердловская область - 1.0589, Курганская область - 1.0519, Челябинская область - 1.0489.

***Сибирский федеральный округ:*** Республика Бурятия - 1.1390, Республика Алтай - 1.0622, Красноярский край - 1.0616, Республика Тыва - 1.0510, Алтайский край - 1.0338, Иркутская область - 1.0335, Томская область - 1.0304, Кемеровская область - 1.0074, Новосибирская область - 1.0055, Забайкальский край - 1.0025, Республика Хакасия - 0.9857, Омская область - 0.9514.

***Дальневосточный федеральный округ:*** Республика Саха (Якутия) - 1.0531, Амурская область - 1.0520, Хабаровский край- 1.0515, Сахалинская область- 1.0454, Камчатский край - 1.0068, Приморский край - 1.0052, Магаданская область - 0.9953, Еврейская автономная область - 0.9925, Чукотский автономный округ - 0.9614.

Условию эволюционного подъема $ei(2006,2010)>1$ здесь удовлетворяют 47 эволюционных индексов. В Центральном федеральном округе – 6 из 18, в Северо-Западном – 7 из 10, в Южном – 1 из 6, в Северо-Кавказском – 4 из 7, в Приволжском – 9 из 14, в Уральском – 4 из 4, в Сибирском – 10 из 12 и в Дальневосточном – 6 из 9.

**Заключение**

В рамках развиваемого подхода рассчитаны табели о рангах, отвечающие рассмотренной региональной статистике здравоохранения. Анализ таблиц позволяет говорить о положительной динамике 32 субъектов Российской федерации по заболеваемости населения, 4 – по числу больничных коек и 47 – по численности врачей. Положительной динамикой обладают:

***по заболеваемости населения*** – Ярославская область, Тамбовская область, г. Москва, Липецкая область, Курская область, Белгородская область, Смоленская область, Владимирская область, Тульская область, Ленинградская область, Псковская область Республика Калмыкия, Ростовская область, Волгоградская область, Астраханская область, Республика Дагестан, Карачаево-Черкесская Республика, Республика Северная Осетия - Алания, Ставропольский край, Пензенская область, Чувашская Республика, Пермский край, Ульяновская область, Республика Башкортостан, Оренбургская область, Тюменская область, Свердловская область,

Кемеровская область, Республика Тыва, Томская область, Новосибирская область, Республика Хакасия, Магаданская область, Хабаровский край, Приморский край;

***по числу больничных коек*** – Республика Ингушетия, Чеченская Республика, Мурманская область, Республика Бурятия и Приморский край;

***по численности врачей*** – Курская область, Ярославская область, Тверская область, Орловская область, Рязанская область, Ивановская область, Мурманская область, Архангельская область, Республика Коми, Республика Карелия, Псковская область, Новгородская область, г. Санкт-Петербург, Астраханская область, Республика Ингушетия, Чеченская Республика, Кабардино-Балкарская Республика, Республика Северная Осетия – Алания, Оренбургская область, Кировская область, Нижегородская область, Пензенская область, Саратовская область, Республика Мордовия, Пермский край, Удмуртская Республика, Чувашская Республика, Тюменская область, Свердловская область, Курганская область, Челябинская область, Республика Бурятия, Республика Алтай, Красноярский край, Республика Тыва, Алтайский край, Иркутская область, Томская область, Кемеровская область, Новосибирская область, Забайкальский край, Республика Саха (Якутия), Амурская область, Хабаровский край, Сахалинская область, Камчатский край, Приморский край.

**Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 10–06–00225.

**Список литературы**

[1] Регионы России. Социально-экономические показатели. 2011: Стат. сб. / Росстат. – М., 2011.
[2] Фурасов В.Д. Моделирование плохоформализуемых процессов.- М.: "Academia", 1997.
[3] Фурасов В.Д. Динамика развития: модели, индексы, оценки. - М.: "Academia", 1998.
[4] Фурасов В.Д., Фурасов Д.В. Динамический анализ статистики социально-экономического развития. Пики-2008. - М: Издательство «Спутник+», 2012.
[5] Фурасов В.Д. Социально-демографическая динамика: индексы и векторы развития // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды IX Международной конференции (22 – 28 июня 2007 г., Самара, Россия). – Самара: Самарский научный центр РАН, 2007. - С. 357-366.
[6] Фурасов В.Д., Фурасов Д.В. Сравнительный анализ развития регионов России. Численность населения и валовой региональный продукт // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды X Международной конференции (23 – 25 июня 2008 г., Самара, Россия). – Самара: Самарский научный центр РАН, 2008. - С. 323-330.
[7] Фурасов В.Д., Фурасов Д.В. Сравнительный анализ развития федеральных округов России. Модели с расширяющимися пространствами состояний, цепные и базисные эволюционные индексы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды X Международной конференции (22 – 24 июня 2009 г., Самара, Россия). – Самара: Самарский научный центр РАН, 2009. - С. 397 – 404.
[8] Фурасов В.Д., Фурасов Д.В. Сравнительный анализ развития федеральных округов России. Численность населения, рождаемость и смертность // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XII Международной конференции (21 – 23 июня 2010 г., Самара, Россия). – Самара: Самарский научный центр РАН, 2010. - С. 443-451.

# СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СФЕРЕ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ И СОЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ НАСЕЛЕНИЯ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ

**Е.А. Гриценко**

Министерство здравоохранения и социального развития Самарской области
443010, Самара, ул. Чапаевская, 181, Россия
zdravso@samregion.ru
тел: +7 (846) 334-27-02, тел/факс: +7 (846) 270-91-14

***Ключевые слова:*** *информационные технологии, здравоохранение, социальная защита, органы власти, население, адресное взаимодействие*

**Abstract**

The article is dedicated to the system of targeted interaction between the population and the authorities of the Samara region. The system is based on the principles of open software. The main component of the system is the Social Web Portal of Government Services. The system makes government services more accessible for people and raises their quality. This happens due to shortening the terms of providing the services and simplifying the whole procedure.

The users of the Samara region citizen's social cards can get personified information from different sources about their benefits and outpayments and about the government services and municipal services which were provided to them.

The new information technologies which are implemented in the sphere of healthcare and social development of the Samara region answer the strategic purpose of the federal and regional authorities to create and develop the national software platform.

Разработка современных информационных технологий в сфере здравоохранения и социальной защиты населения Самарской области полностью основывается на федеральном и региональном законодательстве об организации предоставления государственных и муниципальных услуг и принципах предоставления государством услуг населению:

- *заявительный порядок обращения;*
- *открытость* деятельности органов, предоставляющих государственные услуги, и органов, предоставляющих муниципальные услуги;
- *доступность* обращения за предоставлением государственных и муниципальных услуг, в том числе для лиц с ограниченными возможностями;
- *возможность* получения государственных и муниципальных услуг *в электронной форме*, если это не запрещено законом, а также в иных формах, предусмотренных законодательством Российской Федерации, по выбору заявителя.

При разработке информационных технологий в сфере здравоохранения и социальной защиты населения Самарской области используются следующие принципы построения информационных систем:

- *полная совместимость со свободным программным обеспечением и российской программной платформой AltLinux, построение систем на принципах открытого программного обеспечения (в соответствии с задачами, поставленными Президентом РФ, Правительством РФ и Самарской области)*;
- использование СПО на серверном оборудовании;

- постепенный переход на использование СПО на рабочих местах;
- кроссплатформенность информационных систем;
- полная совместимость и интеграция в Электронное Правительство Самарской области и федеральные информационные ресурсы,
- электронное внутриведомственное и межведомственное взаимодействие,
- интеграция с имеющимися базами данных и информационными системами,
- использование «тонкого» клиента пользователями системы, оптимальные требования к серверному оборудованию,
- удобство работы с системой, «дружественный» интерфейс,
- комплексное обеспечение информационной безопасности.

*В 2011 г. МЗСР получен Сертификат совместимости Системы адресного взаимодействия населения и органов власти Самарской области (далее – САВ) с российской программной платформой AltLinux.*

«Социальный портал государственных услуг» (далее Портал) является важнейшим компонентом САВ, обеспечивающей адресное взаимодействие:

- между гражданами и органами исполнительной власти (G2C);
- между гражданами и бизнесом (B2C);
- между бизнесом и органами исполнительной власти (B2G);
- внутри- и межведомственное взаимодействие отдельных органов исполнительной власти (G2G).

Её использование приводит к повышению качества и доступности государственных услуг для граждан и организаций за счет упрощения процедуры и сокращения сроков их оказания, а так же за счет снижения административных издержек, связанных с их получением.

Именно Портал является общедоступной площадкой по предоставлению государственных и муниципальных услуг населению региона в электронной форме. Здесь каждый житель Самарского региона может получить персональную информацию о доступных именно для него мерах социальной поддержки, предоставленных ему льготах, социальных и пенсионных выплатах, сведения по его медицинскому обслуживанию, начисленных ему штрафах ГИБДД, его задолженностях по налогам, адресные извещения об изменениях в условиях предоставления социальных льгот и выплат, информацию о вакансиях. Он может записаться на прием в органы социальной защиты населения и медицинские учреждения, получить информацию об этапе подготовки его документов в органах ЗАГС и УФМС, оставить электронную заявку на государственную регистрацию брака. Портал дает возможность направить электронное обращение к руководителям органов исполнительной власти и местного самоуправления Самарской области и получить в обязательном порядке адресный официальный ответ. Здесь же предусмотрена возможность распечатки штрафных квитанций и запроса на изготовление официальных справок.

Среднее количество обращений к Порталу ежемесячно составляет более 300 тысяч.

Доступ к Порталу возможен посредством сети Интернет по адресу социальныйпортал.рф и защищенной сети общественных терминалов «Интернет-киоск» (281 шт. на всей территории Самарской области).

Интернет-киоски – это общедоступные вандалостойкие информационные терминалы с бесплатным для граждан обслуживанием, защищенные в соответствии с законом 152-ФЗ «О персональных данных». По сути – это «персональные компьютеры коллективного пользования». Их дружественный интерфейс и программные средства интерактивной помощи позволяют любому пользователю, не обладающему даже элементарными навыками работы с ком-

пьютером, быстро и легко получать государственные и муниципальные услуги в электронном виде.

Для доступа граждан к информации о порядке предоставления государственных и муниципальных услуг применяются *нормативно-правовые базы знаний*. Информация об услугах представлена в соответствии с требованиями *постановления Правительства Российской Федерации от 15 июня 2009 г. № 478*. Нормативно-правовые базы знаний содержат сведения:

- *О действующих законах и нормативных актах* на федеральном, региональном и муниципальном уровнях;
- *О регламентах предоставления государственных и муниципальных услуг* населению: процедурах их назначения, правилах оформления, возможных причинах отказа и порядке обжалования в случае несогласия с принятыми решениями;
- *Об учреждениях, предоставляющих социальные и медицинские услуги* населению (об их адресах, телефонах, контактных лицах и часах работы).

Также на все действующие услуги МЗСР пользователи могут, ответив на вопросы анкеты, автоматически сформировать заявление на предоставление услуги, сохранить его, отправить себе на электронную почту, а по ряду услуг – уже и специалисту для электронной обработки и формирования ответа.

Гражданин имеет возможность мониторинга хода исполнения его электронного заявления на услугу в органы власти и учреждения.

С помощью сервиса *«Электронная запись на прием»* граждане имеют возможность записаться в органы социальной защиты населения, медицинские учреждения и другие гос. учреждения .

Сервис «Организация отдыха и оздоровления детей» позволяет забронировать детские льготные путевки в оздоровительные учреждения Самарской области. С *30.04.2011* на Социальном портале размещена информация о *10 570* путевках в *23* оздоровительных учреждения.

В разделе «*Электронная регистратура*» любой пользователь может в легкой и доступной форме

- получать подробную информацию об услугах лечебно-профилактических учреждений (ЛПУ) и расписании работы медицинских специалистов;
- без простаивания в очередях записываться удаленно на прием к выбранному специалисту, выбирая удобное для себя время приема;
- получать информацию о личной истории работы с веб-сервисом записи на прием.

Электронная запись на прием осуществляется в рамках системы обязательного медицинского страхования и может производиться любым удобным для каждого конкретного пользователя способом:

- через «Социальный портал государственных услуг» Самарской области по адресам:
- http://социальныйпортал.рф/mzsr/portal/eregistry.do или
- http://suprema63.ru/mzsr/portal/eregistry.do
- через защищенную сеть «Интернет-киосков», расположенных в социально значимых учреждениях региона
- через Интернет-сайт конкретного медицинского учреждения.

В настоящее время разработаны различные варианты пользовательского интерфейса Системы: для desktop-систем, для инфоматов (сенсорный интерфейс), готовится ее мобильная версия. В основу «Электронной регистратуры» заложена возможность подключения внешних медицинских информационных систем и интеграции с внешними провайдерами аналогичных услуг. Интерфейс системы построен на основе web-интерфейса записи на прием и рабочего места регистратора поликлиники. Система создана таким образом, чтобы в короткие сроки быть интегрированной в информационное пространство региона. Ее применение приводит к

повышению эффективности использования ресурсов регионального здравоохранения за счет снижения количества пациентов в ЛПУ и более оптимального их распределения на прием к специалистам.

Обращение в электронную регистратуру постепенно становится нормой жизни в Самарском регионе: за последние 2 месяца по электронным талонам на прием к врачам обратились *19 616* человек, а общее число обратившихся к ресурсу пользователей (как к информационному сервису) составило *225 060*.

Также на Портале доступен ряд информационных сервисов:

- *Социальные и пенсионные выплаты*
- *Медицинские услуги и льготные лекарства*
- *Наличие и стоимость лекарственных препаратов в аптечных сетях*
- *Условия приема в образовательные учреждения*
- *Штрафы ГИБДД и административные правонарушения*
- *Вакансии на рынке труда Самарской области*
- *Информирование о готовности загранпаспорта*
- *Сведения об аннулировании разрешений на работу для иностранных граждан*
- *Информирование о социально-значимых и культурных мероприятиях*
- *Информационные сервисы муниципальных образований*
- *Информационные сервисы политических партий*

Большой популярностью пользуется раздел *«Лекарства»*, где любой пользователь может:

- получить информацию о наличии тех или иных лекарственных препаратов в аптеках Самарской области,
- узнать предельную цену на них;
- просматривать, скачивать или осуществлять поиск по реестру цен на лекарства.

В разделе *«Дополнительное лекарственное обеспечение»* любой житель Самарской области может получить персонифицированную информацию о праве на дополнительное лекарственное обеспечение.

Для этого ему надо лишь заполнить здесь специальную электронную форму.

Для пользователей социальных карт жителя Самарской области в САВ предусмотрены дополнительные возможности. На текущий момент держателями социальных карт являются более 450 тысяч жителей региона.

Социальная карта – это именная пластиковая карта, которая является, своего рода, электронным ключом к наиболее значимым сведениям о своем пользователе (его социальном, правовом, имущественном и иных статусах), формируемым в закрытом разделе Портала – «Ваш социальный паспорт». Здесь пользователи социальных карт получают персонифицированную информацию из различных государственных и муниципальных учреждений. Данные сведения интегрируются в социальном паспорте за счет использования динамически пополняемых распределённых структур данных. Выпуск социальных карт осуществляется с учетом требований к унифицированной социальной карте гражданина РФ.

Благодаря используемым технологиям защиты информации, соответствующим всем требованиям законодательства, гарантируется конфиденциальность личной информации пользователя социальной карты, безопасность ее передачи и обработки.

Причем, пользователи социальных карт могут попасть в раздел «*Ваш социальный паспорт*» не только через Интернет-киоск, но и со своего персонального компьютера, подключенного к Интернету. Для этого им необходимо в специальном поле Портала ввести номер своей карты и ее ПИН-код, либо пройти процедуру регистрации и в дальнейшем заходить просто под своим именем и паролем.

В данном разделе только держатель социальной карты может получать персонифицированную информацию из различных источников об оказанных ему государственных и муниципальных услугах, а также о полагающихся ему льготах и выплатах.

В частности здесь он может контролировать сведения о:

- социальных выплатах ,
- об оказанных ему медицинских услугах (их типе, количестве, стоимости и сроках их предоставления), а также
  - о выписанных ему рецептах, находящихся на отсроченном обслуживании (здесь указывается международное непатентованное наименование лекарственного препарата, форма выпуска, количество, номер рецепта, аптека, где находится рецепт на ожидании);
  - о поступлении необходимых ему лекарственных средств по рецептам, находящимся на отсроченном обслуживании (здесь указывается международное непатентованное и торговое наименование лекарственного препарата, количество, дата поступления, дата, до которой следует получить лекарство в аптеке);
  - о выданных ему лекарственных средствах (здесь указывается международное непатентованное и торговое наименование лекарственного препарата, форма выпуска, количество упаковок, стоимость, дата выдачи, номер рецепта).

Посредством социальной карты сельские жители Самарской области могут значительно экономить свое личное время при записи на прием в офисе врача общей практики. Благодаря специально разработанной системе (АИС «ВОП») медицинские работники еще в момент записи человека на прием могут уточнить его персональные данные: проверить достоверность информации о пациенте, которая хранится в базе данных, получить сведения о его последнем прохождении флюрографии и онкоосмотра, а также проверить наличие амбулаторной карты. Данная система внедрена во всех офисах врачей общей практики Самарской области, обеспечивая тем самым единство информационного пространства региона и равенство возможностей при получении электронных медицинских услуг всех его жителей, независимо от территории проживания.

С помощью сервисов «Интернет-приемной» граждане могут подать электронное обращение в органы исполнительной, законодательной власти, учреждения здравоохранения и социальной защиты Самарской области. За прошедший год было подано *10 842* электронных обращения в Минздравсоцразвития региона и более *20 000* рассмотренных электронных обращений в органы власти Самарской области за прошлый год .

Кроме того, САВ обеспечивает эффективное адресное взаимодействие за счет *вовлечения граждан* в *равноправный диалог* с органами власти, когда каждый человек знает свои права и возможности их реализации. Это обеспечивается в том числе за счет внедренных уникальных способов мониторинга общественного мнения и оценки работы органов власти.

САВ является результатом многолетних научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию региональной «Системы предоставления государственных и муниципальных услуг населению», в основу которой заложены принципиально новые информационные технологии. Данная Система неоднократно получала высшие оценки на престижных отечественных и зарубежных выставках. Так, она получила Золотую медаль 54-й Всемирной выставки инноваций «Брюссель-Эврика! - 2005», вошла в тройку лучших проектов на 6-й международной конференции по автономным агентам и мультиагентным системам AAMAS-2007, заняла 1 место в номинации «ПО для госсектора» на Всероссийском конкурсе «SOFTOOL-2008» .

На состоявшихся в Общественной палате РФ 29 октября 2008 года общественных слушаниях «Информационное общество – стратегия развития», посвященных вопросам реализации

Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации и построения информационного общества данная Система была высоко отмечена и рекомендована для использования в других субъектах РФ.

Получена рекомендация международной научно-практической конференции «Эффективность государственного управления в современных российских условиях», состоявшейся 17 марта 2009 года в рамках совместного проекта Программы развития ООН в России и Российской академии государственной службы при Президенте РФ по использованию и внедрению настоящей системы.

На прошедшей в Тунисе в ноябре 2010 года международной выставке SIB IT 2010, представленные компанией-разработчиком данной Системы решения в сфере электронной медицины вызвали большую заинтересованность у посетителей выставки, в том числе и у сотрудников министерства здравоохранения Туниса. Результатом чего стало внесение этой компании в список сертифицированных предприятий, с которыми планируется дальнейшее сотрудничество при разработке электронных сервисов для системы здравоохранения Туниса.

В планах на ближайшую перспективу (4 квартал этого года) перед МЗСР стоят задачи развития информационных технологий в сфере здравоохранения и социального развития по следующим основным направлениям:

- развитие САВ, Портала и сервисов,
- дальнейшая реализация перехода на 100% оказание услуг в электронной форме,
- планомерный переход на СПО, пилотное внедрение СПО «AltLinux» на рабочие станции специалистов в системе здравоохранения и социального развития,
- разработка и внедрение мобильной версии электронного сервиса записи на прием;
- интеграция внешних ресурсов, необходимых для назначения мер социальной поддержки, и системы адресного взаимодействия населения и органов исполнительной власти Самарской области;
- разработка информационных сервисов для доступа к информации о мерах социальной поддержки, пенсионном обеспечении, медицинском обслуживании.

**Заключение**

Таким образом, внедряемые в сфере здравоохранения и социального развития Самарской области новые информационные технологии соответствуют своей главной стратегической цели, заключающейся в повышении качества жизни каждого жителя региона за счет использования и популяризации IT-технологий. Они создает максимально комфортные условия для взаимодействия граждан с государственными и муниципальными учреждениями, обеспечивают «прозрачность» их деятельности и способствуют повышению эффективности их работы.

Кроме того, разрабатываемые и внедряемые МЗСР новые информационные технологии отвечают и полностью соответствуют задачам, поставленным Президентом РФ Д.А. Медведевым по созданию и развитию Национальной программной платформы (НПП), а также разработке различных приложений, основанных на использовании свободного программного обеспечения, сформулированным в Распоряжении Правительства РФ от 17.12.2010 № 2299-р.

Внедрение и широкое распространение Национальной программной платформы позволит установить единообразие программного обеспечения в различных государственных структурах, устранить зависимость информационных систем государственных организаций от зарубежных производителей, сэкономить бюджетные средства и поддержать российских производителей.

# ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРОСА ЭКСПЕРТОВ, ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ ОБЩЕСТВЕННЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ, НАСЕЛЕНИЯ

**Т.В. Тяпухина, Е.В. Кузьмук, Л.В. Кведер, М.С. Буклешева, А.А. Гермизина**

Самарский областной медицинский информационно-аналитический центр
443095, Самара, ул. Ташкентская, 159, Россия
miac@medlan.samara.ru
тел: +7 (846) 256-17-95, факс: +7 (846) 256-17-95

***Ключевые слова:*** *здравоохранение, опрос, модернизация*

**Abstract**

The article presents the results of the poll of experts, representatives of social organizations and citizens about the most actual problems of healthcare in Russia and particularly in the Samara region and ways of their solution. 21 experts, representatives of 14 social organizations and 1 200 citizens of 31 administrative territories of the Samara region took part in the poll.

The poll resulted in making proposals on the modernization of the regional healthcare system.

Пути модернизации здравоохранения Самарской области определяются в большой степени проблемами, существующими в регионе. Это и проблемы мирового уровня, например, постарение населения, рост заболеваемости хроническими болезнями. Это и общероссийские проблемы – низкий уровень финансирования отрасли, кадровый дефицит, исторически сложившаяся система оказания медицинской помощи, в которой превалирует стационарная помощь и т.д. Но есть и проблемы, которые можно и нужно решать на региональном уровне, в первую очередь, это вопросы управления иповышения эффективности деятельности системы здравоохранения.

Одним из наиболее эффективных и распространённых путей определения проблемных ситуаций и принятия обоснованных решений по их преодолениюявляется учет мнения экспертов – специалистов в интересующей сфере деятельности, основанного на их опыте, знаниях и интуиции. Опрос экспертов применяют в ситуациях, когда выбор, обоснование и оценка последствий решений не могут быть выполнены на основе точных расчётов. Такие ситуации нередко возникают при разработке современных проблем управления, в т.ч. при прогнозировании и долгосрочном планировании. Получаемое в результате обработки обобщённое мнение экспертов принимается как решение проблемы. Комплексное использование интуиции (неосознанного мышления), логического мышления и количественных оценок с их формальной обработкой позволяет получить эффективное решение проблемы [1].

В настоящем исследовании былиопрошены высококвалифицированные и авторитетные специалисты в области здравоохранения. Среди них были как специалисты федерального значения (Д.Д.Венедиктов – заведующий кафедрой медицинской информатики и управления при Президиуме РАМН, В.В.Власов – президент Общества специалистов доказательной медицины, П.А.Воробьёв – президент Общества фармакоэкономических исследований, Ю.М.Комаров – вице-президент Российского медицинского общества, А.Г.Саркисян – председатель Исполнительного комитета Пироговского движения врачей и др.), так и регионального (С.В.Бородулин – главный врач МБУЗ Сергиевская ЦРБ, Р.А.Галкин – профессор Самарского государственного медицинского университета, И.А.Гехт – начальник информационно-аналитического управления ТФОМС, Н.Ф.Манаков –председатель Самарской областной об-

щественной организации «Ассоциация ветеранов медицинских работников Самарской области», Н.Ф.Прохоренко –президент Ассоциации медицинских страховых компаний Самарской областии др.). Всего в опросе участвовал 21 эксперт.

Опрос проводился методом интервьюирования. Интервьюирование осуществлялось как индивидуально, так и в форме «круглого стола». Мнения экспертов были обобщены по проблемам.

Кроме того, в работе проводился масштабный социологический опрос населения и представителей общественных организаций.

При опросе выявились проблемы, решение которых считают актуальным большинство экспертов.

**Результаты опроса экспертов в сфере здравоохранения**

Практически все эксперты считают целесообразным внедрение в амбулаторно-поликлинических учреждениях системы фондодержания, но при соблюдении ряда условий. Для обеспечения эффективных механизмов управления финансовыми потоками и контроля за их рациональностью необходимо разработать и внедрить региональные стандарты, содержащие чёткие критерии необходимости госпитализации и частоту возможных исходов при той или иной модели пациента. Потребность в госпитализации значительно изменилась, и вопросы сдерживания вторичных услуг не всегда могут быть оправданы. В настоящих условиях, по мнению Р.А. Галкина и И.А. Гехта, предпочтительнее пользоваться смешанной формой оплаты за медицинские услуги, которая сочетает фондодержание с оплатой за произведённые услуги, тем более, что законом об ОМС предусмотрено при любой форме оплаты вести персонифицированный учёт выполненных услуг.

В то же время при введении фондодержания необходимо:

- довести ресурсное обеспечение системы ОМС до федеральных нормативов;
- ввести одноканальное финансирование с полным тарифом;
- ввести поправочные коэффициенты в соответствии со структурой прикреплённого населения к поликлиникам;
- исключить из системы взаиморасчётов (поликлиника-стационар) формы патологии, за которые поликлиники не несут ответственности;
- максимально ограничить использование сэкономленных поликлиникой за счет фондодержаниясредств только на рост заработной платы (как это сделано в Англии).

К числу основных проблем внедрения фондодержания, по мнению отдельных экспертов, относятся:

- нежелание придать процессу планирования и распределения средств в здравоохранении должную прозрачность и системность;
- недостаток финансирования;
- отсутствие возможности формирования реальной экономии средств на уровне субъекта первичной медико-социальной помощи, что практически полностью устраняет мотивацию фондодержателя.

Остальные проблемы носят в основном технический характер и при желании решаются относительно легко.

По проблемам развития общеврачебной практики семь специалистов высказали согласованное мнение, что расширение общеврачебной практики отчасти позволит решить проблему дефицита узких специалистов в первичном звене,приведет к более эффективному использованию ресурсов, усилению профилактики заболеваний и укреплению здоровья населения.

Мнения разошлись по вопросу: где наиболее актуально вводить общеврачебную практику. Часть экспертов считают, что её преимущественное развитие должно быть в городах, а узкие специалисты должны быть сосредоточены в крупных многопрофильных поликлиниках.

Другие предлагают сделать акцент на развитии службы ВОП в сельских районах, особенно в отдалённых малочисленных поселениях, где организовать оказание специализированной медицинской помощи практически невозможно.

По мнению ряда экспертов, развитие общеврачебной практики должно идти параллельно с развитием специализированной помощи, а не вместо неё. Переход в некоторых развитых странах к системе групповой практики говорит о возросшей потребности в специализированной помощи в связи с постарением населения.

При этом отмечается, что эффективное развитие института ВОП возможно только при построении адекватной системы их образования, обеспечивающей нужный уровень профессиональной подготовки. Начиная с вузовского этапа надо выращивать новое поколение врачей с соответствующим менталитетом. Последипломное обучение у ВОП должно быть не меньше 5-6 лет.

Оптимальным шагом в развитии службы ВОП будет поддержка личной инициативы отдельных врачей, которые сами готовы взять на себя функции врача общей практики, имея психологическую, организационную, юридическую и экономическую готовность к этой работе. Этим специалистам необходимо максимально помогать, формируя своеобразные зоны роста на «пилотных» площадках.

Кроме того, необходимо дать каждому врачу в помощники фельдшера и двух, а в сельских районах – трёх медицинских сестёр.

В связи с острой проблемой недостатка кадров, обеспечения преемственности медицинской помощи и повышения эффективности использования оборудования обсуждалась целесообразность объединения поликлиники и стационара в одном учреждении.В крупных и средних городах при условии достаточной кадровой и материальной оснащённости целесообразнее их существование в качестве самодостаточных учреждений. Возможна совместная деятельность поликлиник и стационаров города по организации медицинской помощи на договорных началах.

В сельских районах поликлиники истационары уже объединены в ЦРБ, что даёт ряд преимуществ: сокращение административно-хозяйственной службы, наличие более мощной единой службы диагностики, возможность внедрения современных технологий на амбулаторном уровне, улучшение консультативной помощи, манёвренность в расстановке кадров, возможность более оперативно и качественно решать вопросы экстренной медицинской помощи.

Для улучшения ситуации в сельских районах большинство экспертов считает целесообразным создание межмуниципальных медицинских центров (ММЦ) на балансе субъектов РФ при условии изначального полноценного оснащения и кадрового обеспечения этих центров без ломки работы остальных муниципальных ЛПУ. Формирование должно идти параллельно с развитием служб долечивания, реабилитации, медико-социальной помощи на базе освобождающихся мощностей. Часть первичной помощи можно передать парамедикам, управлять которыми будет врач.

Для оценки возможных рисков и минимизации негативных последствий целесообразно предусмотреть двухэтапный переход к созданию ММЦ: сначала интегрировать учреждения здравоохранения нескольких муниципальных образований в ММЦ на функциональной основе, а затем произвести трансформацию функциональных ММЦ в единое учреждение.

Кроме создания ММЦ, эксперты предложили распространять среди сельского населения девайсы, позволяющие измерять артериальное давление, уровень глюкозы, снять ЭКГ и т.д., с выходом в облачные технологии.

При этом эксперты отмечают, что если не будут предприняты решительные меры по улучшению профессиональной подготовки медицинских специалистов, никакие реформы в здравоохранении не изменят ситуации. Несущественные прибавки к зарплате при остром дефиците специалистов не будут иметь эффекта.

Для обеспечения кадрами учреждений здравоохранения отдельные эксперты считают полезным расширение целевого приёма в СамГМУ по направлению руководителей органов и учреждений здравоохранения с заключением договора об обязательной отработке не менее трёх лет. Для повышения мотивации молодых специалистов к работе по специальности необходимо улучшение условий труда (в частности, наличие автотранспорта для обслуживания больных на дому) и повышение социальной защищённости (ведомственное жильё, бесплатное санаторно-курортное лечение).

В рамках непрерывного профессионального развития необходимо создать в регионе систему профессиональных медицинских наставников, обеспечить возможность профессионального роста на рабочих местах (дистанционное обучение, наличие выхода в Интернет, доступ к базам данных доказательной медицины, лекции приглашённых специалистов и др.).

Для повышения качества медицинской помощи,по мнению большинства экспертов, нужна аккредитация медицинских учреждений. Но вопросы аккредитации следует тщательно предварительно отработать, чтобы не повторить ошибки лицензирования, когдавсе ЛПУ получили одинаковые лицензии, несмотря на совершенно различные условия их деятельности, оснащение, кадровый состав, материальную базу и т.д.

Отмечаемое многими экспертами достоинство аккредитации состоит в возможности рейтингования ЛПУ, что позволит увеличить степень информированности населения и создать эффективный механизм мотивации руководителей и сотрудников ЛПУ, в том числе и финансового стимулирования. Мониторинг рейтингов ЛПУ важен и для страховых компаний с позиции популяризации ДМС и создания механизма отбора ЛПУ-участников программы ДМС, роста рынка медицинских услуг и повышения их качества.Системы рейтингования лечебных учреждений уже сейчас создаются в ряде регионов России, например: в Москве, Татарстане, Чувашии, Челябинской и Иркутской областях.

В то же время, рейтингование врачей, по мнению некоторых экспертов, вводить надо с большой долей осторожности. Рейтинги врачей должны определяться только специалистами, хотя и с учётом мнения населения.

В последнее время все большее внимание уделяется вопросам партнёрства государственной и частной систем здравоохранения. Существует очевидная необходимость максимального развития такого сотрудничества на принципах истинного равноправия и адекватной методической поддержки. Но это вопрос большой социальной ответственности.

Следует чётко представлять, что успешная интеграция частного сектора приведёт к изменению направления потоков пациентов, а это в свою очередь – к необходимости сокращения объёмов в муниципальных и государственных ЛПУ. Оптимальным является привлечение частных ЛПУ кучастию в выполнении программы ОМС.

В плане защиты прав пациентов, по мнению пяти экспертов, важным является создание круглосуточной «горячей линии» путем консолидации на единых принципах реагирования и систематизации всех обращений пациентов уже существующих локусов контроля: СМО, ТФОМС, Росздравнадзора, органов управления здравоохранением, общественных организацийпо защите прав пациентов, администраций ЛПУ и т.д. Её финансирование возможно за счёт средств страховых медицинских организаций.

Существенной проблемой является низкая степень ответственности граждан за своё здоровье. В настоящее время гражданин не несёт никакой ответственности за невыполнение рекомендаций врачей. Это ведёт к повторным госпитализациям, обращениям за скорой медицинской помощью и в поликлиники, которых можно было бы избежать. Необходимо создавать разнообразные механизмы мотивации населения на заботу о своём здоровье, включая денежную заинтересованность. Так, например, в Челябинской области за посещение центра здоровья ТФОМС выплачивает посетителю 500 рублей.

Необходимо учить население правилам и приёмам первой помощи, информировать граждан на всех уровнях, что от их умения и навыков, а также их своевременного применения мо-

жет напрямую зависеть жизнь родных и близких людей. Некоторыми экспертами предлагается оснащать пункты оказания первой помощи в местах повышенной вероятности возникновения неотложных состояний (например, в крупных супермаркетах) и разрабатывать стандарты оказания первой помощи.

Актуально создание различных групп самопомощи, санитарного актива среди населения по различным профилактическим программам, в том числе по программе «Первая помощь», организация круглосуточных консультативных врачебныхслужб по телефону.

Для пожилых людей весьма актуальны «службы тревоги» (тревожная кнопка). «Тревожная кнопка» представляет собой специальное устройство, по типу сотового телефона с увеличенными клавишами. При нажатии на кнопку «SOS» происходит соединение с оператором диспетчерской службы. На мониторе оператора должна появиться вся необходимая информация о звонившем (ФИО, адрес, данные электронной истории болезни, контакты с близкими или социальным работником). При необходимости оператор переадресовывает вызов в скорую медицинскую помощь, поликлинику, МЧС и др.

Эксперты считают необходимым объединение усилий служб МЧС, скорой медицинской помощи, управления внутренних дел по оказанию первой помощи. Подготовку сотрудников МЧС и полиции должны обеспечить органы здравоохранения.Следует рассмотреть возможность возрождения санитарной авиации.

Больше внимания следует уделять вопросам усиления влияния общественности на принятие управленческих решений в сфере здравоохранения. Необходимо создание при региональном органе управления здравоохранением Общественного Совета по охране здоровья, консолидирующего властные и общественные (общественные медицинские и фармацевтические организации, общества пациентов) структуры. В его задачи должно входить обсуждение проблем здравоохранения, разработки и изменения нормативных правовых актов в сфере здравоохранения, медицинского образования, фармацевтики и рынка лекарственных средств, а также широкое информирование населения по вопросам оказания медицинской помощи, в т. ч. по индикаторам результативности деятельности ЛПУ. Таким образом, управление здравоохранением станет государственно-общественным. Предлагается разработать и принять на уровне региона трёхсторонний общественный договор между органами власти, медицинским сообществом и обществами пациентов – «Медико-социальную хартию».

Особое внимание следует уделять мониторингу мнения врачей о направлениях модернизации отрасли. Медицинские работники не должны быть слепыми исполнителями реформ, такие реформы неизбежно будут «пробуксовывать». Административное управление и врачебное (сестринское) самоуправление должны пересекаться. Власть должна делегировать больше полномочий медицинскому сообществу, в том числе врачи должны иметь возможность участия в подготовке законопроектов. Например, в Дании без одобрения ассоциации врачей не рассматривается ни один вопрос, касающийся здоровья населения, даже в парламенте.

Согласно мнению экспертов, целесообразным представляется делегировать профессиональному медицинскому сообществу региона следующие функции и ответственность за них:

- по разработке стандартов, рекомендаций, клинических протоколов и иных регламентаций профессиональной медицинской деятельности;
- по выполнению работ в области независимой медико-социальной, этической экспертизы и экспертизы качества медицинской помощи;
- по координации последипломного медицинского образования (специализация, повышение квалификации и усовершенствование);
- по аттестации и сертификации медицинских специалистов;
- по определению целесообразности приглашения ведущих отечественных и зарубежных специалистов для проведения мастер-классов и направления региональных специалистов на стажировку.

Важным является также создание единого медицинского информационно-коммуникационного пространства в России и в регионах.

**Результаты опроса представителей общественных организаций**

В опросе общественных организаций участвовали 14 представителей. Наиболее активными участниками опроса явились представители Ассоциации медицинских страховых организаций, Российской диабетической ассоциации, Российского Красного Креста и Федерации инвалидов Поволжья.

Респонденты считают, что для повышения мотивации общественных организаций к участию в управлении региональным здравоохранением органам управления необходимо совместно с общественными организациями чётко определить сферы их возможной компетенции, разработать понятный механизм принятия решений с учётом их мнения.

Общественным организациям, в свою очередь, необходимо избрать координирующий совет, утвердить положение о его работе и активно включаться в проекты, направленные в помощь здравоохранению.

Опрошенные представители общественных организаций отмечают, что в качестве мер усиления работы по профилактике заболеваний для всех групп населения следует предусмотреть максимальное информирование населения об эффективности здорового образа жизни, важности своевременного оказания помощи, а пациентов – о риске развития наиболее возможных патологических состояний и мерах по их профилактике.

Среди актуальных проблем отмечается нехватка хосписов для больных онкологическими заболеваниями и потребность в улучшении условий, в частности, за счёт устройства одно- и двухместных палат.

Важна эффективная организация обратной связи с населением, позволяющей гражданам оперативно и адресно сообщать в учреждения и органы управления здравоохранением информацию об имеющихся недостатках и получать отчёт о принятых мерах.Особо можно отметить важность наличия сайтов общественных организаций или страничек на портале Минздравсоцразвития Самарской области.

Существование гражданской инициативы в Самарской области очевидно, но представлена она крайне неоднородно: решающую роль играет не столько актуальность направления действия общественников, сколько личностные качества отдельных лидеров и уровень их компетентности.

**Результаты анкетирования населения**

Всего было опрошено 1200 человек, в том числе 334 мужчины (27,8 %) и 866 женщин (72,2 %) из 31 административной территории. Среди респондентов 80,9 % проживают в городах Самарской области; 19,1 % – в сельской местности. Средний возраст опрошенных составляет 46 лет. Возрастная структура приближена к структуре, характерной для жителей Самарской области в целом: 72 % – лица трудоспособного возраста и 28 % – нетрудоспособного.39,8 % опрошенных имеют высшее или незаконченное высшее образование.

Только 18 % респондентов постоянно занимаются собственным здоровьем, из них больше половины (56,7 %) – лица трудоспособного возраста. 39 % по разным причинам практически не занимаются своим здоровьем, при этом только 2,8 % считают, что у них нет в этом необходимости.Рекомендации врача всегда выполняют только треть (31,0 %) респондентов, имеющих хронические заболевания или риск его развития. Эти данные красноречиво говорят о том, что большая часть нашего населения недостаточно ответственно относится к своему здоровью.

Удовлетворённость населения системой оказания медицинской помощью по данным опроса составляет 65,7 %. Не удовлетворены в той или иной степени 22,5 % респондентов (рис.1).

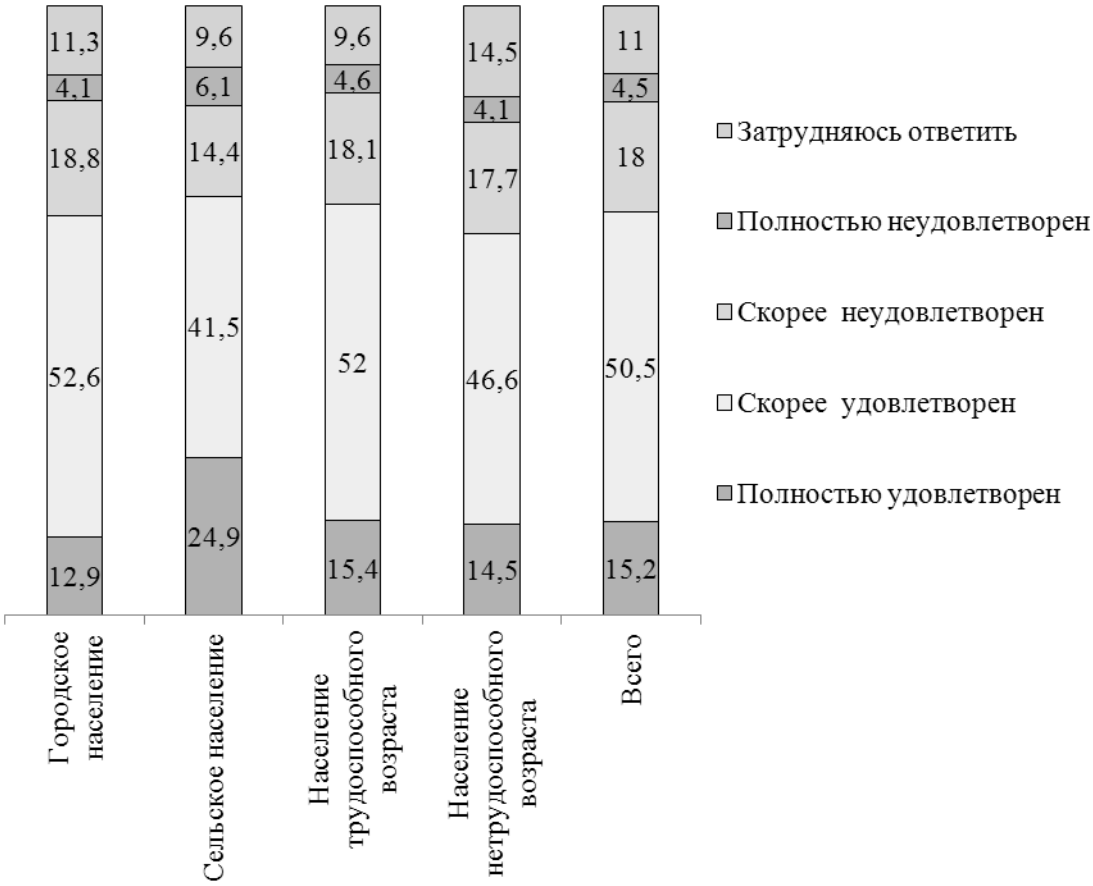



Рисунок 1 – Удовлетворённость населения системой оказания медицинской помощи

Практически все опрошенные хотя бы раз в году имели контакт с системой здравоохранения. В амбулаторно-поликлинические учреждения половина респондентов (50,8 %) обращались более одного раза в году. Можно отметить, что лица нетрудоспособного возраста чаще вызывали бригаду скорой медицинской помощью, и реже получали стационарное лечение, чем люди трудоспособного возраста.

В основном медицинские услуги были получены бесплатно. Чаще всего людям приходилось платить за услуги, полученные в диагностических центрах (53,3 % от числа посетивших эти учреждения), стоматологических поликлиниках (51,5 %), специализированных диспансерах (25,9 %) и фельдшерско-акушерских пунктах (23,1 %). В частных клиниках 13,3 % из обслуженных там респондентов получили медицинскую помощь бесплатно. Как и ожидалась, наиболее часто обращались за платными услугами респонденты трудоспособного возраста - 18,7 % из числа обращавшихся в ЛПУ.

Только половина респондентов (53,7 %) хорошо осведомлены об объёме и видах бесплатной медицинской помощи, предоставляемой в рамках Территориальной программы государственных гарантий оказания населению Самарской области бесплатной медицинской по-

мощи на 2011 год. Следует отметить, что степень информированности населения не зависит от возраста респондентов, но выше у сельских жителей (на 14,1 %).

Про наличие стандартов медицинской помощи известно тоже только половине опрошенных, распределение вариантов ответов среди анализируемых групп населения примерно одинаково.

Наиболее высока удовлетворённость услугами центров здоровья – 85 % из 60 человек, обратившихся в центры. Далее по степени удовлетворённости следуют частные клиники (76,6 % из90 респондентов) и диагностические центры (75,2 % из 137 человек). Низкая удовлетворённость отмечается услугами, полученными в ФАПах – 30,7 % и офисах врача общей практики – 57,6 %. Это может свидетельствовать о недостаточной квалификации специалистов в отдалённых сельских населённых пунктах.

Среди лиц трудоспособного возраста больше по сравнению с людьми нетрудоспособного возраста число удовлетворённых стоматологической помощью (66,9 % против 58,6 %) и услугами центров здоровья (90,3 % против 64,7 %). Зато скорой медицинской помощью в большей степени удовлетворены респонденты старшей возрастной группы (68,2 % против 61,0 %). Качеством профилактического осмотра удовлетворены 67,4 % респондентов, при этом сельские жители удовлетворены в большей мере (90,6 % против 80,6 %).

Положительно к развитию общеврачебной практики относятся 45,1 % респондентов. Причём среди опрошенных сельских жителей этот процент выше (55,0 против 42,7). Более трети респондентов (35,3 %) затруднились с ответом на этот вопрос.

В 66,3 % случаев врачи обсуждали с пациентами тактику дальнейшего обследования и лечения.Это выше, чем в среднем по России (50 %) и свидетельствует о преобладании в Самарской области сотрудничества, партнёрства во взаимоотношениях врача и пациента [2]. Партнёрская модель взаимоотношений «врач-больной» предполагает активное участие пациента в лечебно-диагностическом процессе и предполагает определенную степень ответственности и самостоятельности больного, его участие в принятии клинических решений. В основе взаимоотношений лежит эмпатический подход к пациенту [3].

27,3 % респондентов отметили случаи медицинской помощи ненадлежащего качества. При этом 224 человека пытались так или иначе защитить свои интересы (68,3 % от числа респондентов, отметивших случаи оказания медицинской помощи ненадлежащего качества). Отсюда можно сделать вывод, что среди населения уже достаточно выражена активная позиция по отношению к своему здоровью и состоянию системы здравоохранения в целом. Это является основанием для развития отношений социального партнёрства органов управления здравоохранения, ЛПУ и граждан.

Наибольшая доля претензий (17,5 % от числа всех респондентов) со стороны пациентов предъявляется к организации лечебно-диагностического процесса (длительное пребывание в очереди, отсутствие нужного специалиста, долгое ожидание госпитализации или бригады скорой медицинской помощи и др.). 11,8 % респондентов выразили недовольство лекарственным обеспечением и 10,5 % – материально-техническим оснащением ЛПУ. 7,1 % опрошенных отметили факты нарушения этики и деонтологии со стороны медицинского персонала (грубость, бестактность и др.).

Реже всего пациенты выражали недовольство по поводу нарушений санитарно-гигиенических условий в ЛПУ (2,5 %) и прав пациента (3,4 %). К нарушениям прав пациента относилось взимание платы за бесплатные услуги, оказание услуги без информированного согласия пациента, вымогательство, несоблюдение конфиденциальности личной информации и др.

По поводу ненадлежащего качества медицинской помощи в ту или иную инстанцию респондентами были направлены 239 жалоб, из них большинство (75,7 %) обращались к руководству ЛПУ; 11,3 % – в органы управления здравоохранением; 6,7 % – в страховые медицинские организации и 1,3 % – в средства массовой информации. Более активную позицию в пла-

не защиты своих прав занимают жители городских территорий (17,0 % против 7,0 % среди сельских жителей).

Результатами обращения с жалобой были удовлетворены 91,2 %. Это говорит о достаточно высокой эффективности работы руководящих структур в здравоохранении Самарской области с обращениями и жалобами граждан.

71,6 % опрошенных хотели бы иметь возможность проконсультироваться с врачом в аптеке. Особенно выражена эта потребность у сельских жителей (76,4 %). Наличие врача-консультанта в аптеке уже практикуется в наше время, в том числе и в Самарской области, в основном, в некоторых сетевых аптеках. Часто покупатель хочет получить подробную информацию о приобретаемом препарате, его эффективности, побочных действиях, либо посоветоваться насчёт аналогичного препарата, но даже при небольшом количестве посетителей необходимый диалог с фармацевтом не получается. В данной ситуации роль врача-консультанта довольно велика [4]. В аптеках, расположенных в отдалении от медицинских учреждений, в районах, где находятся офисы многочисленных фирм и организаций, эта услуга также будет востребованной.

Среди существующих механизмов обеспечения качества медицинской помощи большое значение имеет повышение образовательного уровня и квалификации медицинского персонала, совершенствование профессиональных знаний и навыков. В настоящий момент существует ряд правовых проблем в законодательстве, регулирующем процесс профессиональной подготовки медицинских работников. Одной из них является отсутствие ряда подзаконных нормативных актов, призванных регулировать процесс допуска к оказанию медицинской помощи. Фактически допуск к медицинской деятельности происходит по нормам действовавших ранее и утративших силу нормативных правовых актов (так, например, регулируется порядок получения врачами сертификата специалиста; допуск студентов старших курсов медицинских вузов к работе на должностях работников со средним медицинским образованием и др.).

Из числа опрошенных нами жителей Самарской области 45 % считают необходимым введение более жёстких критериев допуска врача к медицинской практике; 17,5 % респондентов не поддерживают эти меры.

Одним из методов повышения открытости системы здравоохранения, информированности населения и обеспечения возможности его осознанного выбора является создание и внедрение системы рейтингования лечебных учреждений и отдельных врачей на основе комплекса показателей качества медицинской помощи.

При кажущейся очевидности преимущества этого нововведения для пациентов за него высказались только 52,8 % респондентов. Наиболее актуальным признали введение системы рейтингования жители сельских территорий Самарской области.

Построение эффективной системы здравоохранения в России невозможно без широкого использования информационных технологий, отвечающих современным требованиям и обеспечивающих полноценное взаимодействие органов власти и лечебных учреждений с населением.

Граждане должны иметь возможность доступа к сайтам медицинских учреждений, содержащим информацию о предоставляемых медицинских услугах, о детальной схеме учреждения, графиках работы врачей, о квалификации и опыте работы персонала, результатах обследования и т. д.

Но население еще мало пользуется возможностями Интернет-ресурсов. Сайтами лечебных учреждений пользовались только 33,7 % респондентов, большинство опрошенных (61,8 %) вопреки ожиданиям не обращались к ним. Доля респондентов, пожелавших выйти на сайт нужного лечебного учреждения, которые не смогли найти его, незначительна и составила 1,1 %.

Среди наиболее актуальных проблем здравоохранения Самарской области почти четверть (23,4%) респондентов назвали кадровый дефицит, как и ожидалось, население сельских районов эта проблема беспокоит несколько больше.

Выраженные различия мнений городского и сельского населения обнаружились в значимости проблем материально-технической оснащённости лечебных учреждений и их состояния, а также низкой заработной платы медицинского персонала. Так, если среди респондентов, проживающих в городах, размеры заработной платы медицинских работников беспокоят 10,4 %, то в сельских районах актуальность этой проблемы подчёркивают 21,1 % опрошенных. Недостаточную оснащённость сельских лечебных учреждений отмечают 20,1 % респондентов, а городских – 13,2 %.

10,7 % опрошенных считают одной из наиболее актуальных задач модернизации здравоохранения уменьшение длительности ожидания в очередях на приём к врачу в поликлинике, а также ожидания получения диагностических услуг и госпитализации.

Все выделяемые контингенты населения (жители города и села, лица трудоспособного и нетрудоспособного возрастов) предлагают сходные варианты путей решения имеющихся проблем (табл. 1).

Таблица 1 – Структура ответов на вопрос: «Какие пути решения имеющихся в здравоохранении проблем Вы видите?»

| *Пути решения* | *абс.* | *%* |
|---|---|---|
| Улучшение подготовки специалистов, введение системы распределения молодых специалистов | 141 | 11,8 |
| Создание социально привлекательных условий для привлечения специалистов в ЛПУ (обеспечение жильем) | 106 | 8,8 |
| Увеличение финансирования здравоохранения | 63 | 5,3 |
| Улучшение оборудования, ремонт ЛПУ | 47 | 3,9 |
| Реформирование здравоохранения, изменение законодательной базы деятельности ЛПУ | 46 | 3,8 |
| Увеличение заработной платы медицинскому персоналу | 23 | 1,9 |
| Отмена платных услуг | 7 | 0,6 |

Учитывая тему настоящей статьи, хочется отметить, что хотя предложения по путям решения имеющихся в региональном здравоохранении проблем содержатся в анкетах достаточно большого числа респондентов (38%), никто не упомянул про необходимость участия населения или общественных организаций в определении приоритетов модернизации здравоохранения и принятии важных управленческих решений.

Вероятно, наше общество не является еще в достаточной степени гражданским, способным активно влиять на развитие социальных систем и, в частности, здравоохранения в желаемом направлении. И это несмотря на предпринятые в последние годы государственные усилия по развитию структур гражданского общества в РФ, позволяющие активизировать разнообразные формы гражданской самоорганизации.

Для целей модернизации необходим новый тип акторов на всех уровнях социума, которые формируются именно в гражданском обществе. Самоорганизуются для проведения изменений, как правило, самые активные представители социума с высоким личностным потенциалом. Выявление («картирование») этого человеческого капитала, продвижение наиболее эффективных практик поможет наладить системы адресной работы по модернизации в социальных сферах, в том числе и в здравоохранении.

На сегодня в Самарской области уже есть задел: общественные палаты, общественные Советы при Думах городских округов, консультационный общественный Совет по вопросам

здравоохранения при главе городского округа Самары, Совет по вопросам управления и развития Самарской области, различные профессиональные ассоциации медицинских работников и др.

В качестве мер по активизации участия населения в вопросах управления качеством оказания медицинской помощи и повышению доступности услуг в сфере здравоохранения можно предложить следующие нововведения:

1) Автоматизированный учёт удовлетворённости пациентов (возможно, и медицинских работников).

   Пациенты должны иметь широкие возможности для доступа в систему автоматизированного учёта удовлетворенности: через сайты органов управления и учреждений здравоохранения, инфоматы и др. Система учета должна быть простой. Выбор ЛПУ, или СМО, или органа управления здравоохранением из предлагаемого списка → выбор отделения (подразделения) → выбор или свободный ввод фамилии врача (сотрудника) → отметка о степени своей удовлетворённости одним кликом.

   С помощью специальной программы можно будет осуществлять обобщение данных и создать таким образом систему рейтингования ЛПУ и врачей. Если при этом будет действовать система вознаграждения лучших, мотивация к повышению качества работы повысится.

   Также необходимо предусмотреть организацию форума, где можно высказать развёрнутый отзыв (по типу отзывов об отелях).

2) Создание сайта «В помощь пациенту».

   Во многих случаях люди не знают оптимальный алгоритм своих действий в случае возникновения тех или иных проблем, связанных со здоровьем. Например, необходимость определиться с пакетом документов для получения инвалидности или госпитализации в опредёленное ЛПУ, получение полиса ОМС, консультации юриста по вопросам оказания медицинской помощи, обращение с жалобой и пр. Для этого целесообразно разработать новые или актуализировать имеющиеся регламенты подобных услуг и разместить их на этом сайте. При этом текст регламентов должен содержать гиперссылки на более детальную или смежную информацию.

3) Первая помощь при вызове скорой медицинской помощи (СМП).

   Многие люди не знают даже элементарных приёмов и правил оказания первой помощи в случае возникновения неотложных состояний. По данным ВОЗ, из-за неоказания первой помощи до прибытия медицинских работников при ДТП в России погибает людей в 5–10 раз больше, чем в развитых странах мира.

   Возможна организация системы рекомендаций по мерам первой помощи со стороны службы СМП. Например, при поступлении в службу СМП вызова по поводу, требующему неотложной помощи, в ряде случаев оператор СМП может включить сообщение: «Пожалуйста, не отключайтесь. Прослушайте сообщение. До прибытия бригады скорой помощи сделайте следующее: … (или ни в коем случае не делайте)».

   Текст сообщений можно, в частности, составить на основе методических указаний «Первая помощь: учебник для водителей», изданных под грифом Минздравсоцразвития России и с использованием стандартов Красного креста.

4) Подача пакета документов для оформления полиса ОМС в электронном виде.

   Для оформления документа в электронном виде необходимо зайти на специальный Web-ресурс в «Личный кабинет» и следовать инструкциям (по аналогии с получением паспорта гражданина).

## Заключение

В заключение вышесказанного можно отметить, что результаты опроса экспертов, представителей общественных организаций и населения позволяют уже сегодня начать формирование реестра проблем и существующих ограничений развития в системе регионального здравоохранения, благодаря которому будет возможно определять направления её модернизации.

## Список литературы


[1] Евланов Л.Г., Кутузов В.А. Экспертныеоценки в управлении. М.Экономика, 1978. 133 с.

[2] Качество медицинской помощи: проблемы и перспективы совершенствования: матер. междунар. науч.-практ. конф. [под ред. акад. РАМН проф. А.В. Шаброва, проф. В.Ф. Чавпецова]. СПб., 2010. 168 с.

[3] Клиническая психология: учебник [под ред. Б. Д. Карвасарского]. 2004. – URL: http://www.booksmed.com/psixiatriya-psixologiya/339-klinicheskaya-psixologiya-karvasarskij.html. Дата обращения: 22.11.2011.

[4] Журавлева И. М. Консультации и обслуживание посетителей в аптеке. Что нового? // Экономический вестник фармации. 2005. № 1. – URL: http://www.lawmix.ru/med/3428. Дата обращения: 21.11.2011.

# ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИНЦИПОВ ХОЛОНИЧЕСКОГО ПОДХОДА В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ОКАЗАНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ НА АМБУЛАТОРНОМ ЭТАПЕ

**Л.С. Федосеева, И.М. Назаркина**

ММУ «Городская клиническая поликлиника № 15» г. о. Самары
443111, Самара, ул. Фадеева, 56а, Россия
polik15@saminfo.ru
тел: +7 (846) 251-97-35

***Ключевые слова:*** *холон, врач общей практики, амбулаторно-поликлинические учреждения, качество медицинской помощи, самоорганизация*

**Abstract**

In article experience of application of principles of a holonichesky approach is reflected at the organization of activity of the medical institution rendering the out-patient help. On an example of work of offices of general practitioners elements of self-development and self-organizing minimum холонов in the conditions of constantly changing environment are shown. Questions of clinical and economic efficiency of this approach are reflected.

Современные организации невозможны без особого вида деятельности – управленческой, направленной на преобразование различных сторон её жизни. Основу процесса управления составляет достижение целей организации наиболее оптимальными способами в результате совокупности действий, ориентированных на изменение существующего состояния организации или её части в направлении достижения целей и баланса с внешней средой.

Медицинские организации представляют собой сложные организационные системы, отдельные составляющие которых постоянно изменяются и находятся в сложном взаимодействии друг с другом. Рыночная экономика приводит к возрастанию объема и усложнению задач, решаемых в области организации лечебно-диагностического процесса, процессов планирования и анализа, финансовой работы, связей с потребителями.

Главной стратегической целью здравоохранения является обеспечение качества и доступности медицинской помощи для населения при эффективном использовании имеющихся ресурсов.

Предпринимаемые государственные программы (ПНП «Здоровье», программа модернизации здравоохранения и другие целевые проекты), предполагающие увеличение финансирование отрасли дают возможность оснастить лечебно-профилактические учреждения современным оборудованием и использовать высокотехнологичные методики диагностики лечения, однако не всегда приводят к повышению качества оказания медицинской помощи, особенно в учреждениях первичной медико-санитарной помощи.

Именно поэтому назрела необходимость поиска резервов, более эффективного использования имеющихся ресурсов, сохраняя при этом уровень качества оказания медицинской помощи и социальных гарантии для населения.

В основу реорганизации ПМСП должны лечь принципы, признающие здоровье материальной ценностью, профилактику – основополагающей, а саму медицину – ресурсосберегающей производительной силой, укрепляющей здоровье и оптимизирующей образ жизни.

Как показывает мировая практика, необходимость быстро и динамично реагировать на рынке медицинских услуг, требует реформирования сферы управления и создания внутри

крупных предприятий, более мелких, автономных, способных гибко и динамично взаимодействовать на внутреннем рынке предприятия по принципу «каждый с каждым» и «равный с равным».

Используя этот подход, можно говорить о холонической (целостной) организации сложных систем, где каждый холон можно рассматривать как автономную самоуправляемую целостность.

В качестве примера холонической системы, можно рассматривать систему здравоохранения. Отдельные врачи (атомарные холоны), объединяются в отделения, несколько отделений входят в состав поликлиники или больницы, все они объединены – департаментом здравоохранения в системе здравоохранения городского округа. Каждое из лечебных учреждений являясь самостоятельным (холоном) юридическим – лицом – автономно, взаимодействует между собой на договорных отношениях, опираясь на действующие нормативно-правовые акты. Холоны взаимодействуют между собой для решения общих задач и в тоже время стремятся к ответственности и самодостаточности.

Ключевые вопросы холонической организации поликлиники, в которой стороны (пациенты, врачи, главный врач и администрация) взаимодействуют как равные партнеры на основе договорных отношений, регламентов взаимодействия, принимаются каждой из сторон самостоятельно на своем уровне компетенции. Стратегическое решение принимается на основе объективных профессиональных медицинских, управленческих, финансовых, хозяйственных и других знаний.

В рамках организационной структуры поликлиники можно выделить следующие холоны:

1) Врач (атомарный холон). Вместе с медицинскими сестрами и имеющимися ресурсами он образует базовый холон. Составной холон – медицинское отделение.
2) Второй составной холон – дополнительные службы (хозяйственные, технические, экономические и т.д.)
3) Третий холон – временные холоны реализации конкретных целей предпринимательских, организационных и др.) поликлиники, (например: реализация различных проектов внутри поликлиники, как отдельных холонов, участники данного холона могут параллельно входить в состав другого холона).
4) Четвертый- «головной» холон – поликлиника в целом.

Главным «действующим лицом» холона является – человек, взявший на себя полномочия по управлению холоном и несущий ответственность за последствия принимаемых решений.

В системе здравоохранения это врач общей практики. Наличие специальной подготовки позволяет ему решать на высоком уровне не только лечебно-диагностические проблемы, но и быть координатором в организации оказания медицинской помощи на всех этапах, взаимодействовать с учреждениями противоэпидемиологических, социальных, образовательных и профилактических служб. Проблемы профилактики заболеваний, формирования здорового образа жизни, выявление факторов риска развития хронических социально-значимых заболеваний становятся приоритетными направлениями его деятельности. Особе внимание должно уделять группам социального риска, дезадаптированой категории населения (пожилым, ветеранам, малоимущим и др.) Организация оказания помощи этой категории населения осуществляется в тесном взаимодействии со службой социального обслуживания населения.

Таким образом, центральными элементами (холонами) такой модели становятся пациент, за которым следуют денежные средства, выделяемые на него фондом обязательного медицинского страхования, и врач общей практики. Наделение врача общей практики полномочиями самостоятельного принятия клинических и экономических решений становится стимулом к поиску методов рационального распределения имеющихся ресурсов, в том числе финансовых.

Полученные средства врач должен использовать наиболее эффективным способом. Он не только морально, но и материально заинтересован в снижении заболеваемости, продлении сроков и повышения качества жизни каждого из своих пациентов за счет усиления роли про-

филактики, внедрения современных медицинских технологий, международных стандартов диагностики и лечения заболеваний, основанных на принципах доказательной медицины. Чем стабильнее численность прикрепленного населения у данного врача, чем меньше они болеют, чем больше внимания врач уделяет профилактическим мероприятиям , тем меньше они болеют, а следовательно меньше затраты на внеплановую госпитализацию, вызовы скорой помощи и т.д., тем выше должна быть зарплата у данного врача, больше возможности для обновления оборудование и улучшения условий работы.

Таким образом, наряду с возможным материальным стимулированием данного врача по итогам деятельности за определенный период, реализуется принцип конкуренции между сотрудниками (холонами), что приводит к стимуляции поиска новых организационных и медицинских решений проблем больного, а также повышению собственного профессионального уровня, а также приобретение навыков менеджмента.

Самостоятельное принятие решения в различных ситуациях, повышение ответственности не только за здоровье пациентов, но и за экономическую стабильность всего учреждения становится стимулом к самоорганизации.

Если рассматривать самоорганизацию, как спонтанное возникновение процессов, направленных на устранение диспропорций (нарушения гармонии), возникшей в результате внешних влияний или внутренних взаимодействий, то при определенных условиях, самоорганизация и самоуправление могут помогать решению поставленных задач или мешать им.

По выражению Г. Моргана «…время «организованных организаций» прошло…, основная компетенция менеджера заключается в осознании важности самоорганизации и всемерном стимулировании её…». В этой фразе выражена одна из сложнейших проблем данной темы – соотношение целенаправленного организующего взаимодействия и самоорганизации.

Для формирования навыков самоорганизации в работе медицинского персонала и стимулирования усилий необходимо учитывать:

- мотив: работники должны понимать и принимать необходимость процесса улучшения, который требует их же активного участия и соответствующих знаний;
- возможность: работники должны иметь время и место, необходимые для проведения работы в области улучшений. Для этого требуется постоянная поддержка со стороны руководства;
- средства: работники должны обладать навыками, необходимыми для того, чтобы воспользоваться стратегиями и инструментами улучшения. Для этого необходимы практика и обучение.

Для активизации элементов самоуправления и внедрения принципов холонического подхода доминирующим методом в финансировании ОВОП должен стать метод подушевого финансирования в различных вариантах (частичное или полные фондодержание и т.д.).

Данный метод нацеливает на исполнение координирующей функции первичного звена, стимулирует повышение ответственности за состояние здоровья обслуживаемого населения, обеспечивает комплексность лечебно – профилактической работы и исполнения стандартов.

Задача повышения эффективности использования ресурсов не должна сводиться к примитивной экономии средств. Полученная за счет перевода части медицинской помощи на амбулаторный этап экономия должна направляться на повышение интенсивности лечебно-профилактической работы и качества лечения в каждом конкретном случае. Внедрение в деятельность ЛПУ дифференцированной системы оплаты труда служит не достижению экономии как самоцели, а ее использованию для повышения качества и доступности медицинской помощи.

Уровень оплаты труда звена ПМСП должен напрямую зависеть от достижения установленных показателей качества их работы. Это осуществляется на основе набора показателей деятельности и формализованной модели оценки результатов деятельности

Однако, наделение сотрудников определенными свободами в принятии решений требует усиления контроля со стороны руководителей всех звеньев (от заведующего отделениям до главного врача в поликлинике, а также в учреждениях управления всей системой здравоохранения).

Развитие методологии оценки деятельности различных объектов управления, на территории Самарской области началось уже в 1988 году и происходило в нескольких направлениях: совершенствование оценочных критериев, разработка нормативных показателей состояния здоровья населения, отработка моделей конечных результатов, внедрение принципов менеджмента качества.

Прогнозируя итоги преобразований, обнаруживаем сближение мотивации ЛПУ и пациента: медицинское учреждение становится ориентированным на пациента, на сохранение его здоровья. Финансирование всех видов медицинской помощи из единого источника повышает управляемость отрасли и не создает трудностей в осуществлении контроля над рациональным и целевым расходованием средств, дает возможность разработать систему экономической стимуляции на основе дифференцированного подхода к оплате труда.

Наглядно продемонстрировать эффективность модели деятельности, основанной на принципах холонического подхода с элементами самоорганизации и использования информационных систем, для реализации вопросов управления, можно на приме модели функционирования отделений врачей общей практики муниципального медицинского учреждения Городская клиническая поликлиника № 15 Промышленного района г.о. Самара.

В связи с существующим дефицитом денежных средств, одним из основных направлений развития здравоохранения становится повышение его экономической эффективности, предполагаемой максимальную результативность медицинского учреждения, выраженную в улучшении качества оказания медицинской помощи и ее доступности.

В этой модели поликлиники рассматриваются как целостная, открытая и развивающаяся система, базирующаяся на принципах самоорганизации, реализующейся в сформированных отделениях врачей общей практики, а сам ВОП, получивший дополнительную подготовку, является не только центральной фигурой в оказании медицинской помощи на амбулаторном этапе, но и главным фондодержателем и распорядителем финансовых ресурсов, что обусловлено способом формирования бюджета врача общей практики – подушевой принцип с последующей оплатой медицинских услуг из фонда оплаты медицинских услуг.

Создание независимых, в организационно финансовом отношении, специалистов предполагало:

- формирование команды единомышленников способных критически оценивать свою деятельность;
- определять приоритеты лечебно-диагностического процесса, внедрять новые ресурсосберегающие технологии;
- способствовать развитию принципа конкуренции между отделениями врачей общей практики в плане улучшения качества оказания медицинской помощи;
- проводить постоянный мониторинг рынка медицинских услуг;
- осуществлять контроль объема и качества оказания медицинской помощи прикрепленному населению в других ЛПУ;
- проводить оценку всех направлений деятельности с помощью медико-экономической эффективности.

Каждое отделение ВОП строило свои отношения со страховыми организациями, другими ЛПУ города на договорной основе. Доходная часть ВОП и каждого врача в отдельности находилась в прямой зависимости от численности и поло-возрастной структуры прикрепленного населения. На счет ВОП поступают финансовые средства за вычетом стоимости услуг, заказанных в других ЛПУ (стационарная помощь, диагностическое обследование, услуги станции скорой помощи). Перед сотрудниками стояла задача оптимизировать финансовые затраты на

внешние услуги за счет использования собственной лечебно диагностической базы, внедрения новых технологий, позволяющих контролировать состояние больного на амбулаторном этапе, развивать ресурсосберегающие технологии.

Развертывание коек дневного стационара, организация работы неотложной помощи, внедрение современных методов лечения, основанных на принципах доказательности, расширении методов профилактической деятельности, позволили более чем на 30 % уменьшить внешние затраты. Полученная экономия финансовых ресурсов позволяет перейти к дифференцированной оплате труда, используя экономическую мотивацию, наряду с другими ее формами, для дальнейшего развития оказания медицинской помощи на амбулаторном этапе, а также совершенствования материально-технического оснащения поликлиники.

Работа отделений врачей общей практики в условиях самоорганизации и самоуправления требует анализа большого количества информации как медицинской, так и экономической и статистической – это потребовало развития и внедрения в работу информационных технологий.

Сегодня – это локальные сети, объединяющие около 300 автоматизированных рабочих мест всех лечебно диагностических подразделений поликлиники, более чем десятилетняя база данных состояния здоровья прикрепленного населения и всех выполненных услуг, а так же разработанная электронная амбулаторная карта.

Проведенные реорганизационные мероприятия позволили на основе холонического подхода создать новую финансово-экономическую структуру, которая более мобильна в приспособлении к окружающим изменениям. Самостоятельность подразделений, дает возможность каждому быстрее решать свои проблемы, подбор и подготовку кадров, внедрение новых медицинских технологий, создание условий и поощрений творчества и новаторства. Мониторинг рынка услуг, выявление приоритетных направлений деятельности и т.д.

У администрации поликлиники остаются функции перспективного планирования, координации работы всех подразделений, контроля качества оказания медицинской помощи. В условиях одноканального подушевого принципа финансирования с фондодержанием вопросы качества оказания медицинской помощи, приобретают первостепенное значение.

В поликлинике внедрена и совершенствуется система менеджмента качества, на различных этапах её реорганизации, в основе лежат система контроля качества с использованием типовых моделей, а затем – системный и процессный подходы.

Результаты работы ОВОП в условиях подушевого финансирования с фондодержанием показывают эффективность данной системы не только в плане оптимизации финансовых затрат, и качественных показателей.

Уровень вызовов СМП с 243900 – в 1997 г., снизился до 170000; в – 2000 г. и продолжает держаться на этом уровне до 2011 г.

Внедрение новых принципов лечения основанных на международных стандартах больных, БА, позволил снизить затраты на госпитализацию и вызовы СП с 394 тыс. руб. в 1996 г. до 71,8 тыс. руб. в 1999 г. Несмотря на увеличение количества пациентов, находящихся на диспансерном учете, количество госпитализации не увеличивается.

В течение длительного времени показатель госпитализации сохраняется на уровне 150-166‰. При этом мониторинг эффективности ведения больных страдающих артериальной гипертензией демонстрирует положительный эффект по контролю за состоянием больных на амбулаторном этапе. В 1998 году зарегистрировано 249 инфарктов миокарда, в 2011 г. – 156. Отмечается увеличение сроков дожития больных, страдающих АГ после взятия на диспансерный учет с 6,4 до 9,6 лет.

На основе новых экономических отношений в 1995-1998 гг. в г. Самара была проведена реструктуризация системы здравоохранения и сформирована многоуровневая модель оказания медицинской помощи с приоритетом первичного звена.

Эффективность примененной концепции наглядно демонстрирует снижение уровня госпитализации с 221,4 ‰ в 1994 году до 175‰ в 2001 г., вызовов скорой медицинской помощи за аналогичный период с 244,4 ‰ до 199,8 ‰ .

За счет развития учреждений, оказывающих первичную медико-санитарную помощь, число мест в дневных стационарах увеличилось с 758 в 1991 г. до 1 635 в 2001 г., а количество пролеченных в них больных - с 9 610 до 34 527 соответственно.

Сократились средние сроки пребывания больного на койке дневного стационара с 21 до 12,5 дней.

В 2001 году 13,1 % всех вызовов скорой медицинской помощи были переданы на развернутые в поликлиниках отделения неотложной помощи, что составило 35 070 вызовов.

С целью проведения реабилитационных мероприятий, к 2001 г. были развернуты 13 отделений восстановительного лечения, в которых получили лечение 18 603 пациентов.

На кафедре семейной медицины Самарского государственного медицинского университета были разработаны программы по переподготовке врачей общей практики, в результате чего, количество этих специалистов увеличилось с 89 в 1996 году до 363 в 2001 году, а доля посещений по смежным специальностям к ним увеличилась с 5,4 в 1997г. до 39,2.

Реорганизация амбулаторно-поликлинического звена позволила изменить основные показатели работы больничной помощи. В 1991 году в г. Самара было 25 ЛПУ больничного типа, в 2001г. – 18. Число коек на 10 000 населения с 63,8 человек снизилось до 48,5, а средняя продолжительность пребывания с 12,2 до 11.4 в 2001 году.

Проведенные реорганизационные мероприятия на уровне амбулаторного и стационарного этапов оказания медицинской помощи способствовали улучшению отдельных показателей состояния здоровья населения. Так, уровень младенческой смертности снизился с 11,3‰ в 1996 году до 5,1‰ в 2005 году, показатель запущенности случаев туберкулеза уменьшился с 0,7 на 10 000 человек в 1998 году до 0,1 в 2001 году. Результатом активной вакцинации населения стало более чем десятикратное снижение заболеваемости вирусным гепатитом В со 93,2‰ в 1999 году до 7,3‰ в 2005 году. Наметилась четкая тенденция к снижению показателя запущенности рака с 16,8% в 1996 году до 12,6 %в 2001 году.

Приведенные примеры наглядно демонстрируют эффективность деятельности первичного холона в организации системы здравоохранения, в достижении, медико-экономического эффекта лечебния больных на амбулаторном этапе.

Созданные условия для функционирования системы оказания первичной медико-санитарной помощи позволили:

- отработать основные принципы организации работы врача общей практики на базе многопрофильной поликлиники и в офисах;
- создать механизмы организационно-финансового взаимодействия между врачами общей практики, врачами-специалистами, другими Лечебно-профилактическими учреждениями города и области, страховыми медицинскими организациями;
- реализовать принципы медико-экономического подхода к дифференцированной оплате труда;
- внедрить в работу ЛПУ амбулаторно-поликлинического этапа ресурсосберегающие технологии (дневные стационары и стационары на дому);
- отработать элементы ответственности ВОП за оказание медицинской помощи пациентам на всех этапах оказания медицинской помощи;
- совершенствовать методику профилактического направления в деятельности ВОП с выявлением пациентов с факторами риска развития хронических социально-значимых заболеваний, организованы обучающие школы для пациентов
- разработать программное сопровождение деятельности лечебно-профилактического учреждения, позволяющие решать организационно-финансовые проблемы, управлять структурными изменениями и качеством оказания медицинской помощи;

- провести реструктуризацию стационарной помощи с учетом потребности населения в оказании круглосуточной медицинской помощи;
- разработать принципы организации самостоятельной работы медицинских сестер.

Наглядным примером эффективности применяемой технологии управления является функционирование системы здравоохранения в критических условиях дестабилизации финансирования во время дефолта 1998 года.

Благодаря ранее созданной системе рационального распределения ресурсов, наделению полномочиями по принятию самостоятельных решений минимальных холонов, как во всей системе, так и в отдельных медицинских организациях, критическая ситуация не разрушила созданные взаимоотношения между холонами, а напротив, стала движущей силой для поиска решений по выходу из сложившейся ситуации.

В результате высокого уровня внутренней самоорганизации, были отработаны новые принципы взаимодействия со стационарами и лечебно-диагностическими центрами:

- введен принцип догоспитальной подготовки пациента;
- созданы условия для долечивания пациентов в амбулаторных условиях после проведенного оперативного лечения;
- благодаря снижению койко-дней, проведенных пациентом в стационаре, достигнута договоренность о выставлении счетов за госпитализацию или внешние консультации по сниженным коэффициентам оплаты КСГ, а при высокой стоимости стационарного лечения – уменьшить расходы на госпитализацию и увеличить доход на амбулаторно-поликлиническом этапе.

Выбранный подход позволил сохранить экономическую стабильность лечебных учреждений амбулаторного звена без снижения качества оказания медицинской помощи. В свою очередь, стационарные учреждения получили возможность увеличить показатель работы койки за счет плановых больных, действительно нуждавшихся в круглосуточном наблюдении.

Таким образом, использование принципов холонического подхода к функциональной организации деятельности лечебно-профилактических учреждений позволило создать условия для повышения качества оказания медицинской помощи и рационального использования уже имеющихся ресурсов, а также для перспективного развития отрасли в целом за счет высокой самоорганизации внутри каждого ЛПУ.

# МОДЕРНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫМ ЗДРАВООХРАНЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО РАСШИРЕНИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

**А.Е. Янковская[1,2], С.В. Китлер[3]**

[1]Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Томск, пр. Ленина, 36, Россия

[2]Томский государственный архитектурно-строительный университет
634003, Томск, пл. Соляная, 2, Россия
ayyankov@gmail.com
тел. +7 (382-2) 65-07-82

[3]Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, Томск, пр. Ленина, 40, Россия
kitsv@sibmail.com
тел. +7 (382-2) 414-717

***Ключевые слова:*** *модернизация управления региональным здравоохранением, интеллектуальное расширение геоинформационных систем, интеллектуальная система диагностики и интервенции организационного стресса, мягкие вычисления, когнитивные средства визуализации информационных структур*

**Abstract**

The paper concerns modernization of a regional healthcare management based upon intelligent extension of geoinformation system. Mathematical foundations of intelligent system construction for diagnostics and intervention of organizational stress (DIOS) are described. The basis of intelligent extension for geoinformation system is given and joining of the intelligent system DIOS and geoinformaiton system is proposed. Results of investigation of the evaluation of psychological health level are given for population of several territorial units of the Tomsk region.

## Введение

В последнее время возросло внимание исследователей к проблеме здравоохранения [1-3]. Это обусловлено тем, что проблема управления региональным здравоохранением является одним из приоритетных направлений Министерства здравоохранения Российской федерации и других государств. Несмотря на наличие большого количества работ в данном направлении, задача своевременной диагностики психологического здоровья населения регионов до сих пор не решена.

Одним из перспективных подходов решения данной задачи является подход, основанный на применении интеллектуального расширения геоинформационных систем (ГИС) [4] для оценки уровня заболеваемости населения на различных административно-территориальных единицах рассматриваемого региона.

Применение ГИС-технологий при решении задач здравоохранения не ново [1, 2, 5] и осуществляется в рамках программы модернизации управления региональным здравоохранением России.

В настоящее время очевидна целесообразность использования интеллектуальных средств в рамках проблем модернизации управления региональным здравоохранением, одной из задач которых является контроль психологического состояния здоровья населения. С целью модернизации управления социально-экономическими процессами на региональном уровне, в первую очередь в сфере здравоохранения, необходимо периодически проводить оценку психоло-

гической заболеваемости населения, а именно, выявлять наличие организационного стресса (ОС), и своевременно проводить лечебно-профилактические и коррекционные (интервенционные) мероприятия.

Поскольку важна своевременность принятия решений в сфере здравоохранения и в первую очередь в области психологической заболеваемости населения, непосредственно связанной с организационным стрессом, то целесообразность создания интеллектуальных систем экспресс-диагностики организационного стресса не вызывает сомнений.

Для экспресс-диагностики организационного стресса нами разработана интеллектуальная система (ИС) ДИОС [6], основанная на пороговой логике с применением мягких вычислений, на когнитивных средствах визуализации информационных структур и результатах принятия и обоснования диагностических и интервенционных (коррекционных) решений и предлагаемая для включения в интеллектуальное расширение ГИС.

Статья посвящена модернизации управления региональным здравоохранением на основе интеллектуального расширения геоинформационной системы, приводятся математические основы построения интеллектуальной системы ДИОС, излагаются основы интеллектуального расширения геоинформационной системы, предлагается стыковка ИС ДИОС и ГИС, а так же приводятся результаты исследования ИС ДИОС.

## 1 Математические основы построения ИС ДИОС

Поскольку ИС ДИОС является основой построения интеллектуального расширения ГИС, приведём математические основы построения ИС ДИОС.

В основу построения ИС ДИОС положена идея трёхступенчатой диагностики ОС и математический аппарат, базируемый на пороговой логике с применением мягких вычислений, когнитивных средствах визуализации информационных структур и результатов принятия и обоснования диагностических и интервенционных решений.

Для экспресс-диагностики организационного стресса был сконструирован опросник, включающий вопросы по трём стадиям ОС (1–напряжения (возбуждающей), 2–адаптации (сохранения энергии), 3–истощения). В основе опросника лежит концепция Г. Селье [7]. В 1, 2-й стадиях используется 7 признаков (симптомов) для выявления ОС, в 3-й стадии – 8 признаков, причём количество значений каждого признака равно 5 (никогда – 0, редко – 0.25, иногда – 0.5, часто – 0.75, постоянно – 1). Анализ признаков позволяет проводить экспресс-диагностику по выявлению ОС на каждой стадии.

Для принятия диагностического решения применяется пороговая функция $f(x)$.

Если $a_1x_1+ a_2x_2+ \ldots+ a_nx_n \geq b$,

то $f(x)=1$,

иначе $f(x)=0$,

где $a_n$ – степень выраженности симптома, $a_n \in \{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\}$, $x_n$ – признаки для каждой стадии ОС, $n \in \{1,2,\ldots,7\}$ – для 1,2-й стадий, $n \in \{1,2,\ldots,8\}$ – для 3-й стадии, $b$ – порог.

Основанием для принятия диагностических решений на каждой стадии ОС является выполнение критерия превышения порога ($b$=3).

Блок-схема ИС ДИОС приведена на рисунке 1.

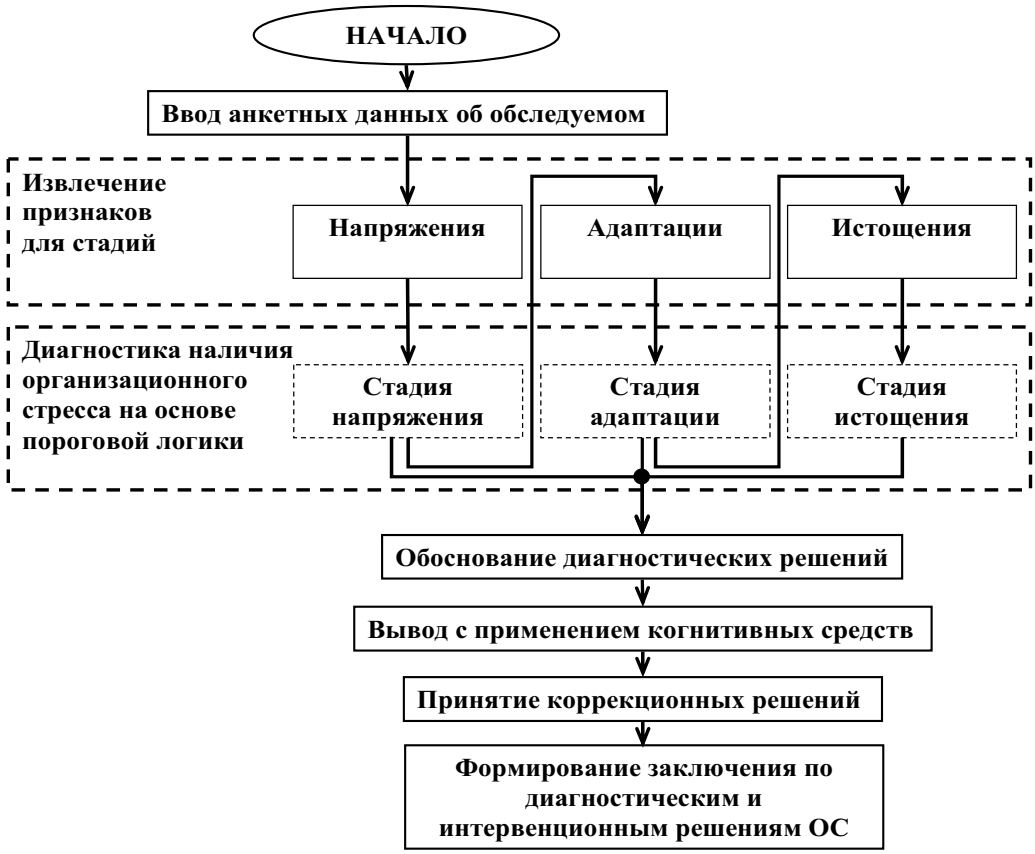



Рисунок 1 – Блок-схема ИС ДИОС

## 2 Основы интеллектуального расширения геоинформационной системы

С целью модернизации управления региональным здравоохранением на основе интеллектуального расширения ГИС предлагается использовать один из двух подходов: осуществить конвертирование данных и знаний из одной из ГИС, например ArcView [8], в базу данных и знаний одной из разработанных нами интеллектуальных систем [4, 6, 9] или конвертировать полученные результаты интеллектуальной обработки (базы знаний и результаты принятия и обоснования решений) с применением той или иной интеллектуальной системы [6, 9] в выбранную ГИС.

Поскольку разработка ИС ДИОС была осуществлена ранее в целях диагностики и интервенции организационного стресса у обследуемых отдельных организаций до решения вопроса о необходимости стыковки ГИС и интеллектуальной системы ДИОС, то база данных и знаний содержится в ИС ДИОС.

Предлагается с применением плагина ArcViewSQL стыковать базу данных и знаний ИС ДИОС с базой данных ГИС ArcView и осуществлять запросы для обращения к записям, содержащимся в ИС ДИОС. Такой способ стыковки позволяет при расширении базы данных и знаний ИС ДИОС автоматически обновлять базу данных ГИС.

В результате любые изменения в базе данных и знаний ИС ДИОС будут представлены в ГИС ArcView.

## 3 Результаты исследования по оценки уровня психологического здоровья населения на ряде предприятий Томского региона

С целью модернизации управления региональным здравоохранением на основе интеллектуального расширения геоинформационной системы, как описано выше, предложено применять интеллектуальную систему оценки уровня психологической заболеваемости населения и, в первую очередь, выявить уровень организационного стресса населения на ряде выбранных территориальных единицах исследуемого региона.

В качестве исследуемого региона был выбран Томский регион. Отметим, что исследования по выявлению ОС находятся на начальном уровне и эксперимент проведён не во всём регионе, а на выбранных территориальных единицах. На настоящем этапе было проведено разбиение участков территорий на учебные заведения и предприятия. С применением интеллектуальной системы ДИОС было проведено исследование по оценке уровня психологической заболеваемости населения в двух учебных территориальных единицах, а именно в ГБОУ ВПО СибГМУ Минздравсоцразвития России и НИ ТГУ, а также в двух производственных территориальных единицах: Томском филиале ОАО «Ростелеком» и ОАО «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический кабельный институт (НИКИ) с опытным производством (г.Томск)». В качестве обследуемых выступили студенты ряда факультетов ГБОУ ВПО СибГМУ Минздравсоцразвития России; студенты экономического факультета НИ ТГУ, служащие Томского филиала ОАО «Ростелеком» и служащие ОАО «НИКИ» (Таблица 1).

Таблица1 – Результаты исследований по оценки уровня психологической заболеваемости населения в Томском регионе

| Предприятие | Кол-во обследуемых | Кол-во обследуемых с наличием 1-й стадии ОС (%) | Кол-во обследуемых с наличием 2-й стадии ОС(%) | Кол-во обследуемых с наличием 3-й стадии ОС(%) | Кол-во обследуемых с наличием стресса (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| СибГМУ | 101 | 57 (56,5%) | 47 (46,5%) | 22 (21,8%) | 70 (69,3%) |
| ТГУ | 19 | 7 (36,8%) | 5 (26,3%) | 2 (10,5%) | 10 (52,6%) |
| Томский филиал ОАО «Ростелеком | 28 | 8 (28,6%) | 11 (39,3%) | 1 (3,6%) | 14 (50%) |
| ОАО «НИКИ» | 21 | 2 (9,5%) | 5 (23,8%) | 1 (4,8%) | 6 (28,6%) |

Отметим, что у ряда студентов и служащих выявлено одновременно наличие нескольких стадий организационного стресса, в связи с чем общее количество обследуемых меньше суммы обследуемых на 3-х стадиях организационного стресса.

Результаты исследования показали, что первое место по наличию стрессового состояния наблюдается у студентов СибГМУ (69,3% респондентов), на втором месте – у студентов экономического факультета ТГУ (55,6% респондентов), на третьем месте – у служащих Томского филиала ОАО «Ростелеком» (50% респондентов), на четвертом месте – у служащих ОАО «НИКИ» (28,6% респондентов).

Полученные результаты демонстрируют необходимость изменения психологического состояния большинства респондентов. Эффективным способом улучшения психологического состояния здоровья обследуемого является изменение образа жизни и проводимые коррекционные мероприятия.

На рисунке 2 приведем гистограмму, отображающую результаты исследования.

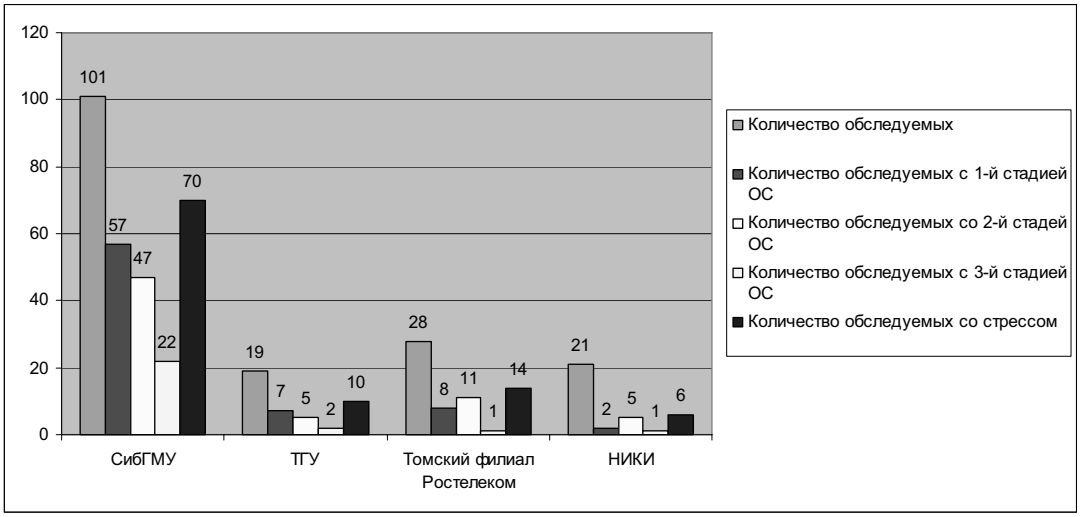



Рисунок 2 – Гистограмма результатов исследований по оценки уровня психологическойзаболеваемости населения в Томском регионе

Результаты показали необходимость дальнейших исследований оценки уровня здоровья населения на остальных территориальных единиц Томского региона.

**Заключение**

Предложена модернизация управления региональным здравоохранением на основе интеллектуального расширения геоинформационной системы.

Даны математические основы создания ИС ДИОС, предназначенной для экспресс-диагностики и интервенции организационного стресса.

Приведены основы интеллектуального расширения геоинформационной системы.

С целью модернизации управления региональным здравоохранением предложена стыковка ИС ДИОС с интеллектуальным расширением геоинформационной системы.

Приведены результаты исследования по оценке уровня психологического здоровья населения на ряде выбранных территориальных единицах Томского региона. Весьма своевременна для Томского региона предложенная интеллектуальная поддержка принятия решений при управлении социально-экономическими процессами. Выявлено, что повышенный уровень наличия организационного стресса наблюдается в большей степени в административно-региональных единицах с районами, где обучаются и проживают студенты.

**Благодарности**

Авторы выражают благодарность Н.А. Корнетову за постановку задачи трехступенчатой диагностики и участие в формировании опросника, Р.В. Аметову за участие в разработке графического интерфейса ИС ДИОС.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №10-01-00462-а, №11-07-98015-р_сибирь_а).

## Список литературы


[1] Гохман В.В. ГИС в здравоохранении и медицине // ArcReview № 1 (60), 2012: “Health GIS”.

[2] Красильников И.А., Мусийчук Ю.И., Струков Д.Р. Практический опыт использования геоинформационных систем в поддержке принятия управленческих решений в здравоохранении // Сборник материалов 1-й конференции "ГИС в здравоохранении РФ: данные, аналитика, решения" – 2011. – С. 1-5.

[3] Abdulkader Murad, Using GIS for Evaluating Accessibility to Health Care Centers in Jeddah City// The 2011 Esri Health GIS Conference Proceedings. – 2011.

[4] Yankovskaya A., Semenov M. To the problem about the intelligent extension construction of the geoinformational systems // Pattern Recognition and Image Understanding. Proceedings of 8th Open German-Russian Workshop (OGRW-8-11). – Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod Lobachevsky State University. – 2011. – P. 349-352.

[5] Дубовой И.И., Лобанов Г.В., Зройчикова О.А., Корниенко Г.Н. Применение ГИС-технологий для медико-экологического зонирования территории крупного города// ArcReview № 1 (60), 2012: “Health GIS”.

[6] Yankovskaya A.E., Ametov R.V., Kitler S.V. Decision-Making for Diagnostic and Intervention of Organizational Stress in Intelligent System DIOS // Proceedings of 8th Open German-Russian Workshop “Pattern Recognition and Image Understanding” OGRW-8-11, Nizhny Novgorod. – 2011. – Pp. 353-356.

[7] Selye H. A Syndrome Produced by Diverse Nocuous Agents// Nature. – 1936. Vol. 138, – P. 32.

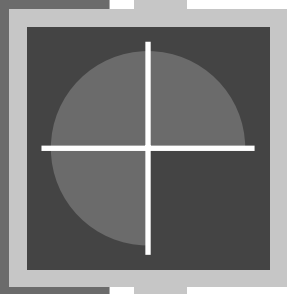
[8] Кошкарев А. В., Тикунов В. С. Геоинформатика.- М.: Картгеоцентр -"Геодезиздат", 1993.– 213 с.

[9] Yankovskaya A.E., Gedike A.I., Ametov R.V., Bleikher A.M. IMSLOG-2002 Software Tool for Supporting Information Technologies of Test Pattern Recognition// Pattern Recognition and Image Analysis. – 2003. – Vol.13. – No. 4. – pp. 650-657.


## Biography

*Anna Efimovna Yankovskaya* was born in 1939. She graduated from Tomsk State University in 1961. She received her candidate’s degree in 1970 and doctor’s of science degree in 2002. She is currently a chief of the Laboratory of Intelligent Systems at Tomsk State University of Architecture and Building, a professor of the Department of Software Engineering at Tomsk State University and a professor of the Department of Applied Mathematics at Tomsk State University of Architecture and Building. Her scientific interests include mathematical foundations for pattern recognition and theory of digital automates; logical tests including unconditional, conditional and mixed diagnostics tests oriented to different problem and interdisciplinary areas; logical, logical-combinatorial, logical-combinatorial and probabilistic and genetic algorithms; fuzzy logic; intelligent systems based on test methods of pattern recognition. She is the author of 6 monographs and 306 papers.

*Sergei Vladimirovich Kitler* was born in 1984. He is graduated from Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics in 2006. He is currently an assistant of Department of Computer System in Control and Design. His scientific interests include methods of pattern recognition, intelligent systems based on test methods of pattern recognition. He is author of 25 papers.



# Information-Measuring and Control Systems

# Информационно-измерительные и управляющие системы

# УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ПОЛЁТА КВАДРОКОПТЕРА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ

**С.А. Белоконь, Ю.Н. Золотухин, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, М.Н. Филиппов**

Институт автоматики и электрометрии СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1, Россия
zol@idisys.iae.nsk.su
тел: +7 (383) 333-26-25

***Ключевые слова:*** *беспилотный летательный аппарат, управление движением, квадрокоптер*

**Abstract**
An algorithm for quadrocopter control based on organization of a forced motion along the desired trajectory in the system state space, an example of motion along the square trajectory with desired speed and altitude are present.

## Введение

Развитие беспилотной авиации приводит к использованию всё новых схем летательных аппаратов, реализация возможностей которых требует решения специфических задач управления. Одним из таких аппаратов является квадрокоптер – вертолёт с четырьмя несущими винтами, обладающий широкими возможностями маневрирования по высоте, скорости и направлению полёта.

## 1 Постановка задачи

Положение квадрокоптера в пространстве характеризуется координатами $x$, $y$, $z$ центра масс аппарата в неподвижной декартовой системе координат и тремя углами поворота вокруг осей $x_b$, $y_b$, $z_b$ системы координат, жестко связанной с аппаратом, причём начало координат совпадает с центром масс аппарата. Общепринятыми являются следующие обозначения: $\psi$ – угол рыскания – угол поворота вокруг оси $z_b$; $(-\infty < \psi < \infty)$, $\varphi$ – угол крена – угол поворота вокруг оси $x_b$, $(-\pi/2 < \varphi < \pi/2)$; $\vartheta$ – угол тангажа – угол поворота вокруг оси $y_b$, $(-\pi/2 < \vartheta < \pi/2)$.

Уравнения, описывающие движение квадрокоптера в указанных координатах, и ориентация осей $x_b$, $y_b$, $z_b$ приведены в [1], [2]:

$$\left.\begin{aligned} m\ddot{x} &= (\sin\psi\cdot\sin\varphi + \cos\psi\cdot\cos\varphi\cdot\sin\vartheta)\cdot u_1; \\ m\ddot{y} &= (-\cos\psi\cdot\sin\varphi + \sin\psi\cdot\cos\varphi\cdot\sin\vartheta)\cdot u_1; \\ m\ddot{z} &= \cos\varphi\cdot\cos\vartheta\cdot u_1 - mg; \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

$$\left.\begin{aligned} I_{xx}\cdot\ddot{\varphi} &= u_2 - (I_{zz} - I_{yy})\cdot\dot{\vartheta}\cdot\dot{\psi}; \\ I_{yy}\cdot\ddot{\vartheta} &= u_3 - (I_{xx} - I_{zz})\cdot\dot{\varphi}\cdot\dot{\psi}; \\ I_{zz}\cdot\ddot{\psi} &= u_4. \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

Здесь: $m$ – масса квадрокоптера, $g$ – ускорение силы тяжести, $I_{xx}$, $I_{yy}$, $I_{zz}$ – моменты инерции относительно соответствующих осей квадрокоптера. Точками над знаками переменных обозначаются производные по времени.

Сила $u_1$, направленная по оси $z_b$ аппарата, и вращающие моменты $u_2$, $u_3$, $u_4$ определяются через силы тяги $F_1$, $F_2$, $F_3$, $F_4$, создаваемые винтами квадрокоптера:

$$(3)\quad \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -l & 0 & l \\ -l & 0 & l & 0 \\ -\lambda & \lambda & -\lambda & \lambda \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix},$$

где $l$ – расстояние от осей винтов до центра масс квадрокоптера, $\lambda$ – коэффициент пропорциональности между тягами винтов и реактивными моментами вращения относительно оси $z_b$, создаваемыми винтами.

## 2 Метод решения

В работе [3] нами предложена система управления, реализующая движение квадрокоптера по прямой линии, соединяющей начальную и конечную точки траектории, с заданной скоростью на заданной высоте над поверхностью земли с учётом рельефа местности.

В данной работе предлагается методика определения управляющих параметров $u_1 - u_4$, гарантирующих движение квадрокоптера по траектории, определяемой уравнениями

$$(4)\quad f(x,y)=0,\quad z = z_{ref}(x,y),$$

со скоростью

$$(5)\quad v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = v_{ref}(x,y).$$

В дальнейшем будем предполагать, что задания по высоте $z_{ref}(x,y)$ и скорости $v_{ref}(x,y)$ являются кусочно-постоянными функциями, т. е. изменяются только в некоторых изолированных точках траектории, что позволяет считать их производные по времени равными нулю везде, кроме изолированных точек траектории.

Предполагается также, что координаты центра масс квадрокоптера и его ориентация в пространстве в каждый момент времени известны, а двигатели квадрокоптера обладают достаточной мощностью.

От функции $f(x,y)$ потребуем существования частных производных до второго порядка включительно. При этом первые частные производные не должны быть равными нулю одновременно, а кривая $f(x,y)=0$ не должна иметь точек самопересечения кроме, может быть, начала и конца траектории.

Пусть в момент $t \in [t_0, t_1]$, где $t_0$ и $t_1$ – моменты времени начала и окончания движения квадрокоптера, положение центра масс квадрокоптера определяется решениями $x = x(t)$, $y = y(t)$, $z = z(t)$ уравнений (1), (2) при некоторых значениях управляющих параметров $u_1 - u_4$. Определим близость центра масс к траектории (4), (5) величинами $f(x(t), y(t))$ и $z(t) - z_{ref}(x(t), y(t))$.

Введём функции

$$(6)\quad \left.\begin{array}{c} S_f = \dfrac{df}{dt} + k_f \cdot f; \\ S_z = \dfrac{d}{dt}\left(z - z_{ref}\right) + k_z \cdot \left(z - z_{ref}\right); \\ S_v = v - v_{ref}, \end{array}\right\}$$

и потребуем выполнения условий

(7) $S_f = 0; \quad S_z = 0; \quad S_v = 0.$

В этом случае справедливы соотношения

$$(8)\quad \left.\begin{array}{c} f = f_0 \cdot \mathbf{exp}\left(-k_f \cdot (t - t_0)\right); \\ z - z_{ref} = \left(z_0 - z_{ref_0}\right) \cdot \mathbf{exp}\left(-k_z \cdot (t - t_0)\right); \\ v - v_{ref} = 0, \end{array}\right\}$$

т. е. квадрокоптер экспоненциально с постоянными времени $\frac{1}{k_f}$, $\frac{1}{k_z}$ выходит на траекторию (4), (5). В (8) $f_0 = f\left(x(t_0), y(t_0)\right)$; $z_0 = z(t_0)$; $z_{ref_0} = z_{ref}\left(x(t_0), y(t_0)\right)$.

Для удержания квадрокоптера на заданной траектории условия (7) должны выполняться во всех точках траектории, т. е. необходимо

$$(9)\quad \frac{d}{dt}S_f^2 \le 0; \quad \frac{d}{dt}S_z^2 \le 0; \quad \frac{d}{dt}S_v^2 \le 0.$$

Усилим условия (9), положив

$$\frac{d}{dt}S_f^2 = -2\alpha_f \cdot S_f^2; \quad \frac{d}{dt}S_z^2 = -2\alpha_z \cdot S_z^2; \quad \frac{d}{dt}S_v^2 = -2\alpha_v \cdot S_v^2,$$

т. е.

$$(10)\quad \dot{S}_f = -\alpha_f \cdot S_f; \quad \dot{S}_z = -\alpha_z \cdot S_z; \quad \dot{S}_v = -\alpha_v \cdot S_v.$$

Здесь $\alpha_f > 0; \quad \alpha_z > 0; \quad \alpha_v > 0$ определяют постоянные времени $\frac{1}{\alpha_f}$, $\frac{1}{\alpha_z}$, $\frac{1}{\alpha_v}$, с которыми $S_f$, $S_z$, $S_v$ экспоненциально стремятся к нулю.

Дифференцируя соотношения (6) и подставляя результаты в (10), получим уравнения для вычисления вторых производных $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$, гарантирующих выход квадрокоптера на заданную траекторию и движение по этой траектории.

$$(11)\quad \left.\begin{array}{c} f_x \cdot \ddot{x} + f_y \cdot \ddot{y} = A(x, y, \dot{x}, \dot{y}); \\ \dfrac{\dot{x} \cdot \ddot{x} + \dot{y} \cdot \ddot{y}}{v} = B(x, y, \dot{x}, \dot{y}, v_{ref}); \\ \ddot{z} = C(z, \dot{z}, z_{ref}), \end{array}\right\}$$

где

$$(11')\quad \left.\begin{array}{l} A(x, y, \dot{x}, \dot{y}) = -\alpha_f \cdot S_f - k_f \cdot \left(f_x \cdot \dot{x} + f_y \cdot \dot{y}\right) - 2f_{xy} \cdot \dot{x} \cdot \dot{y} - f_{xx} \cdot \dot{x}^2 - f_{yy} \cdot \dot{y}^2; \\ B(x, y, \dot{x}, \dot{y}, v_{ref}) = -\alpha_v \cdot S_v; \\ C(z, \dot{z}, z_{ref}) = -\alpha_z \cdot S_z - k_z \cdot \dot{z}; \\ v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}. \end{array}\right\}$$

Здесь и далее нижние индексы при символах функции $f$ означают соответствующие частные производные.

Введём обозначения

$$(12)\quad \left.\begin{aligned} \Delta &= f_x \cdot \dot{y} - f_y \cdot \dot{x}; \\ \Delta_1 &= A \cdot \dot{y} - B \cdot v \cdot f_y; \\ \Delta_2 &= B \cdot v \cdot f_x - A \cdot \dot{x}. \end{aligned}\right\}$$

С учётом этих обозначений из (11) получим требуемые значения вторых производных по времени координат центра масс квадрокоптера:

$$(13)\quad \ddot{x} = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad \ddot{y} = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \quad \ddot{z} = C.$$

Приравняем значения вторых производных в уравнениях (1) и (13). После простых преобразований получим систему уравнений

$$(14)\quad \left.\begin{aligned} \left(\sin\psi \cdot \sin\varphi + \cos\psi \cdot \cos\varphi \cdot \sin\vartheta\right) \cdot \frac{u_1}{m} &= \frac{\Delta_1}{\Delta}; \\ \left(-\cos\psi \cdot \sin\varphi + \sin\psi \cdot \cos\varphi \cdot \sin\vartheta\right) \cdot \frac{u_1}{m} &= \frac{\Delta_2}{\Delta} \\ \cos\varphi \cdot \cos\vartheta \cdot \frac{u_1}{m} &= g + C. \end{aligned}\right\}$$

В уравнениях (14) справа стоят необходимые значения ускорений центра масс квадрокоптера по осям $x$, $y$, $z$ соответственно, слева – проекции вектора $\frac{u_1}{m}$ – ускорения, создаваемого двигателями вдоль оси $z_b$, на те же оси $x$, $y$, $z$. В этом случае функции углов $\psi$, $\varphi$, $\vartheta$ в левой части (14) есть соответствующие направляющие косинусы. Возведём в квадрат левые и правые части уравнений (14) и, сложив их почленно, получим $u_1$ – необходимую суммарную силу тяги двигателей:

$$(15)\quad u_1 = m \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta_1}{\Delta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_2}{\Delta}\right)^2 + (g + C)^2}.$$

Подставляя (15) в систему уравнений (14) и переходя к безразмерным величинам

$$\gamma_1 = \frac{\frac{\Delta_1}{\Delta}}{\sqrt{\left(\frac{\Delta_1}{\Delta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_2}{\Delta}\right)^2 + (g + C)^2}}; \quad \gamma_2 = \frac{\frac{\Delta_2}{\Delta}}{\sqrt{\left(\frac{\Delta_1}{\Delta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_2}{\Delta}\right)^2 + (g + C)^2}}; \quad \gamma_3 = \frac{g + C}{\sqrt{\left(\frac{\Delta_1}{\Delta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_2}{\Delta}\right)^2 + (g + C)^2}},$$

получим систему уравнений относительно углов $\psi$, $\varphi$, $\vartheta$, определяющих необходимую ориентацию квадрокоптера относительно системы координат $x_b$, $y_b$, $z_b$

$$(16)\quad \left.\begin{aligned} \left(\sin\psi \cdot \sin\varphi + \cos\psi \cdot \cos\varphi \cdot \sin\vartheta\right) &= \gamma_1; \\ \left(-\cos\psi \cdot \sin\varphi + \sin\psi \cdot \cos\varphi \cdot \sin\vartheta\right) &= \gamma_2; \\ \cos\varphi \cdot \cos\vartheta &= \gamma_3. \end{aligned}\right\}$$

Отметим, что уравнения (16) не являются независимыми, т. к. суммы квадратов левых и правых частей уравнений тождественно равны единицам. Это объективно отражает факт, состоящий в том, что для управления направлением движения квадрокоптера достаточно управления любыми двумя углами из $\psi$, $\varphi$, $\vartheta$. При управлении, например, углами тангажа и крена угол рыскания $\psi$ можно выбирать из других соображений, не связанных с управлением направлением движения. В некоторых случаях, например для удобства пользования установленным на квадрокоптере оборудованием, следует ориентировать продольную ось квадрокоптера

$x_b$ параллельно касательной к траектории $f(x,y)=0$ в соответствующей текущей точке $x=x(t),\ y=y(t)$ и, следовательно, параллельно вектору скорости $[\dot{x},\dot{y}]$ касательному к вектору $[f_y,-f_x]$. Отсюда желательные значения для угла $\psi$ можно определить соотношениями

$$(17)\quad \cos\psi_{ref}=\frac{f_y}{\sqrt{f_x^2+f_y^2}};\quad \sin\psi_{ref}=-\frac{f_x}{\sqrt{f_x^2+f_y^2}},$$

которые справедливы при движении квадрокоптера по кривой, определяемой уравнением $f(x,y)=0$.

Распространим соотношения (17) и на траекторию движения квадрокоптера при выходе на кривую $f(x,y)=0$. Это позволит избавиться от неопределённостей при вычислении по выражениям (12) ускорений $\frac{\Delta_1}{\Delta}$, $\frac{\Delta_2}{\Delta}$ в начале движения квадрокоптера при $t=t_0$ и $\dot{x}(t_0)=\dot{y}(t_0)=0$. Можно просто положить $\dot{x}(t_0)=\varepsilon\cdot\cos\psi_{ref}$, $\dot{y}(t_0)=\varepsilon\cdot\sin\psi_{ref}$ при $\varepsilon<<1$, что практически не повлияет на движение квадрокоптера.

После определения угла $\psi_{ref}$ из соотношений (17) значения углов $\varphi_{ref}$ и $\vartheta_{ref}$ определяются из уравнений (16) соотношениями

$$(18)\quad \left.\begin{aligned}
\sin\varphi_{ref}&=\gamma_1\cdot\sin\psi_{ref}-\gamma_2\cdot\cos\psi_{ref};\\
\cos\varphi_{ref}&=\sqrt{1-\left(\gamma_1\cdot\sin\psi_{ref}-\gamma_2\cdot\cos\psi_{ref}\right)^2};\\
\sin\vartheta_{ref}&=\frac{\gamma_2\cdot\sin\psi_{ref}+\gamma_1\cdot\cos\psi_{ref}}{\sqrt{\gamma_3^2+\left(\gamma_2\cdot\sin\psi_{ref}+\gamma_1\cdot\cos\psi_{ref}\right)^2}};\\
\cos\vartheta_{ref}&=\frac{\gamma_3}{\sqrt{\gamma_3^2+\left(\gamma_2\cdot\sin\psi_{ref}+\gamma_1\cdot\cos\psi_{ref}\right)^2}},
\end{aligned}\right\}$$

что легко проверяется подстановкой соотношений (18) в уравнения (16).

После определения значений углов $\psi$, $\varphi$, $\vartheta$, обеспечивающих выполнение условий (14), (16), можно определить управляющие моменты $u_2$, $u_3$, $u_4$, реализующие нужную ориентацию квадрокоптера.

Как и для управления движением центра масс квадрокоптера установление нужной ориентации будем производить в соответствии с заранее выбранными законами изменения углов $\psi$, $\varphi$, $\vartheta$. В отличие от двухэтапной процедуры (6), (10), представленной выше, желаемые законы изменения углов представим сразу в виде уравнений второго порядка:

$$(19)\quad \left.\begin{aligned}
&\ddot{\psi}+\left(\alpha_\psi+k_\psi\right)\cdot\dot{\psi}+\alpha_\psi\cdot k_\psi\cdot\psi=\alpha_\psi\cdot k_\psi\cdot\psi_{ref};\\
&\ddot{\varphi}+\left(\alpha_\varphi+k_\varphi\right)\cdot\dot{\varphi}+\alpha_\varphi\cdot k_\varphi\cdot\varphi=\alpha_\varphi\cdot k_\varphi\cdot\varphi_{ref};\\
&\ddot{\vartheta}+\left(\alpha_\vartheta+k_\vartheta\right)\cdot\dot{\vartheta}+\alpha_\vartheta\cdot k_\vartheta\cdot\vartheta=\alpha_\vartheta\cdot k_\vartheta\cdot\vartheta_{ref}.
\end{aligned}\right\}$$

При положительных значениях коэффициентов $a$ и $k$ уравнения (19) обеспечивают устойчивое установление необходимых значений углов, а при $\alpha_\psi=k_\psi$, $\alpha_\varphi=k_\varphi$, $\alpha_\vartheta=k_\vartheta$ эти процессы будут иметь монотонный характер [4].

Приравнивая угловые ускорения из (2) и (19), получим значения управляющих моментов, реализующих процессы (19):

$$
(20)\quad \left.\begin{array}{c} u_2 = I_{xx}\cdot\left[\left(\alpha_\varphi + k_\varphi\right)\cdot\dot{\varphi} + \alpha_\varphi\cdot k_\varphi\cdot\left(\varphi-\varphi_{ref}\right)\right] + \left(I_{zz}-I_{yy}\right)\cdot\dot{\vartheta}\cdot\dot{\psi};\\ u_3 = I_{xx}\cdot\left[\left(\alpha_\vartheta + k_\vartheta\right)\cdot\dot{\vartheta} + \alpha_\vartheta\cdot k_\vartheta\cdot\left(\vartheta-\vartheta_{ref}\right)\right] + \left(I_{xx}-I_{zz}\right)\cdot\dot{\varphi}\cdot\dot{\psi};\\ u_4 = -I_{xx}\cdot\left[\left(\alpha_\psi + k_\psi\right)\cdot\dot{\psi} + \alpha_\psi\cdot k_\psi\cdot\left(\psi-\psi_{ref}\right)\right]. \end{array}\right\}
$$

Очевидно, что подстановка соотношений (20) в уравнения (2) приводит к устойчивой системе (19).

Анализ устойчивости движения центра масс квадрокоптера более сложен. Прежде всего, воспользуемся естественным разделением процессов изменения углов ориентации и движения центра масс на «быстрые» и «медленные» [5]. Дело в том, что время движения квадрокоптера по траектории измеряется минутами или десятками минут, процессы же установления нужных значений угловых переменных заканчиваются за секунды или доли секунд. Это позволяет считать, что во время полёта с высокой точностью выполняются соотношения

$$
(21)\quad \psi = \psi_{ref}\ ,\ \varphi = \varphi_{ref}\ ,\ \vartheta = \vartheta_{ref}\ .
$$

Подстановка соотношений (21), (15) в уравнения (1) приводит к соотношениям (13) и, после простых преобразований, к уравнениям (11). С учётом обозначений (11′) и (6) получим уравнения, описывающие движение центра масс квадрокоптера по заданной траектории:

$$
(22)\quad \left.\begin{array}{c} \ddot{f} + \left(\alpha_f + k_f\right)\cdot\dot{f} + \alpha_f\cdot k_f\cdot f = 0;\\ \ddot{z} + \left(\alpha_z + k_z\right)\cdot\dot{z} + \alpha_z\cdot k_z\cdot z = \alpha_z\cdot k_z\cdot z_{ref};\\ \dot{v} + \alpha_v\cdot v = \alpha_v\cdot v_{ref}. \end{array}\right\}
$$

Уравнения (22) описывают устойчивые процессы выхода квадрокоптера на заданные параметры полёта.

### 3 Моделирование движения

Для исследования вопросов устойчивости и эффективности предлагаемого подхода проведены численные эксперименты с использованием модели движения (1), (2) и законов изменения управляющих параметров (15), (20). В уравнениях движения квадрокоптера задавались параметры:

$m = 2.2$; $I_{xx} = 0.167634$; $I_{yy} = I_{xx}$; $I_{zz} = 0.231447$.

Коэффициенты закона управления следующие:

$k_\varphi = 40$; $k_\theta = k_\psi = 20$; $\alpha_x = \alpha_y = \alpha_z = 1$.

Моделировался режим работы замкнутой системы при управлении движением аппарата на постоянной высоте и скорости по траектории в виде квадрата. Для задания траектории использовалась аппроксимация квадрата полиномом высокой степени. На рисунке 1 показана траектория полета квадрокоптера. Соответствующие изменения управляющих параметров $u_1$ – $u_4$ приведены на рисунке 2. Пространственная ориентация показана на рисунке 3. Следует отметить, что квадрокоптер устойчиво выходит на заданную траекторию и выдерживает желаемые параметры движения.

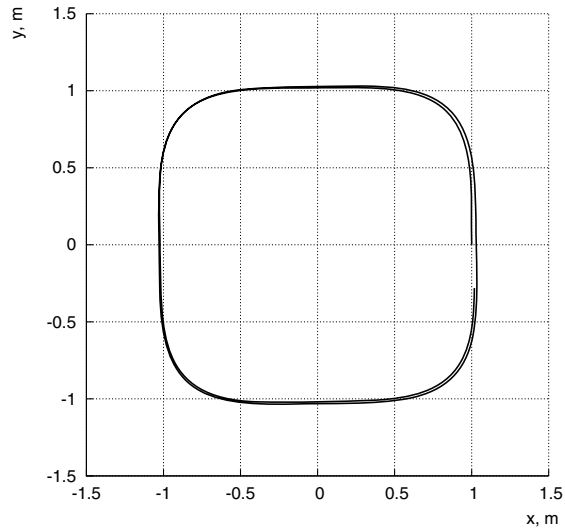



Рисунок 1 – Траектория движения

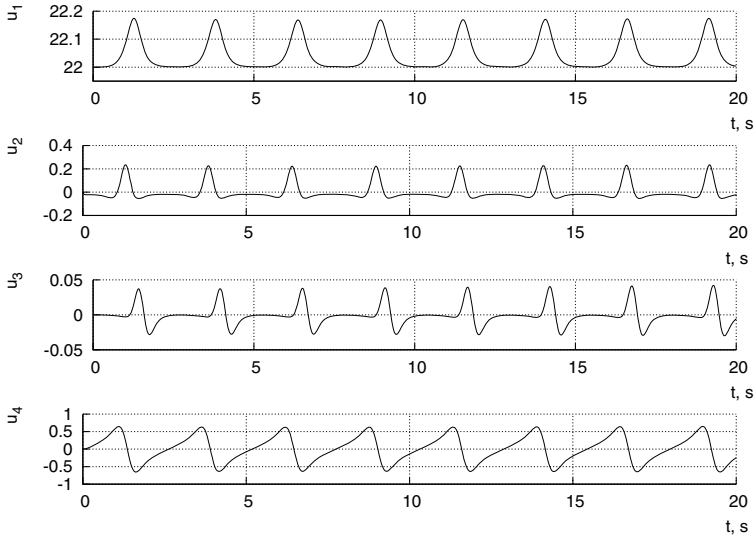



Рисунок 2 – Изменение управляющих параметров во времени

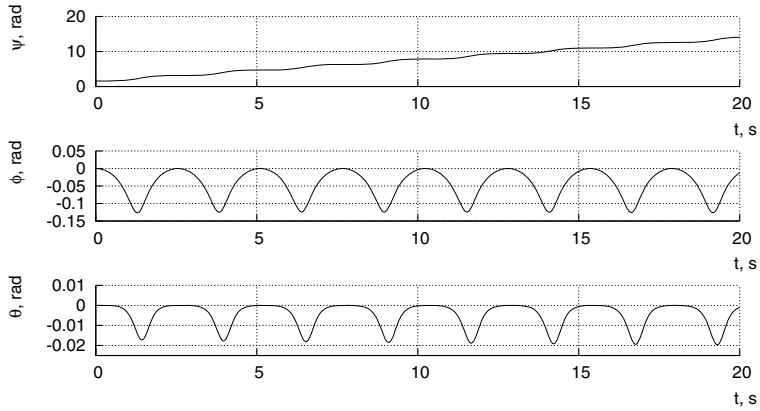



Рисунок 3 – Изменение пространственной ориентации во времени

**Заключение**

Представлен метод управления движением аппарата вертикального взлета, включающий задание произвольной траектории в виде функции в пространстве координат и предназначенный для управления взлетом и полетом квадрокоптера по заданной траектории с заданными скоростью и высотой. Метод может быть применен при наличии достаточно точной информации о пространственном положении летательного аппарата. Результаты вычислительного эксперимента показывают достижимость поставленных задач и устойчивость полученной нелинейной системы управления.

**Список литературы**

[1] Jinhyun Kim, Min-Sung Kang, Sangdeok Park. Accurate Modeling and Robust Hovering Control for a Quad-rotor VTOL Aircraft. // J. Intell. Robot. Syst. (2010) Volume 57, Numbers 1 – 4, pp. 9 – 26.

[2] Randal W. Beard. Quadrotor dynamics and control. Brigham Young University, February 19 2008. http://quad08topgun.groups.et.byu.net/documents/quadrotor_2_20_2008.pdf, Last visited 14 – 04 – 2011.

[3] С.А. Белоконь, Ю.Н. Золотухин, А.А. Нестеров, М. Н. Филиппов. Управление квадрокоптером на основе организации движения по желаемой траектории в пространстве состояний // Труды XIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Самара: Самарский научный центр РАН, 2011. С. 217 – 222.

[4] И. В. Мирошник. Теория автоматического управления. Линейные системы. Спб.: Питер, 2005. 336 с.

[5] V. I. Utnik, A.S. Vostrikov. Control sustem with decoupling motion // Preprint 7th IFAC World Congress. Finland, 1978. Vol. 2. P. 967 – 973.

# ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ В СОСТАВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**Ю.Н. Золотухин, А.С. Нестеров, М.Н. Филиппов**

Институт автоматики и электрометрии СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1, Россия
zol@idisys.iae.nsk.su
тел: +7 (383) 333-26-25

***Ключевые слова:*** *интеллектуальные электроэнергетические системы, накопление электрической энергии, аккумуляторные батареи большой энергоемкости, оптимизация режимов заряда/разряда, минимизация потерь, имитационная модель*

**Abstract**

Currently there is growing interest in the modernization of electric power systems and development of so-called intelligent power systems; one of the required key technologies is the accumulation of electrical energy. This article covers the operating modes optimization of high-capacity batteries, charge/discharge process control algorithm to ensure the minimization of energy loss is introduced, simulation model is also presented.

## Введение

В настоящее время наблюдается рост интереса к бурно развивающемуся направлению преобразования электроэнергетических систем в так называемые интеллектуальные электроэнергетические системы (ИЭС). Создание ИЭС трактуется во всем мире как концепция инновационного развития электроэнергетики. Технологическую платформу ИЭС составляют различные современные средства, такие как устройства и технологии на базе силовой электроники, сверхпроводимости, электромашиновентильных комплексов и др.

Одной из ключевых технологий ИЭС является накопление электрической энергии, позволяющее обеспечить выполнение следующих функций:

- выравнивание графиков нагрузки в сети (накопление электрической энергии в периоды избытка и выдача в сеть в периоды дефицита);
- обеспечение в сочетании с современными устройствами силовой электроники повышения пределов статической и динамической устойчивости энергосистем;
- демпфирование колебаний активной и реактивной мощности, снятие или существенное сокращение нерегулярных колебаний в межсистемных линиях электропередачи, повышение пропускной способности линий электропередачи;
- обеспечение бесперебойного питания как подстанций и электрических сетей (собственные нужды), так и особо ответственных потребителей;
- обеспечение стабильной и устойчивой работы децентрализованных и нетрадиционных источников, работающих как автономно, так и в составе Единой национальной электрической сети.

Наиболее перспективным решением упомянутых задач представляется использование аккумуляторных батарей большой энергоемкости (АББЭ) и накопителей энергии на основе суперконденсаторов (СК), соединяемых с сетью посредством устройств силовой электроники. Отметим, что АББЭ обладают достаточно длительным действием, достигающим нескольких часов, но не обладают необходимым быстродействием. СК обладают достаточно высоким бы-

стродействием, но не способны обеспечить длительное аккумулирование электрической энергии.

Помимо устройств накопления энергии, система должна также включать набор компонент, обеспечивающих выполнение следующих функций:

- приём электроэнергии из сети в виде переменного тока и преобразование его в постоянный;
- преобразование электроэнергии постоянного тока, накопленной в АББЭ в электроэнергию переменного тока заданного качества;
- выдача электроэнергии переменного тока в сеть, либо автономному потребителю.

## 1 Постановка задачи

Рассматривается интеллектуальная система управления группой накопителей электрической энергии на основе АББЭ, подключенных посредством преобразователей постоянного тока (DC/DC) к общей шине устройства сопряжения с сетью (AC/DC). Целью работы является разработка алгоритмов управления процессами заряда/разряда аккумуляторных батарей, обеспечивающих минимизацию потерь энергии.

При решении задачи необходимо учесть ряд динамически изменяющихся параметров системы, таких как нелинейная зависимость коэффициента полезного действия (КПД) аккумуляторной батареи от тока и глубины разряда, зависящие от температуры окружающей среды потери тепловой энергии, неравномерная скорость деградации элементов батарей (изменение количество функционирующих ячеек и внутреннего сопротивления) и т. п., а также возможность изначального наличия в системе аккумуляторных батарей с неодинаковыми зарядом и степенями износа.

Таким образом, предлагаемые алгоритмы должны опираться на методы адаптивного управления, которые позволили бы поддерживать режимы с минимальными потерями не только в начале работы, когда все элементы схемы обладают заявленными производителем характеристиками, но и в процессе длительной эксплуатации, при которой параметры этих элементов могут изменяться.

## 2 Метод решения

Суть предлагаемого метода адаптивного управления состоит в организации дискретного пошагового перехода от текущих уставок мощностей и напряжения на общей шине к новым оптимальным значениям, вычисленным способами динамического программирования по информации о зависимости КПД элементов от состояния, а также динамической корректировке этих функций в случае наблюдаемых отклонений от вычисленных значений. При инициализации алгоритма используются предоставляемые производителем графики КПД, поэтому, если параметры элементов отличаются от штатных, вычисленные уставки не являются оптимальными, но измерение напряжений и токов на входах и выходах DC/DC преобразователей на каждом шаге, а также информация контроллера о состоянии батарей позволяют вычислить реальные эффективные внутренние сопротивления элементов, скорректировать графики КПД в соответствии с фактическими значениями и, тем самым, минимизировать потери на следующих циклах заряда/разряда.

На рисунке 1 представлена имитационная модель системы, включающая контроллер, три аккумуляторные батареи, подключенные через DC/DC преобразователи к общей шине преобразователя AC/DC, а также приведены графики зависимости потерь энергии в элементах схемы от величины тока разряда ячейки, разности напряжений между входом и выходом преобразователя DC/DC, величины напряжения на ячейке от степени её разряда.

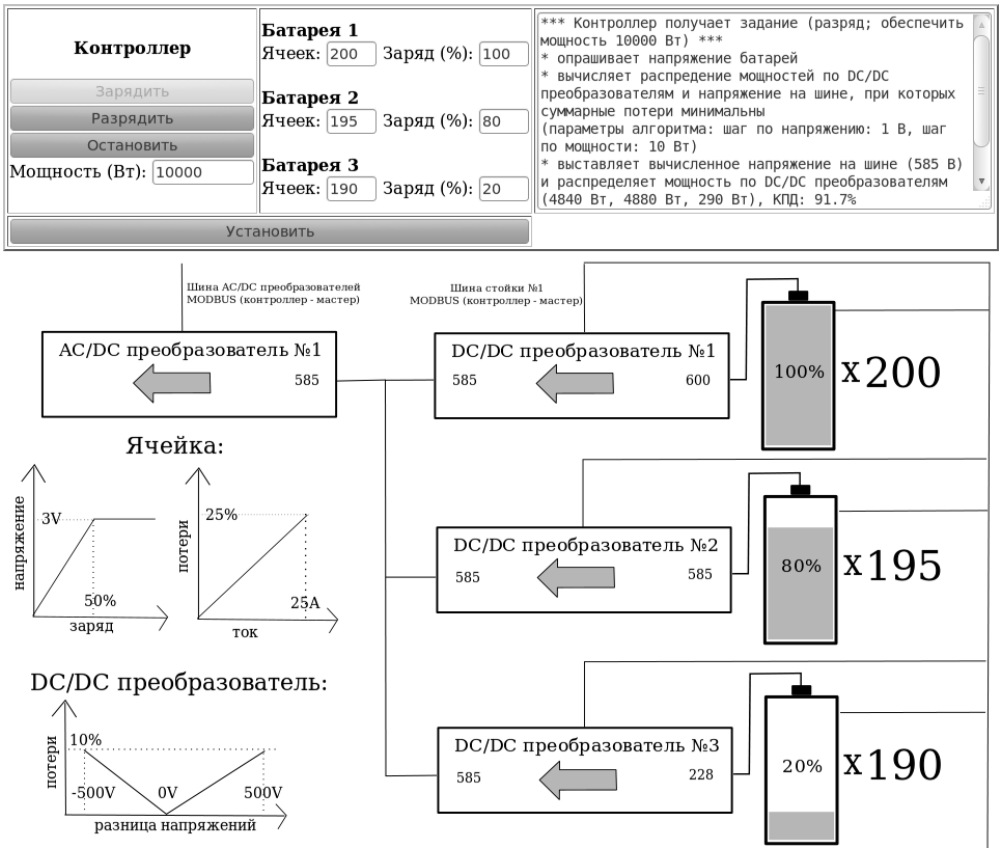



Рисунок 1 – Имитационная модель системы

Имитационная модель, включающая контроллер и энергетическое оборудование, разработана на языке JavaScript, использует технологию SVG для визуализации статических и динамических элементов схемы, исполняется в среде стандартного веб-обозревателя Mozilla Firefox.

Результаты моделирования показали, что алгоритм хорошо работает в квазистационарных условиях, в частности, при медленной деградации батарей (постепенный рост внутреннего сопротивления, выпадение небольшого числа ячеек) и преобразователей (изменение КПД не более, чем на 10% за цикл заряда/разряда), что согласуется с предполагаемыми условиями эксплуатации.

## 3 Заключение

Предложенный метод адаптивного управления процессами заряда/разряда аккумуляторных батарей позволяет обеспечить минимизацию потерь энергии в условиях изменяющихся параметров, таких как температура окружающей среды, деградация элементов как собственно аккумуляторных батарей, так и преобразовательной техники.

# ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ ГИДРОДИНАМИКИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

**Д.Н. Сузанский**

ОАО «Концерн радиостроения «ВЕГА»
121170, Москва, Кутузовский проспект, 34, Россия
suzansky@mail.ru
тел: +7 (903) 625-79-40

***Ключевые слова:*** *траекторное управление, безопасность полетов, облет опасных зон, опасные метеорологические условия, гидродинамика*

**Abstract**
Method of correction of airplane trajectory during fly-around of an area with hazardous weather conditions is considered. A technique of description of an area with hazardous weather conditions is suggested. Analytic dependences for calculation of heading are given. The algorithm of realization of the method of correction of airplane trajectory is described.

## Введение

Для синтеза алгоритмов управления летательными аппаратами (ЛА) в настоящее время применяется множество подходов [1], основной целью которых является получение желаемого закона управления. Один из таких подходов, основанный на концепции обратных задач динамики [2, 3], предполагает, чтобы движение управляемой системы проходило по предписанной траектории. При таком подходе алгоритм закона управления строится из условия, при котором траектория движения системы возможно в большей степени приближается к траектории движения некоторой эталонной системы.

В работе рассматривается задача синтеза алгоритма управления летательным аппаратом (ЛА) при облете им опасной зоны с неблагоприятными метеоусловиями [4]. Для решения этой задачи достаточно найти закон изменения курса летательного аппарата в момент облета такой зоны. При этом предполагается, что зона с неблагоприятными метеоусловиями описывается эллипсом, центр которого совпадает с центром опасной зоны (ОЗ).

Традиционно задачи нахождения способов изменения (коррекции) траектории движения летательного аппарата решаются при помощи процедур синтеза оптимального адаптивного управления [1]. При этом синтез такого управления часто осуществляется при наличии ограничений в форме равенств или неравенств на компоненты вектора состояния системы. Для формирования желаемой траектории в работе предлагается использовать положения теории гидродинамики. Для этого рассмотрим плоское безвихревое движение идеальной несжимаемой жидкости [5, 6]. Формирование желаемых траекторий мы получим при бесциркуляционном обтекании эллиптического цилиндра [5, 6, 7]. Сеть линий тока, получаемая при обтекании эллипса плоским потенциальным потоком, направленным под углом $\alpha$ к его полуосям, показана на рисунке 1.

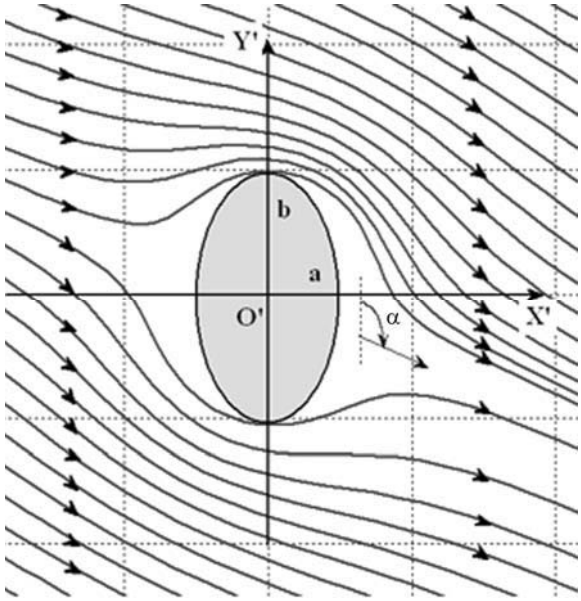



Рисунок 1 – Сеть линий тока при обтекании эллипса плоским потенциальным потоком, направленным под углом $\alpha$ к его полуосям

Применяя метод конформных отображений [8] к построению потоков плоского потенциального течения идеальной несжимаемой жидкости [5, 6], функции потенциала скорости и линии тока для случая обтекания кругового цилиндра будут иметь вид:

$$(1)\quad \begin{aligned} \varphi(x,y) &= \left(x+\frac{x}{x^2+y^2}\right)\cos\alpha - \left(y-\frac{y}{x^2+y^2}\right)\sin\alpha \\ \psi(x,y) &= \left(x+\frac{x}{x^2+y^2}\right)\sin\alpha + \left(y-\frac{y}{x^2+y^2}\right)\cos\alpha \end{aligned}.$$

Откуда можно найти составляющие вектора скорости потока при обтекании эллиптического цилиндра, вводя значения полуосей $a$ и $b$ эллипса:

$$(2)\quad \begin{aligned} V_x &= \dot{\varphi}_x = \cos\alpha + a^2\,\frac{(y^2-x^2)\cos\alpha - 2xy\sin\alpha}{(x^2-y^2)^2} \\ V_y &= \dot{\varphi}_y = -\sin\alpha + b^2\,\frac{(x^2-y^2)\sin\alpha - 2xy\cos\alpha}{(x^2-y^2)^2} \end{aligned}.$$

Тогда угол касательной к линии тока (в нашем случае - искомый угол коррекции $\varphi_{\text{К}}$ траектории летательного аппарата) будет равен:

$$(3)\quad \varphi_{\text{К}} = arctg\,\frac{V_y}{V_x}$$

Для синтеза алгоритма формирования управления, позволяющего рассматриваемой системе двигаться по заданной траектории, примем ряд предположений и допущений, а именно:

1) в начальный момент времени ЛА движется равномерно со скоростью $V_{\text{ЛА}}$ и прямолинейно с заданным курсом $\varphi_{\text{ЛА}}$;

2) опасная зона статическая и аппроксимируется эллипсом с полуосями $a$ и $b$ ,который повернут на угол $\varphi_з$ ,центр опасной зоны совпадает с центром эллипса.

При данных допущениях требуется найти закон изменения вектора скорости летательного аппарата, который обеспечивал бы полет ЛА с заданным курсом $\varphi_{ЛА}$ как до облета опасной зоны, так и после.

Пусть имеется две системы координат, представленные на рисунке 2,: первая – земная система координат OXY, вторая - система координат O'X'Y', связанная с центром опасной зоны O' и повернута относительно земной системы координат OXY на угол $\varphi_{ЛА}$ . При этом оси системы O'X'Y' совпадают с направлениями полуосей эллипса.

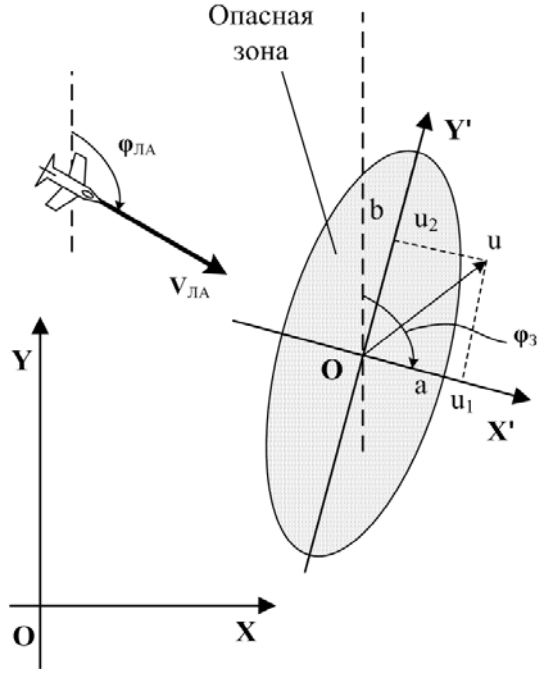



Рисунок 2 – Взаимное расположение летательного аппарата и опасной зоны

Движение летательного аппарата в земной системе координат OXY задано уравнением:

(4) $\dot{z} = W_K$

где $z = \begin{bmatrix} x - x_3 & y - y_3 \end{bmatrix}^T$ - вектор, определяющий положение летательного аппарата относительно центра опасной зоны в земной системе координат; $x, y, x_3, y_3$ - координаты летательного аппарата и центра опасной зоны в земной системе координат; $W_K$ - искомый вектор скорости ЛА, необходимый для коррекции курса $\varphi_{ЛА}$ , заданного в начальный момент времени.

Положение летательного аппарата в системе координат O'X'Y' задается соотношением:

(5) $u = \Phi z$ ,

где: $u = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 \end{bmatrix}^T$ - вектор координат ЛА в системе координат O'X'Y';

$\Phi = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{ЛА}) & \sin(\varphi_{ЛА}) \\ -\sin(\varphi_{ЛА}) & \cos(\varphi_{ЛА}) \end{bmatrix}$ - матрица поворота земной системы координат на угол $\varphi_{ЛА}$ .

Тогда закон движения летательного аппарата в системе координат O'X'Y' описывается уравнением:

$$(6)\quad \dot{\mathrm{u}} = \frac{d}{dt}\left(\Phi \mathrm{z}\right) = \Phi \dot{\mathrm{z}} + \dot{\varphi}_3 \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi_3} z\ .$$

Наличие второго слагаемого в (6) предполагает существование угловой скорости движения опасной зоны. Исходя из предположения ее статичности, в (6) останется только первое слагаемое, и с учетом (4) закон управления будет иметь вид:

$$(7)\quad \mathrm{W_K} = \Phi^{-1}\dot{\mathrm{u}}\ ,$$

где: $\mathrm{W_K} = \left[w_{\mathrm{K}_1} \quad w_{\mathrm{K}_2}\right]^{\mathrm{T}}$ - скорректированный вектор скорости ЛА.

Тогда, используя выражение (3), требуемый скорректированный курс ЛА для облета опасной зоны в системе координат O'X'Y' определяется из соотношения:

$$(8)\quad \varphi_{\mathrm{K}} = arctg\,\frac{w_{\mathrm{к}2}}{w_{\mathrm{к}2}}\ .$$

В выражение (7) входит неизвестная функция $\dot{u}$, в качестве которой предлагается использовать векторную функцию $\dot{u} = g(u)$. Элементами этой функции являются проекции скорости движения летательного аппарата в системе координат O'X'Y' на оси O'X' и O'Y' соответственно, т.е. $\dot{u} = \left[\dot{u}_1 \quad \dot{u}_2\right]^{\mathrm{T}}$. В качестве составляющих этой векторной функции в работе предлагается использовать элементы выражения (2).

При таких условиях скорректированный угол определяется при помощи выражения (5), элементы которого находятся из уравнения:

$$(9)\quad \mathrm{W_K} = \Phi^{-1}\mathrm{g}\left(\Phi \mathrm{z}\right).$$

Здесь в функции $g(\Phi \mathrm{z})$ значение для угла $\alpha$ определяется из значения вектора скорости летательного аппарата относительно опасной зоны.

Таким образом, выражения (2), (8) и (9) задают алгоритм управления летательным аппаратом при облете им опасной зоны.

Указанный алгоритм целесообразно использовать следующим образом. При аппроксимации опасный зоны эллипсом, в память ЭВМ заносятся координаты $x_3$ и $y_3$ его центра и значения полуосей $a$ и $b$. При движении летательного аппарата происходит вычисление расстояния до центра опасной зоны. Если это расстояние становится меньше определенной величины, то производится проверка пересечения продолжения траектории движения летательного аппарата с границей опасной зоны (эллипсом). При положительном результате, происходит коррекция курса ЛА по приведенному выше алгоритму.

Коррекция курса ЛА при обходе опасной зоны прекращается, когда продолжение вектора результирующей скорости летательного аппарата перестанет пересекать опасную зону (эллипс).

Важно отметить, что для измерения указанных параметров движения летательного аппарата никаких дополнительных измерителей не требуется и достаточно применять имеющиеся штатное оборудование ЛА. При этом никаких ограничений на его использование не накладывается.

В рассматриваемом методе опасная зона может быть аппроксимирована не только эллипсом, но и окружностью. В этом случае полуоси эллипса будут равны друг другу $a = b$ и равны радиусу аппроксимирующей окружности. В этом случае предложенный алгоритм вырождается в алгоритм, рассмотренный в статье [9].

При помощи математического моделирования была проверена эффективность предложенного способа облета опасных зон. Один из вариантов траектории полета летательного аппарата при облете опасной зоны представлен на рисунке 3. Для сравнения здесь же показана траектория (пунктирная линия), построенная без учета опасной зоны. Координаты начального положения летательного аппарата в обоих случаях совпадают.

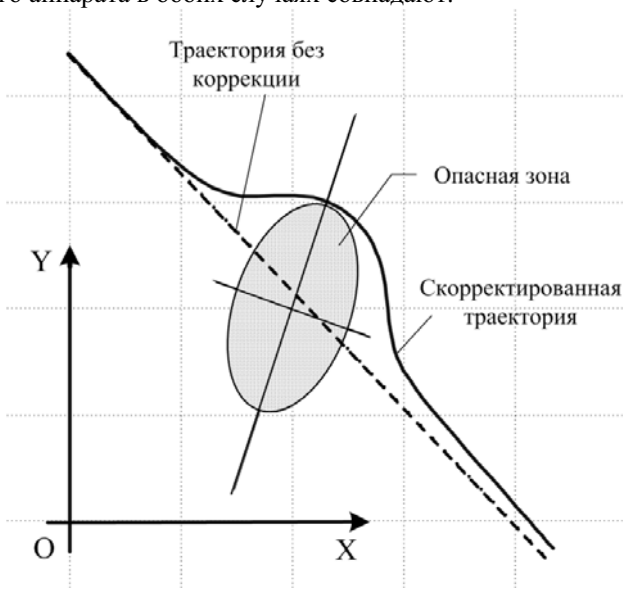



Рисунок 3 – Вариант траектории движения летательного аппарата при облете опасной зоны

Представленные результаты показывают, что предложенный способ управления курсом летательного аппарата позволяет автоматически получать траектории облета опасных зон, которые аппроксимированы эллипсами. К преимуществам данного способа можно отнести то, что такие траектории можно построить как заранее, так и в реальном масштабе времени, а в ряде случаев удается получить их аналитические выражения. Кроме этого рассмотренный метод позволяет автоматизировать процесс описания опасных зон, снижая тем самым нагрузку на диспетчера (штурмана). Вместе с этим, к недостаткам можно отнести то, что после облета опасной зоны, летательный аппарат достаточно продолжительное время выходит на заданный курс.

**Заключение**

Таким образом, предложен простой и эффективный способ облета опасных зон, позволяющий на основе методов теории конформных отображений получать траектории полета летательных аппаратов для различных начальных условий. При этом опасные зоны могут носить подвижный характер и быть аппроксимированы либо эллипсами, либо окружностями. Указанная аппроксимация позволяет автоматизировать процесс описания опасных зон, снижая тем самым нагрузку на диспетчера (штурмана).

**Список литературы**

[1] Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управление. М.: Наука, 1979.
[2] Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: Линейные модели. М.: Наука, 1987, 304с.
[3] Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: Нелинейные модели. М.: Наука, 1988, 304с.

[4] Управление воздушным движением / Ю.П. Дарымов [и др.]. М.: Транспорт, 1989.
[5] Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Учебник. Ч. I. М., Физматгиз, 1963, 727с.
[6] Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Учебное пособие. Изд. 2-е. М., Физматгиз, 1959, 784с.
[7] Мельников А.П. Основы теоретической аэродинамики. Л.: ЛКВВА, 1953, 823 с.
[8] Лавреньтьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1965, 716 с.
[9] Гандурин В.А., Кирсанов А.П., Мамаев В.В. Алгоритм коррекции методов наведения истребителя на воздушную цель в горизонтальной плоскости при обходе опасных зон // Радиоэлектронные системы управления. 2009. №3. С. 16-19.

# ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ КОМБИНИРОВАННОЕ НАВЕДЕНИЕ НА ГИПЕРЗВУКОВЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ

**Д.А. Миляков**

ОАО «Концерн радиостроения «Вега»
121170, Москва, Кутузовский проспект, 34, Россия
from_fn@mail.ru
тел: +7 (915) 486-28-92

***Ключевые слова:*** *система наведения, комбинированное наведение, алгоритмы траекторного управления, статистическая теория оптимального управления, авиационные системы радиоуправления*

**Abstract**

The problem of trajectory control algorithms developing for combined guidance system of unmanned aerial vehicles is considered. Under guidance to new make of targets in command and seeking guidance originating, the problem is solved with respect to essentially advanced capacities of unmanned aerial vehicles. The trajectory control algorithms for combined guidance system of unmanned aerial vehicles are proposed. They naturally combine command guidance in initiation and seeking guidance finally and don't restrict fundamentally the implementation.

## Введение

Применение в военном деле гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЗЛА) позволяет получить ряд тактических преимуществ [1]:

- значительное уменьшение подлетного времени к цели, а соответственно, и уменьшение лимита времени, которым располагает противоборствующая сторона на подготовку противодействия;
- необходимость наличия у противоборствующей стороны ЛА аналогичного класса, способные осуществлять перехват ГЗЛА;
- отсутствие у противоборствующей стороны эффективных методов наведения;
- ухудшение показателей обнаружения ГЗЛА радиолокационными обнаружителями [2] и увеличение ошибок сопровождения, а также его срыв в существующих измерителях, обусловленные интенсивными маневрами ГЗЛА.

В общем случае наведение на воздушные объекты выполняется в два этапа: дальнее (командное) наведение ЛА с пункта управления (ПУ), в частности, с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения (АК РЛДН) [3] с выводом ЛА на рубеж захвата цели, и ближнее наведение (самонаведение) с выводом ЛА на рубеж применения оружия.

К настоящему времени адекватные методы наведения на ГЗЛА и соответствующие системы информационного обеспечения отсутствуют. При этом существующие методы наведения на воздушные цели, основанные на использовании разновидностей метода пропорционального наведения, в основе которых лежат оценки угловой скорости линии визирования (УСЛВ), не пригодны для перехвата ГЗЛА из-за плохой управляемости на больших расстояниях, на которых УСЛВ практически равна нулю, а также из-за высокой скорости полета ГЗЛА и их маневренных возможностей, в связи с чем необходимо учитывать маневр цели.

Разновидности прямых методов не обеспечивают всеракурсный перехват. Кроме того, большинство существующих методов наведения оптимизированы для перехвата неманеврирующих целей, в то время как ГЗЛА могут иметь очень сложные траектории движения.

В открытой зарубежной и отечественной литературе имеются лишь отдельные публикации, не содержащие конкретных алгоритмов траекторного управления и их информационного обеспечения.

К перспективным методам наведения предъявляются следующие требования:

- всеракурсность наведения;
- максимальная дальность перехвата;
- минимальные расходы энергии, затрачиваемой на управление;
- минимальное время наведения;
- инвариантность к условиям применения (перехват в передней полусфере, задней полусфере, различные высоты и скорости применения, независимость от типа ЛА и т.д.);
- сопряжение методов командного и самонаведения, обеспечивающее переход из одного режима в другой в любой момент времени без существенных переходных процессов, как по траекторному управлению, так и по режимам работы бортовой радиолокационной станции (БРЛС), причем последнее означает возможность выдачи команды не только на формирование курса, но и на угол поворота антенны;
- практическая реализуемость по ограничениям на управление и состав датчиков.

Здесь следует особо отметить, что при переходе с дальнего наведения на ближнее всегда имеют место значительные переходные процессы, обусловленные применением различных методов наведения, которые в дальнейшем устраняются летчиком. В рамках перехвата гиперзвуковых целей, особенно с помощью беспилотных самолетов-истребителей [4], где все процессы довольно скоротечны, такие переходные процессы недопустимы. Поэтому проблема согласования этапов наведения является особо актуальной.

## 1 Синтез законов комбинированного наведения

Одним из возможных вариантов наведения, удовлетворяющим этим требованиям, является комбинированное наведение, при котором на начальном этапе осуществляется командное наведение путем передачи с ПУ на борт наводимого самолета значений требуемого курса $\Psi_T$, высоты и скорости, а также команд целеуказания БРЛС по направлению и дальности, а на конечном этапе – самонаведение ЛА путем формирования требуемого поперечного ускорения $j_T$. При этом в качестве источника информации при самонаведении используются БРЛС.

Для командного наведения эффективным является способ, разработанный на основе математического аппарата статистической теории оптимального управления с локальной оптимизацией [5], при котором закон формирования требуемых значений курса определяется рекуррентным соотношением

$$\Psi_T(k) = \Psi_T(k-1) + \frac{\Delta T}{V_C(k-1)}\left[\frac{q_\varphi}{k_j \hat{\dot{Д}}_{СЦ}(k-1)}\left(\varphi_T(k-1) - \hat{\varphi}(k-1)\right) + \frac{q_\omega}{k_j \hat{Д}_{СЦ}(k-1)}\hat{\omega}(k-1) + \hat{j}_Ц(k-1)\right], \quad (1)$$

а параметр рассогласования на борту наводимого ЛА – несоответствием

$$\Delta_\Psi(k) = \Psi_T(k) - \hat{\Psi}(k). \quad (2)$$

В (1), (2) $\Psi_T(k)$ и $\Psi_T(k-1)$ – требуемые значения курса в $k$-й и $(k-1)$-й моменты времени, отстоящие друг от друга на интервал $\Delta T$ передачи команд на борт наводимого самолета; $V_C$ – скорость полета наводимого самолета; $\varphi_T$ и $\hat{\varphi}$ – соответственно требуемое расчетное значение бортового пеленга и оценка его фактического текущего значения; $\hat{\omega}$ – оценка теку-

щего значения УСЛВ цели; $\hat{Д}_{СЦ}$ и $\hat{\dot{Д}}_{СЦ}$ – оценки расстояния между наводимым самолетом и целью и скорости его изменения; $q_\varphi$ и $q_\omega$ – коэффициенты штрафов в системе наведения за точность устранения ошибок по бортовому пеленгу и УСЛВ цели; $k_j$ – коэффициент штрафа за величину сигнала управления по боковой перегрузке, реализующего требуемый курс самолета; $\hat{j}_Ц$ – оценка поперечного ускорения цели; $\hat{\Psi}$ – оценка текущего значения курса наводимого самолета.

Анализ соотношений (1), (2) позволяет сделать следующие заключения.

1) Метод командного наведения (1) определяется соотношением, в котором второе и третье слагаемые представляют собой взвешенные ошибки наведения по бортовому пеленгу и УСЛВ цели, а четвертое слагаемое учитывает маневр цели. При этом переменные коэффициенты при этих слагаемых учитывают условия функционирования ( $Д_{СЦ}$ , $\dot{Д}_{СЦ}$ и $V_C$ ). Это предопределяет перераспределение управляющих воздействий от устранения ошибок по углу на больших дальностях на первоначальном участке наведения к устранению ошибок по УСЛВ цели на конечном участке, что обусловливает повышение точности наведения [5]

(3) $$h = \frac{Д_{СЦ}^2 \omega}{V_{сб}},$$

где $V_{сб} = -\dot{Д}_{СЦ}$ – скорость сближения наводимого самолета с целью.

2) Метод является всевысотным, поскольку управляющий сигнал рассогласования формируется не по разности требуемого и текущего положений рулей, эффективность которых зависит от высоты, а по разности курсов.
3) Метод является всеракурсным, поскольку для разных условий направление полета учитывается величиной и знаком второго и третьего слагаемых, а также знаком и величиной $\varphi_T$ и $j_Ц$ .
4) Метод инвариантен к условиям применения, в том числе к виду ЛА.
5) Предложенный закон наведения самолетов обеспечивает органичное сопряжение алгоритма командного наведения с последующим этапом самонаведения, для которого закон формирования требуемого поперечного ускорения задается формулой

(4) $$j_T(k) = \frac{q_\varphi}{k_j \hat{\dot{Д}}_{СЦ}(k)} \left(\varphi_T(k) - \hat{\varphi}(k)\right) + \frac{q_\omega}{k_j \hat{Д}_{СЦ}(k)} \hat{\omega}(k) + \hat{j}_Ц(k).$$

При этом параметр рассогласования может быть записан в виде

(5) $$\Delta_j(k) = j_T(k) - \hat{j}(k),$$

где $\hat{j}$ – текущее значение оценки поперечного ускорения наводимого самолета.

Сопряжение методов командного (1), (2) и самонаведения (4), (5) осуществляется за счет учета связи между производной требуемого курса и поперечным ускорением самолета:

(6) $$\dot{\Psi}_T = j_T / V_C,$$

а также за счет выдачи команд целеуказания БРЛС наводимого самолета по направлению и дальности. При этом может быть существенно сокращено время работы БРЛС на излучение, если она используется лишь для проведения коррекции и выдачи команд целеуказания средствам поражения.

6) Предложенный способ обеспечивает хорошее сопряжение с различными вариантами использования средств поражения, что позволяет еще больше повысить скрытность наведения за счет вывода самолета непосредственно в область применения оружия без включения его БРЛС.
7) Для реализации (1), (2) в состав информационно-вычислительной системы ПУ должны входить измерители (алгоритмы формирования оценок) дальности, составляющих скорости наводимого самолета и скорости сближения его с целью, бортовых пеленгов цели с наводимого самолета и УСЛВ, поперечных ускорений цели и наводимого самолета и его курса.

Очевидно, что на борту наводимого ЛА должны использоваться аналогичные измерители.

На основе результатов проведенного анализа следует отметить, что информационное обеспечение предложенного комбинированного наведения (1), (2), (4), (5) может быть осуществлено на основе существующих измерителей с учетом реальных ограничений на состав датчиков, объем памяти и быстродействие вычислителей, что свидетельствует о возможности практической реализации метода.

## 2 Исследование синтезированных законов комбинированного наведения

В работе исследовались этапы командного и самонаведения перехватчика на подвижную, в общем случае маневрирующую цель (ГЗЛА), находящуюся на достаточно большом удалении, в рамках удовлетворения предложенного метода наведения сформулированным требованиям. Исследование проводилось в процессе моделирования полета ГЗЛА и наводимого на него самолета при различных ракурсах перехвата вплоть до достижения дальности $Д_Р$ пуска ракеты.

В качестве показателей эффективности предложенного метода были выбраны:

- значение конечного промаха

$$(7) \quad h_к = \frac{Д^2_{СЦк}\omega_к}{V_{сбк}}$$

в конце наведения как показатель точности;

- время регулирования $t_{рег}$ как показатель быстродействия;
- затраты энергии управления, вычисляемые по формуле

$$(8) \quad P_C = \frac{1}{t_к}\int_0^{t_к} j_C^2(t)dt,$$

как показатель экономичности системы управления перехватчиком. Здесь $t_к$ – время окончания наведения.

Очевидно, что конечный промах (7), определяемый дальностью окончания наведения, УСЛВ и относительной скоростью, будет тем меньше, чем меньше $Д_{СЦк}$ и $\omega_к$.

Некоторые результаты исследования возможности всеракурсного перехвата цели представлены на рисунке 1, на котором изображен график траекторий полета цели и перехватчика для восьми вариантов значений курсов $\Psi_{Ц0}$ полета цели с постоянной скоростью:

а) $\Psi_{Ц0}=0^\circ$; б) $\Psi_{Ц0}=45^\circ$; в) $\Psi_{Ц0}=90^\circ$; г) $\Psi_{Ц0}=135^\circ$; д) $\Psi_{Ц0}=180^\circ$; е) $\Psi_{Ц0}=225^\circ$; ж) $\Psi_{Ц0}=270^\circ$; з) $\Psi_{Ц0}=315^\circ$.

На рисунке точками обозначены местоположения перехватчика (П) и цели (Ц) в моменты смены командного наведения на самонаведение, а парные буквы соответствуют вариантам значений курсов $\Psi_{Ц0}$ полета цели.

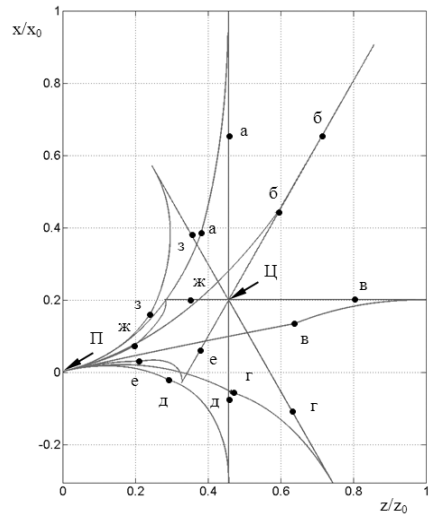



Рисунок 1 – Всеракурсное наведение перехватчика на цель

Анализ результатов исследования позволяет заключить, что метод обеспечивает всеракурсный перехват цели. При этом было установлено, что обеспечивается максимальная дальность наведения ЛА на цель.

На рисунках 2-4 представлены результаты исследования для варианта $\Psi_{Ц0}=315^{\circ}$ в виде графиков траекторий движения цели и перехватчика (рисунок 2), изменения со временем текущего промаха (рисунок 3) и текущих перегрузок (рисунок 4). Здесь точками обозначены моменты смены командного наведения на самонаведение.

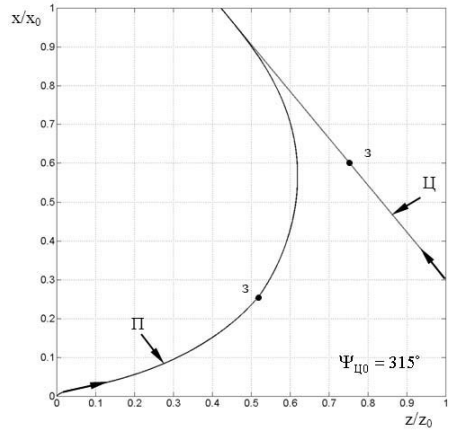



Рисунок 2 – Траектории относительного движения цели и перехватчика

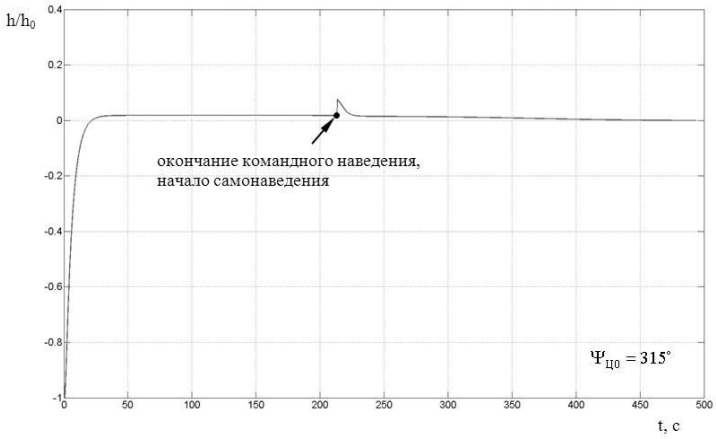



Рисунок 3 – Относительный текущий промах перехватчика

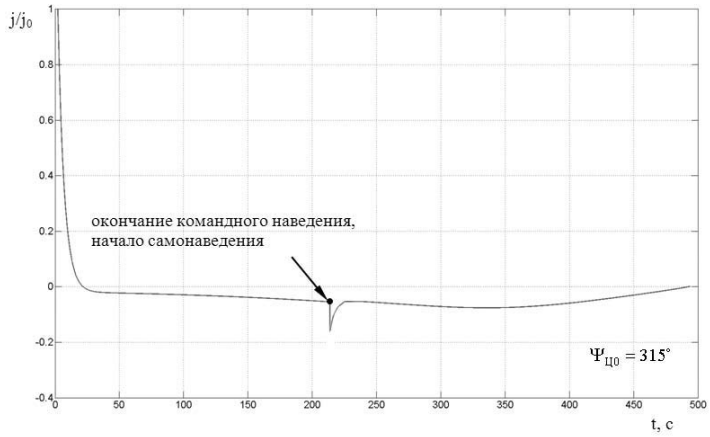



Рисунок 4 – Относительный текущие ускорения перехватчика

Анализ результатов исследования позволяет заключить, что предложенное комбинированное наведение обеспечивает хорошее сопряжение командного и самонаведения не только по режимам работы БРЛС, но и в процессе траекторного управления, реализуя переход из одного режима в другой без существенных переходных процессов за счет малого времени и величины переходных процессов. При этом стоит отметить практическую реализуемость наведения, что связано с соблюдением ограничений на управление.

На рисунках 5-7 представлены результаты исследования для варианта маневрирования цели с $j_Ц$ =25 м/с$^2$ в виде графиков траекторий движения цели и перехватчика (рисунок 5), изменения со временем текущего промаха (рисунок 6) и текущих перегрузок (рисунок 7).

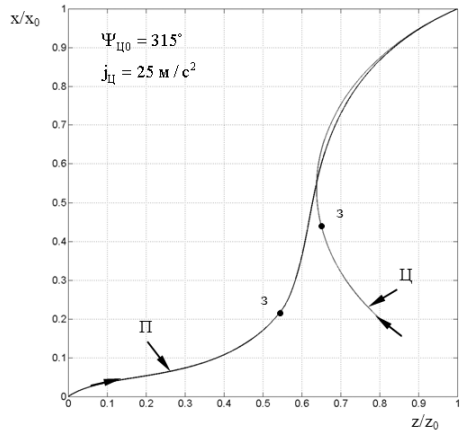



Рисунок 5 – Траектория относительного движения цели и перехватчика

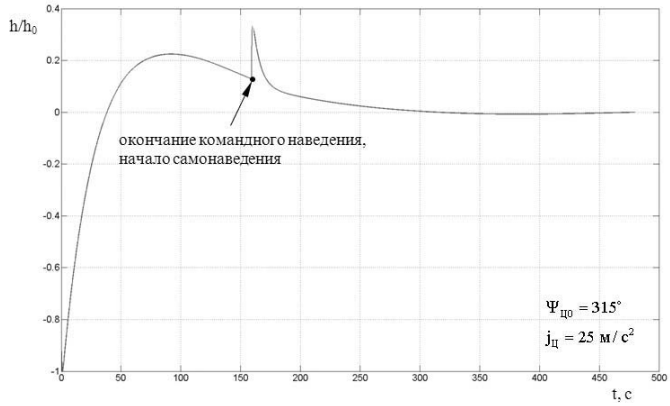



Рисунок 6 – Относительный текущий промах перехватчика

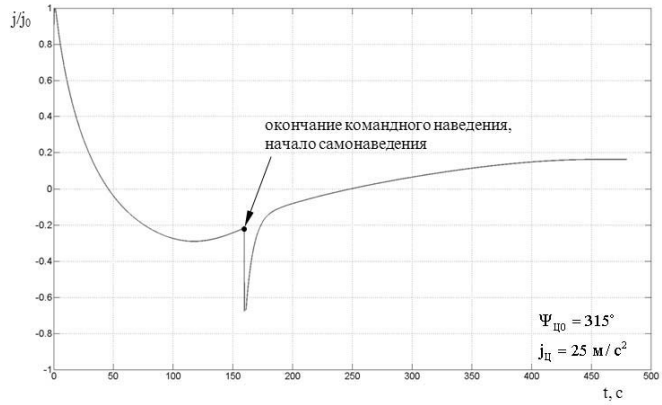



Рисунок 7 – Относительный текущий промах перехватчика

Проведенные исследования подтвердили возможность всеракурсного высокоточного перехвата ГЗЛА даже при его постоянном маневрировании. При этом вид траектории перехвата, а соответственно и затраты энергии на управление перехватчиком, зависят от соотношения его

скорости и скорости ГЗЛА и вида маневра последнего. Кроме того, затраты энергии на управление перехватчиком снижаются при увеличении его скорости по отношению к скорости ГЗЛА.

### 3 Анализ полученных результатов

Анализ результатов проведенных исследований позволяет заключить, что предложенный метод комбинированного наведения:

1) является универсальным, обеспечивая возможность всеракурсного перехвата воздушных целей, в том числе и маневрирующих, на больших дальностях в различных условиях применения;
2) достаточно эффективно решает проблему согласования методов дальнего и ближнего наведения. При этом наилучшее согласование может быть достигнуто за счет изменения коэффициентов усиления для полного устранения переходных процессов;
3) позволяет применять на этапе командного наведения стандартный набор команд по курсу, высоте и скорости, используемый в существующих командных радиолиниях управления [3, 6].

### Заключение

Результаты проведенных исследований предложенного алгоритма комбинированного наведения позволили убедиться в обеспечении изложенных выше требований к перспективным методам наведения.

В заключение следует отметить, что предложенный метод комбинированного наведения не накладывает принципиальных ограничений на возможность его практической реализации по ограничениям на управление, по составу датчиков и по быстродействию и объему памяти вычислителей.

### Список литературы


[1] Меркулов В.И., Дрогалин В.В., Канащенков А.И. и др. Авиационные системы радиоуправления. Т.2. Радиоэлектронные системы самонаведения. / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова – М.: Радиотехника, 2003.

[2] Меркулов В.И., Ильчук А.Р., Юрчик И.А. Особенности обнаружения сигналов в бортовых РЛС при наблюдении интенсивно маневрирующих целей. // Радиотехника, 2002. – №8.

[3] Верба В.С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Состояние и тенденции развития. – М.: Радиотехника, 2008.

[4] Хрипунов С.П., Макаров А.В. Беспилотные истребители в воздушном бою. // Аэрокосмическое обозрение, 2003. – №6.

[5] Меркулов В.И., Дрогалин В.В., Канащенков А.И. и др. Авиационные системы радиоуправления. Т.1. Принципы построения систем радиоуправления. Основы синтеза и анализа. / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова – М.: Радиотехника, 2003.

[6] Меркулов В.И., Чернов В.С., Дрогалин В.В. и др. Авиационные системы радиоуправления. Т.3. Системы командного радиоуправления. Автономные и комбинированные системы наведения. / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2004.

# ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНО-ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛА

**И.О. Петров, А.А. Чуприков**

Санкт-Петербургский Университет аэрокосмического приборостроения
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, Россия
petrovigor63@mail.ru
тел: +7 (812) 494-70-43, факс: +7 (812) 710-65-10

***Ключевые слова**: оптимальное распределение масс ЛА, оптимальное оперативное управление, энергетическая теория, скорость изменения кинетической энергии, мощность поверхностных сил.*

**Abstract**
Considered non-traditional approach to determining optimal design - dynamic parameters and adaptive operational programs aircraft movement based on energy theory of synergetic maneuver.

## Введение

Как известно, создание ЛА непосредственно связано с проектированием, состоящим из двух последовательно связанных составляющих: конструктивной и динамической частей. В предлагаемом докладе рассмотрен нетрадиционный подход к решению этих проблем, разрабатываемых в течение сорока лет и проходящих совершенствование и обобщение до настоящего времени.

## Конструктивно-динамическая оптимизация параметров ЛА

В самом общем виде постановку задачи исследования маневрирования ЛА можно записать в следующем виде:

(1) $\max\limits_{\bar{u},\bar{A},f\in M} J$,

где

$$M=\begin{Bmatrix}\bar{u},\bar{A},f/(\tau<t_{выв}),(\bar{z}=K),(q_n\in\Delta),(Q_T\in\Pi),(t^0\in T^0),\\(\bar{n}\in N),(\Delta\bar{x}_к\in\varepsilon),(S(\bar{x}_0,t_0,\bar{x}_к,t_к)=D)\end{Bmatrix},$$

$J$ - функционал, характеризующий качество выполнения целевой задачи;

$f$ - математическая модель движения ЛА;

$\tau$ - время (оперативность) решения задачи управления на БЦВМ;

$\bar{u},\bar{A}$ - допустимые вектора структуры управления и параметров управления;

$\bar{z}=\left[m_{кон_i},m_{дв_i},P_i,P_{рд_{ij}},m_{сек_i},W_{эф_i},I,\bar{K}_{кон},\bar{G}_c,\bar{G},c_{x_i},c_{y_i},S_{M_i}\right]$ - вектор конструктивно-технических параметров;

$I=I(t)$ - тензор инерции ЛА;

$\bar{K}_{кон}$ - вектор параметров конструкции ЛА;

$\bar{G}_c$ - вектор структур и конфигураций систем управления и стабилизации ЛА;

$\overline{G}$ - вектор параметров систем управления и стабилизации ЛА;

$\overline{n}, \Delta\overline{x}_к$ - вектора перегрузок и точности на правом конце траектории;

$q_n, Q_T, t^0$ - удельный тепловой поток, количество тепла и температура конструкции;

$S(\overline{x}_0, t_0, \overline{x}_к, t_к)$ - граничные условия.

Конструктивно-динамическую задачу (1) целесообразно разделить на две подзадачи: конструктивную задачу и динамическую задачу.

Конструктивная задача. Задача исследования конструктивной части в математической постановке сводится к поиску экстремума условного функционала, который должен удовлетворять дифференциальным связям, граничным условиям и ограничениям:

$$(2) \qquad \max_{\overline{u}, A, f \in M} J, \quad \text{где } J = \frac{m_{ПН}}{m_{0_1}} = \frac{m_{0_2}}{m_{0_1}} \cdot \frac{m_{0_3}}{m_{0_2}} \cdots \frac{m_{0_{i+1}}}{m_{0_i}} \cdots \frac{m_{0_N}}{m_{0_{N-1}}} \cdot \frac{m_{ПН}}{m_{0_N}},$$

или в другой записи:

$$(3) \qquad J = \prod_{i=1}^{N} \left[ \mu_{k_i} (1 + b_i) - \varphi_{0_i} a_i - b_i \right],$$

где $\mu_{k_i} = \dfrac{m_{k_i}}{m_{0_i}}$ - относительная конечная масса $i$-той ступени, $a_i = \dfrac{m_{дв_i} \cdot g_0}{P_i}$ - удельный вес двигательной установки $i$-той ступени, $b_i = \dfrac{m_{кон_i}}{m_{T_i}}$ - удельный вес конструкции и топливных баков $i$-той ступени, $\varphi_{0_i} = \dfrac{P_i}{m_{сек_i} \cdot g_0}$ - стартовая тяговооруженность $i$-той ступени, $N$ - число ступеней средства выведения.

Заменяя на первом этапе дифференциальные связи формулой К.Э. Циолковского и вводя новые положительные константы в виде

$$(4) \qquad c_i = 1 + b_i, \quad d_i = \varphi_{0_i} a_i + b_i,$$

запишем безусловный функционал окончательно следующим образом:

$$(5) \qquad J = \left( c_1 e^{-q} - d_1 \right) \prod_{i=2}^{N} \left[ c_i \mu_{k_i} - d_i \right],$$

где $q = \dfrac{1}{W_1} \left( V_k + \sum_{i=2}^{N} W_i \ln \mu_{k_i} \right)$ заменяет решение динамической части задачи.

$W_i$ - эффективная скорость истечения газов из двигательной установки $i$-той ступени.

Нетрадиционность подхода состоит в использовании необходимого условия максимума функционала (5):

$$(6) \qquad \begin{aligned} &\frac{\partial J}{\partial \mu_{k_i}} = \frac{c_1 e^{-q}}{W_1} \cdot \left( \mu_{k_i} - \frac{d_i}{c_i} \right)^{-1} \cdot \prod_{i=2}^{N} \left( c_i \mu_{k_i} - d_i \right) \left( -W_i + \frac{d_i W_i}{c_i \mu_{k_i}} + W_1 - \frac{d_1 W_1}{c_1 \mu_{k_1}} \right) = \\ &i \cdot \left( W_1 - W_i + \frac{\beta_i}{\mu_{k_i}} - \frac{\beta_1}{\mu_{k_1}} \right) = 0, \qquad i = 2, \ldots, N, \qquad \beta_i = \frac{d_i W_i}{c_i}. \end{aligned}$$

Из (6) следует, что в точке, где выполняется необходимое условие, все $\mu_{k_i}$ связаны однозначно с $\mu_{k_1}$, поэтому функционал (5) также можно представить в этой точке в виде функции одной переменной $\mu_{k_1}$:

$$J = \prod_{i=1}^{N} \left[ \frac{c_i \beta_i}{\left( \frac{\beta_1}{\mu_{k_1}} + W_i - W_1 \right)} - d_i \right],$$

а достаточное условие можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial^2 J}{\partial \mu_{k_i}^2} = -c_i \cdot \left( \frac{\beta_1}{\mu_{k_1}} + W_i - W_1 \right)^2 \Big/ \beta_i < 0 .$$

Из изложенного ясно, что максимум исследуемого функционала существует и является единственным и глобальным.

Заметим, что дифференциальную связь в виде формулы К.Э.Циолковского для точки, где выполняется необходимое и достаточное условие максимума, можно записать в виде:

$$V_k = -\sum_{i=1}^{N} W_i \ln \left[ \beta_i \Big/ \left( \frac{\beta_i}{\mu_{k_i}} + W_i - W_1 \right) \right].$$

Из анализа формулы (3) видно, что при решении конструктивной задачи оптимизируются технические показатели ЛА, связанные с силовой конструкцией и двигателями ЛА.

При этом масса потребного запаса топлива на маневр зависит от оптимального решения динамической задачи.

Динамическая задача. Решение динамической задачи маневра ЛА состоит в выборе оптимальной программы движения ЛА и по сложившейся традиции базируется на применении принципа максимума Л.С.Понтрягина. При этом вектор сопряженных переменных в «гамильтониане» не выражается в явном виде, что скрывает его физическую сущность, вводя в заблуждение исследователей. Так, например, традиционно «гамильтониан» записывается в виде:

$$H = \bar{f} \cdot \bar{p} = \sum_{i=1}^{n} f_i p_i,$$

где $\bar{f}$ и $\bar{p}$ - вектора ускорения ЛА и импульса соответственно в неявном виде.

Если подойти к этому с физической точки зрения, то нужно признать, что

$$H = \bar{a}_{пов} \cdot m\bar{V}_a = \bar{R}_{пов} \cdot \bar{V}_a = N,$$

где $\bar{a}$ и $m\bar{V}_a$ - вектора ускорения ЛА и импульса соответственно в явном виде.

Но при таком подходе очевидно, что «гамильтониан» это не энергия, как трактуется в теоретической механике, а мощность поверхностных сил, действующих на ЛА. Этот факт является серьезным, но далеко не единственным заблуждением.

Для убедительности рассмотрим еще один обобщенный подход [1], который позволит выявить очевидную связь энергетического и вариационного принципов. Рассмотрим более подробно скорость изменения полной механической энергии:

$$\dot{E}_a = \frac{d}{dt}\left[\frac{m\bar{V}_a^2}{2} - m\frac{\pi_0}{\bar{r}}\right] = m\bar{V}_a\dot{\bar{V}}_a + m\frac{\pi_0}{\bar{r}^2}\dot{\bar{r}} + \left(\frac{V_a^2}{2} - \frac{\pi_0}{r}\right)\dot{m} =$$

$$= mV_x\dot{V}_x + mV_y\dot{V}_y + mV_z\dot{V}_z + mg_x\dot{x} + mg_y\dot{y} + mg_z\dot{z} + \left(\frac{V_a^2}{2} - \frac{\pi_0}{r}\right)\dot{m} = \bar{p}\cdot\bar{f} = \sum_{i=1}^{7} f_i p_i,$$

где $\bar{p} = \left[mV_x, mV_y, mV_z, mg_x, mg_y, mg_z, \left(\frac{V_a^2}{2} - \frac{\pi_0}{r}\right)\right]^T$ - сопряженный вектор (импульсов) в абсолютном движении;

$\bar{f} = \left[\dot{V}_x, \dot{V}_y, \dot{V}_z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{m}\right]^T$ - вектор левых частей системы дифференциальных уравнений абсолютного движения ЛА в декартовой системе координат.

Из изложенного видно, что сопряженная система дифференциальных уравнений отсутствует со всеми ее проблемами, а сам сопряженный вектор получен в квадратурах в явном виде через фазовые координаты ЛА, известные в каждой точке траектории.

Из анализа формул для скорости изменения полной механической энергии ЛА в относительном движении и формул для скорости изменения полной механической энергии ЛА в абсолютном движении видно, что сумма слагаемых в этих выражениях, оказавшаяся равной нулю, а именно $\bar{G}\cdot\bar{V} + m\frac{\pi_0}{r^2}\dot{r} = 0$, представляет собой, в отличии от известного интеграла энергии, дифференциал энергии, где первое слагаемое характеризует мощность потенциальной силы притяжения (скорость изменения кинетической энергии), а второе слагаемое – изменение потенциальной энергии поля, образующего эту силу. Это наглядно характеризует изменение кинетической энергии за счет изменения потенциальной энергии ЛА при движении его в потенциальном поле, то есть при отсутствии всех поверхностных сил. Таким образом, функция (физический аналог «гамильтониана»), которую нужно исследовать на экстремум для поиска оптимального управления, имеет вид:

$$N = \bar{p}\cdot\bar{f}_{пов} = mV_x\dot{V}_{пов_x} + mV_y\dot{V}_{пов_y} + mV_z\dot{V}_{пов_z} + \left(\frac{V_a^2}{2} - \frac{\pi_0}{r}\right)\dot{m},$$

где $\bar{p} = \left[mV_x, mV_y, mV_z, \left(\frac{V_a^2}{2} - \frac{\pi_0}{r}\right)\right]^T$ - сопряженный вектор (импульсов);

$\bar{f}_{пов} = \left[\dot{V}_{пов_x}, \dot{V}_{пов_y}, \dot{V}_{пов_z}, \dot{m}\right]^T$; $\quad \bar{a}_{пов} = \left[\dot{V}_{пов_x}, \dot{V}_{пов_y}, \dot{V}_{пов_z}\right]^T$;

$\bar{a}_{пов}$ - вектор кажущегося абсолютного ускорения ЛА.

Полученный результат привел к существенному сокращению размерности векторов $\bar{p}$ и $\bar{f}_{пов}$. Это физически подтверждает факт, что управлять гравитационной составляющей мы еще не научились, а поэтому искусственно включать ее в расчет, как это делается в «гамильтониане», не имеет никакого смысла.

Таким образом, отыскивать оптимальное управление представляется возможным только за счет поверхностных сил, или, иначе говоря, за счет управления вектором кажущегося ускорения.

Во вращающейся системе отсчета, которая содержит минимальное количество проекций вектора абсолютной скорости, максимизируемая функция мощности еще более упрощается:

$$N = \bar{p} \cdot \bar{f}_{пов} = mV_r\dot{V}_{пов_r} + mV_\tau\dot{V}_{пов_\tau} + \left(\frac{V_a^2}{2} - \frac{\pi_0}{r}\right)\dot{m},$$

где $\bar{p} = \left[mV_r, mV_\tau, \left(\frac{V_a^2}{2} - \frac{\pi_0}{r}\right)\right]^T$ - сопряженный вектор (импульсов) во вращающейся системе отсчета;

$\bar{f}_{пов} = \left[\dot{V}_{пов_r}, \dot{V}_{пов_\tau}, \dot{m}\right]^T$; $\quad \bar{a}_{пов} = \left[\dot{V}_{пов_r}, \dot{V}_{пов_\tau}\right]^T$;

$\bar{a}_{пов}$ - вектор кажущегося абсолютного ускорения ЛА;

$\dot{V}_{пов_r}, \dot{V}_{пов_\tau}$ - радиальная и трансверсальная составляющие абсолютного ускорения.

Оптимальное оперативное автономное адаптивное управление движением ЛА определяется путем исследования на экстремум скорости изменения полной механической энергии ЛА по управлению $\bar{u}$ .

Для определения структуры оптимального управления надо исследовать $\dot{E}_r$ и $\dot{E}_a$ на экстремум по координатам вектора управления $\bar{u} = \left[u_1, u_2, ...u_n\right]^T$ , то есть решить систему уравнений:

$$(7) \quad \frac{\partial \dot{E}}{\partial \bar{u}} = 0 \quad .$$

Данная система (7) равносильна системе уравнений:

$$(8) \quad \frac{\partial\left(\bar{R}_{пов} \cdot \bar{V}\right)}{\partial \bar{u}} = \frac{\partial N}{\partial \bar{u}} = \frac{\partial}{\partial \bar{u}}\left(\bar{p} \cdot \bar{f}_{пов}\right) = \bar{p} \cdot \frac{\partial \bar{f}_{пов}}{\partial \bar{u}} = \bar{0},$$

где под $\bar{V}$ понимается либо вектор абсолютной скорости $\bar{V}_a$ , либо вектор воздушной скорости $\bar{V}_в$ в зависимости от того, какое движение рассматривается.

В скалярном виде систему (8) можно записать следующим образом:

$$(9) \quad \begin{cases} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} p_1 + \cdots + \frac{\partial f_n}{\partial u_1} p_n = 0 \\ \cdots \\ \frac{\partial f_1}{\partial u_m} p_1 + \cdots + \frac{\partial f_n}{\partial u_m} p_n = 0 \end{cases},$$

где $\bar{u}$ - вектор управления размерности $m$, координатами которого могут быть, например, углы тангажа, крена, рыскания, атаки, стреловидности, скоростного угла крена, полного угла атаки, установки двигателя, изменения его ориентации и т.п.

Условия (9) позволяют непосредственно определять структуру оптимального оперативного адаптивного управления при любой размерности вектора управления $\bar{u} = \left[u_1, u_2, ...u_n\right]^T$ без решения вариационной задачи с использованием принципа максимума Л.С. Понтрягина.

В качестве вектора управления примем вектор управления движением центра масс ЛА в виде $\bar{u} = \left[\kappa, \gamma, u_\partial\right]^T$ , где $\kappa$ - полный угол атаки, отсчитываемый от вектора воздушной скорости $\bar{V}_в$, $\gamma$ - скоростной угол крена, отсчитываемый от вертикальной плоскости относительно-

го движения ЛА, $u_\partial$ - угол установки двигателей на ЛА, отсчитываемый от оси $Ox_1$ связанной системы отсчета.

При управлении ЛА по скоростному углу крена $\gamma$, полному углу атаки $\kappa$ и углу установки двигателей $u_\partial$ получим:

$$\mathrm{tg}\gamma = \frac{-r\omega_z \sin(\eta_r - \eta)}{r\omega_z \sin\theta_r \cos(\eta_r - \eta) - V_r \cos\theta_r}, \qquad u_\partial = \mathrm{arctg}\left(-\frac{N2}{N1}\right) - \kappa,$$

$$\kappa = -\frac{k_{Q_2} \cdot N1 + k_{Y_2} \cdot N2}{2\left(k_{Q_1} \cdot N1 + k_{Y_1} \cdot N2\right)}.$$

где

$$N1 = -V_r \sin\theta_r - r\omega_z \cos\theta_r \cos(\eta_r - \eta),$$

$$N2 = V_r \cos\gamma \cos\theta_r - r\omega_z \left[\cos\gamma \sin\theta_r \cos(\eta_r - \eta) - \sin\gamma \sin(\eta_r - \eta)\right],$$

$$c_x = k_{Q_1}\kappa^2 + k_{Q_2}\kappa + k_{Q_3}, \quad c_y = k_{Y_1}\kappa^2 + k_{Y_2}\kappa + k_{Y_3}$$

$c_x, c_y$ - аэродинамические коэффициенты; $\omega_z$ - угловая скорость вращения вращающейся системы отсчета; $\eta_r, \eta$ - курсовые углы воздушной и абсолютной скоростей.

**Заключение**

Предложен нетрадиционный подход к решению задачи оптимизации конструктивно-динамических параметров ЛА, который позволяет решать широкий круг проблем баллистического проектирования ЛА. Кроме этого предложенные методы позволяют практически реализовать синергетическое маневрирование в атмосфере.

Полученная структура управления позволяет решать краевые задачи динамики синергетического маневрирования и задачи прогноза на борту ЛА с требуемой точностью и со значительным опережением времени маневра, что актуально при реализации терминального наведения в условиях действия возмущающих факторов, при возникновении нештатных ситуаций и изменении граничных условий в процессе реализации маневра.

Таким образом, разработаны новые методы решения конструктивной задачи и определения оперативного оптимального автономного управления.

**Список литературы**

[1] Насонов В.П. Нетрадиционный подход к решению традиционных задач динамики полета ракетносителей. -СПб:ВИКИ имени А.Ф.Можайского. – 1992.- 64 с.

# ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ САМОЛЕТАМИ В УСЛОВИЯХ АГРЕССИВНЫХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

**А.М. Касимов, Э.М. Мамедли, Л.И. Мельников**

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
117997, ГСП-8, В-342, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, Россия
kasimov@ipu.ru
тел: +7 (495) 334-91-00

***Ключевые слова:*** *разнородная система, резервный канал, принципы построения, требования к характеристикам*

**Abstract**

Questions of construction of a diverse control system are considered by the planes containing the basic electronic channel and the reserve channel on the basis of elements of the fluidics. Principles of construction and the organisation of interaction of channels of the diverse system providing a continuity of control with set quality in the conditions of external influences are developed. The technique of definition of requirements to characteristics of the calculator of the reserve channel, providing the set quality of control is offered, the example is resulted.

## Введение

Системы управления (СУ) летательными аппаратами (ЛА) должны обеспечивать свою работоспособность в сложных реальных условиях, в том числе при наличии электромагнитных и радиационных излучений, разрядов молний и других дестабилизирующих факторов (ДФ). В современных самолетах различных типов для передачи управляющих сигналов к приводам поверхностей управления используется электродистанционная (ЭДСУ) система, где управление от летчика и обратные связи реализуются передачей электрических сигналов [1]. ЭДСУ относится к особой категории функционально значимых систем, основной проблемой для которой является обеспечение высокой надежности. В ЭДСУ не допускаются даже кратковременные перерывы в питании. Следует отметить подверженность ЭДСУ влиянию электромагнитных и радиационных излучений. Для обеспечения непрерывности управления в момент проявления внешнего воздействия может быть использован дополнительный (резервный) канал СУ неэлектрической природы, на работоспособность которого не влияют ДФ. Одним из вариантов обеспечения надежности управления и безопасности полета современными самолетами с ЭДСУ при воздействии ДФ является использование разнородной СУ, включающей наряду с основным электронным каналом резервный канал на базе цифровых и аналоговых элементов струйной техники [2].

Струйные элементы и системы обладают рядом достоинств, обусловливающих целесообразность их использования в разнородных СУ. К их числу относятся: нечувствительность к электромагнитному излучению, интенсивной радиации, ударным нагрузкам и вибрациям; работоспособность в широком диапазоне температур; высокая надежность, обусловленная отсутствием подвижных частей; низкая стоимость изготовления и эксплуатации; отсутствие электромагнитных помех для бортовой аппаратуры. Вместе с тем, следует отметить, что струйные элементы обладают существенно более низким быстродействием в сравнении с электронными. Поэтому, с одной стороны, возникает необходимость поиска путей повышения быстродействия струйных элементов до некоторого реализуемого предела, а с другой – исследования возможности построения резервного канала, обеспечивающего решение задач управления ЛА в реальном масштабе времени и с заданным качеством [2].

Настоящая работа посвящена принципам построения разнородной СУ самолетами, определению требований к характеристикам струйного резервного канала, обеспечивающим заданное качество управления.

## 1 Разработка принципов построения разнородной СУ

При построении разнородной СУ необходимо разработать структуру системы и организовать взаимодействие между основным и резервным каналами таким образом, чтобы обеспечить непрерывность управления при различных состояниях СУ вследствие воздействия ДФ.

Структура разнородной СУ может быть представлена следующим образом (рис.1).

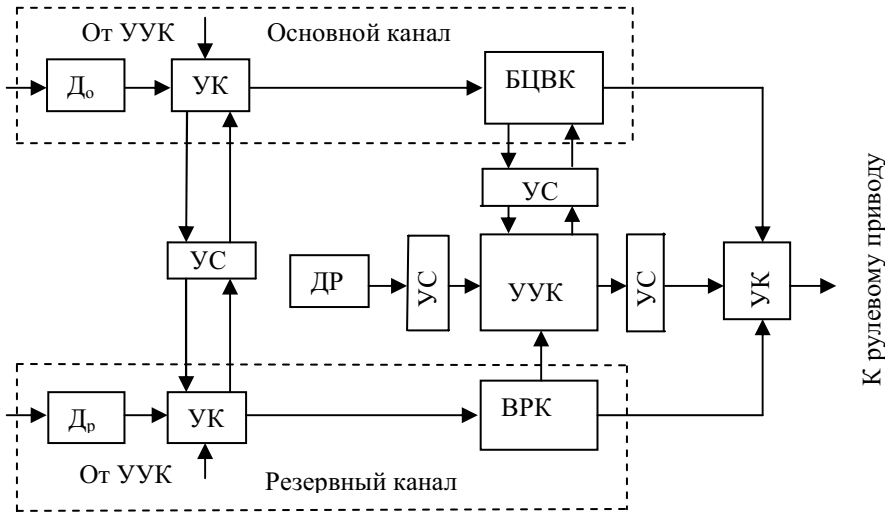



Рисунок 1 - Структурная схема разнородной СУ

Основными элементами системы являются два канала различной природы: основной (электронный) и резервный (струйный). Основной канал включает в себя БЦВК, датчики ($Д_о$) и внутриканальные связи между ними. Резервный канал – вычислитель резервного канала (ВРК), датчики ($Д_р$) и внутриканальные связи. Основной канал может использовать аппаратурную и программную избыточность. Оба канала должны работать параллельно, реализуя в БЦВК и ВРК идентичные алгоритмы управления. Для регистрации критических уровней ДФ, вызывающих сбои или необратимые отказы электронной аппаратуры, должны использоваться специальные датчики регистрации (ДР). В состав системы должны входить устройства сопряжения (УС) между электронными и струйными элементами системы, коммутации (УК), управления конфигурацией (УУК), межканальные связи. В рабочем режиме основной канал включен в контур управления, а резервный - нет. В момент проявления внешних ДФ система переходит в аварийный режим - на резервный канал управления. По окончании действия внешних ДФ осуществляется проверка работоспособности БЦВК и датчиков, в соответствии с состоянием системы в контур управления включается работоспособная конфигурация СУ.

Состояние СУ зависит от условий функционирования ЛА и определяется состоянием измерительной и вычислительной систем. В силу устойчивости струйных элементов к действию ДФ неисправности струйных датчиков и ВРК не рассматриваются. Множество возможных состояний основного канала разнородной СУ содержит следующие состояния:

- БЦВК и датчики работоспособны;
- БЦВК работоспособен, датчики неработоспособны;
- БЦВК неработоспособен, датчики работоспособны;
- БЦВК и датчики неработоспособны.

Признаки принадлежности к тому или иному состоянию могут формироваться по информации от датчиков, регистрирующих критические уровни ДФ, вызывающие сбои или необратимые отказы аппаратуры; по результатам анализа текущей информации, получаемой в процессе функционирования СУ, и по информации тестового контроля аппаратуры [3]. Наиболее приоритетными признаками состояния элементов СУ являются признаки, формируемые по сигналам датчиков регистрации ДФ.

Задача организации взаимодействия основного и резервного каналов, обеспечивающей нормальное функционирование СУ, сводится к задаче управления конфигурацией СУ в соответствии с ее состоянием. Изменение конфигурации системы в соответствии с изменением состояния СУ может быть реализовано с помощью специального устройства управления конфигурацией. Очевидно, что данное устройство должно сохранять свою работоспособность независимо от действия ДФ, поэтому для его реализации целесообразно применить струйную элементную базу. УУК должно обеспечивать анализ состояния СУ, формирование команды на изменение конфигурации системы. Для выполнения этих функций в состав УУК входят (рис.2): блок определения признака состояния СУ (1), блок формирования управляющей команды (2).

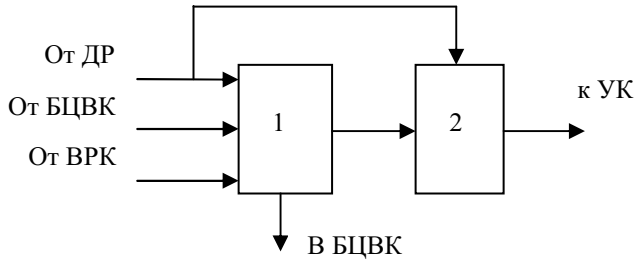



Рисунок 2 - Структурная схема УУК

УУК функционирует следующим образом. В момент проявления критических уровней ДФ управляющая команда на включение в контур управления резервного канала формируется непосредственно по сигналу ДР. По окончании действия внешних ДФ подается команда от блока определения признака состояния СУ на проверку работоспособности БЦВК и датчиков основного канала. По результатам анализа текущей информации измерительной системы и информации систем тестового контроля БЦВК, сравнения с соответствующими данными резервного канала в блоке (1) формируется признак состояния системы. В блоке формирования управляющей команды, в соответствии с полученным признаком состояния СУ, формируется команда на изменение конфигурации системы. В устройства коммутации поступает сигнал на включение в контур управления работоспособной конфигурации.

В зависимости от состояния системы могут быть сформированы следующие варианты работоспособных конфигураций:

- БЦВК и датчики основного канала;
- БЦВК и датчики резервного канала;
- ВРК и датчики основного канала;
- ВРК и датчики резервного канала.

## 2 Определение требований к характеристикам ВРК

Резервный канал на струйных элементах должен обеспечивать устойчивость, заданные статические и динамические характеристики управляемости на всех режимах полета при действии внешних ДФ и при отказе элементов основного канала в результате собственных неисправностей. При построении резервного канала необходимо учитывать реальные возможности аналоговых и цифровых элементов струйной техники. Аналоговые элементы отличаются малыми массой и габаритами, высоким быстродействием, но меньшей точностью. При использовании цифровых струйных элементов с более высокой точностью обработки сигналов необходимо учитывать их реальное быстродействие. Требования к резервному каналу по качеству управления могут быть определены в соответствии с принятыми в военной авиации приемлемыми с точки зрения безопасности полета уровнями пилотажных характеристик – Ур.1, Ур.2, Ур.3 в зависимости от режимов полета (основной, эксплуатационный и предельный) и состояния системы (нормальное или с отказами) [1]. Уровни пилотажных характеристик характеризуют качество выполнения требований к устойчивости и управляемости самолетов на различных этапах полета:

*уровень 1* – характеристики устойчивости и управляемости самолетов хорошо соответствуют рассматриваемому этапу полета и пилотажные характеристики самолета оцениваются летчиком по высшему баллу;

*уровень 2* - характеристики устойчивости и управляемости обеспечивают выполнение задач данного этапа полета при некотором снижении оценки выполнения задачи и при удовлетворительной оценке пилотажных характеристик;

*уровень 3* - характеристики устойчивости и управляемости не обеспечивают эффективного выполнения задачи на данном этапе полета или его выполнение требует от летчика чрезмерной нагрузки при пилотировании. Оценка пилотажных характеристик летчиком лежит в этом случае на грани допустимого.

Наличие трех уровней оценки пилотажных характеристик позволяет рассматривать при построении резервного канала варианты заданных требований с различным качеством.

Для решения вопросов практической реализуемости струйного резервного канала необходимо определить требования к характеристикам его элементов, обеспечивающим заданное качество управления. Важным этапом при проектировании резервного канала является реализация ВРК, являющегося центральным звеном системы. Возможность практической реализации ВРК связана с типом используемых средств струйной техники и их основными характеристиками. Реализуемые алгоритмы и характеристики элементов ВРК взаимосвязаны. С одной стороны, алгоритмы предъявляют определенные требования к быстродействию и другим характеристикам элементов струйной техники. С другой стороны, особенности ВРК на струйных элементах налагают определенные ограничения на организацию вычислений и реализацию алгоритмов. Отметим, что усложнение алгоритмов управления на БЦВМ приводит лишь к усложнению ее программы, в то время как аналогичное усложнение алгоритмов на базе струйной техники неизбежно требует увеличения числа функциональных элементов.

Для определения требований к основным характеристикам элементов структуры ВРК необходимо построить математическую модель реализуемых на нем алгоритмов, обеспечивающих заданные запасы устойчивости, статические и динамические характеристики управляемости. Математическая модель должна отражать структуру алгоритмов, функциональные связи между отдельными их элементами. В соответствии с целями моделирования уровень детализации моделируемых алгоритмов должен соответствовать уровню элементарных функций, реализуемых средствами струйной техники. Анализ модели реализуемых на ВРК алгоритмов позволяет определить тип и количество необходимых для построения вычислителя струйных элементов, требования к характеристикам элементов ВРК, обеспечивающим заданное качество управления.

Применение цифровых струйных элементов обусловливает дискретный характер процессов в резервном канале. Определение требований к характеристикам цифрового ВРК включает в себя оценку потребного быстродействия, разрядности его элементов, емкости запоминающих устройств. Величину требуемого быстродействия элементов можно оценить по количеству операций, выполняемых в каждом цикле управления. Разрядность элементов определяется требуемой точностью решения задачи управления, разрядностью входных преобразователей. Потребный объем памяти определяется числом устройств, необходимых для хранения постоянных коэффициентов и промежуточных результатов вычислений. Требования к характеристикам элементов ВРК, полученные при анализе алгоритма, являются исходной информацией для проверки реализуемости выбранного варианта построения вычислителя.

*Пример.* В качестве примера рассмотрим определение требований к характеристикам ВРК СУ маневренного самолета как твердого тела в продольной плоскости. Рассматривается вариант построения вычислителя с использованием аналоговых струйных элементов.

Структурная схема непрерывного алгоритма ВРК приведена на рис. 2, где $x_в$ – отклонение ручки управления; $u$ – управляющее воздействие, $n_y$, $\omega_z$ – нормальная перегрузка и угловая скорость тангажа; $k_x$, $k_n$, $k_\omega$ - постоянные коэффициенты, $D_x(s)$, $D_n(s)$, $D_s(s)$ – передаточные функции, которые имеют вид:

$$D_x(s)=\frac{1}{T_x s+1},\quad D_n(s)=\frac{1}{T_n s+1},\ D_s(s)=\frac{k_s}{s}.$$

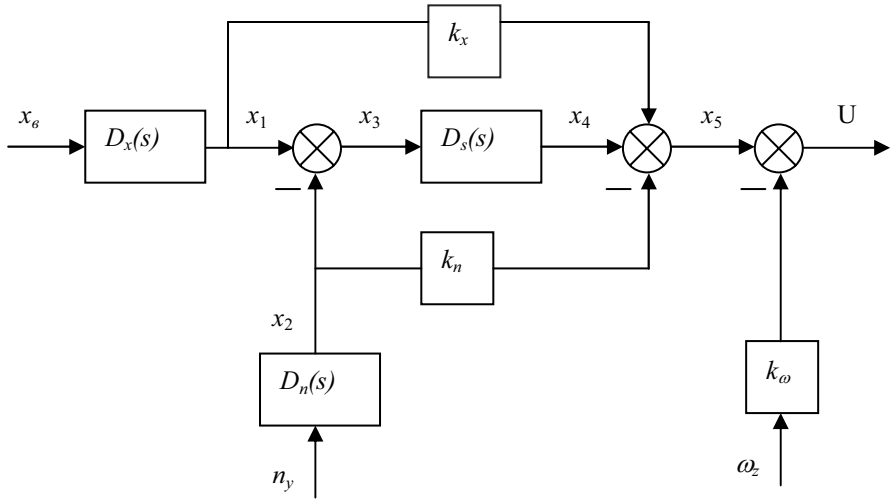



Рисунок 3 - Структурная схема непрерывного алгоритма ВРК

Запишем систему операторных уравнений непрерывного алгоритма ВРК

$$\begin{aligned}
&x_1(s)=D_x(s)x_в(s),\\
&x_2(s)=D_n(s)n_y(s),\\
&x_3(s)=x_1(s)-x_2(s),\\
&x_4(s)=D_s(s)x_3(s),\\
&x_5(s)=k_x x_1(s)+x_4(s)-k_n x_2(s),\\
&u(s)=x_5(s)-k_\omega\omega_z(s).
\end{aligned}\qquad (1)$$

Анализ структурной схемы (рис.2) и системы уравнений (1) позволяет определить тип и количество аналоговых струйных элементов, требуемых для построения ВРК. В составе аналогового ВРК должны быть реализованы одно интегрирующее звено, два апериодических звена, три постоянных коэффициента, три элемента сложения. Требования к параметрам функ-

циональных струйных элементов определяются из условия обеспечения заданных постоянных времени $T_x$, $T_n$, коэффициентов $k_x$, $k_n$, $k_\omega$.

Для примера приведем аналоговое струйное апериодическое звено, схема которого изображена на рис.3, где $P_{вх}$ – давление на входе, $P_{вых}$ – давление на выходе, $D$ – дроссель линейный, $V$ – емкость.

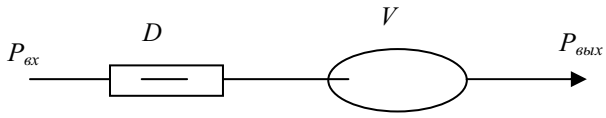



Рисунок 3 - Схема аналогового струйного апериодического звена

Операторное уравнение звена

$$P_{вых} = \frac{1}{Ts+1} P_{вх},$$

где $T=V/(\alpha R\theta)$, $\alpha$ – проводимость дросселя, $R$ – газовая постоянная, $\theta$ – абсолютная температура. Отсюда могут быть определены требуемые значения параметров струйного элемента, обеспечивающие заданную постоянную времени $T$, оценена реализуемость струйного апериодического звена с заданными характеристиками.

**Заключение**

Для обеспечения непрерывности управления современными самолетами с ЭДСУ в условиях действия внешних ДФ можно использовать разнородную СУ, включающую наряду с основным каналом резервный на струйных элементах.

Разработаны принципы построения и организации взаимодействия каналов разнородной СУ, обеспечивающие функционирование системы при различных состояниях системы с заданным качеством. Предложена методика, основанная на анализе математической модели реализуемых алгоритмов, которая позволяет определить требования к структуре и характеристикам ВРК, обеспечивающим заданное качество управления. В качестве примера рассмотрено определение требований к характеристикам аналогового варианта ВРК СУ маневренным самолетом в продольной плоскости.

Рассмотренные подходы могут быть использованы при разработке разнородных СУ, для анализа различных вариантов построения струйного вычислителя, оценки возможности их практической реализации с заданными характеристиками.

**Список литературы**

[1] Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов. Под ред. Г.С. Бюшгенса. - М.: Наука. Физматлит, 1998.

[2] *Касимов А.М., Мамедли Э.М.* Комбинированные системы управления летательными аппаратами. // Датчики и системы. 2008. №4, с.2-5.

[3] *Иванов Ю.П., Никитин В.Г., Чернов В.Ю.* Контроль и диагностика измерительно-вычислитедьных комплексов. - Спб.: ГУАП, 2004.

# МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ЦЕНТРА МАСС ЛА ПРИ СИНЕРГЕТИЧЕСКОМ МАНЕВРИРОВАНИИ

**И.О. Петров, О.В. Майданович**

Санкт-Петербургский Университет аэрокосмического приборостроения
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, Россия
petrovigor63@mail.ru
тел: +7 (812) 494-70-43, факс: +7 (812) 710-65-10

***Ключевые слова:*** *синергетические маневры, оптимальное оперативное управление, энергетическая теория, скорость изменения кинетической энергии, мощность поверхностных сил*

**Abstract**

Considered non-traditional approach to determining optimal adaptive operational programs aircraft movement based on energy theory of synergetic maneuver. Considered the aircraft movement in the rotating Earth's atmosphere and showing specific programs on the speed heeling angle, full angle attack and angle installation engines.

## Введение

Вопросам ***маневрирования*** ЛА посвящено достаточно большое количество работ различных авторов. В каждом конкретном случае обычно осуществляют оптимальный в том или ином смысле маневр. Причем в качестве показателя оптимальности наиболее часто принято считать расход топлива, необходимый для осуществления маневра, время (оперативность), потребное на проведение маневра, точность выполнения маневра, иногда два каких-либо показателя одновременно.

Однако с сугубо механической точки зрения маневр любого ЛА – это изменение кинетической энергии его под действием соответствующих сил. И только после этого через какое-то время происходит переход части кинетической энергии в потенциальную или наоборот.

Сущность энергетического подхода к маневрированию ЛА заключается в исследовании на экстремум мощности поверхностных сил, действующих на него в полете, по координатам вектора управления. В этом случае получаются оптимальные оперативные адаптивные программы движения центра масс ЛА.

В связи с этим в данном докладе рассмотрен нетрадиционный подход к разработке оптимальных оперативных адаптивных программ движения центра масс ЛА на основе энергетической теории синергетического маневрирования. Данные программы движения центра масс ЛА позволяют обеспечить расчет пространственной ориентации ЛА непосредственно на борту со значительным опережением темпа маневра.

## Методология энергетического подхода к маневрированию ЛА

Основы методологии энергетического подхода к маневрированию разработаны и изложены в [1] применительно к рассмотрению только абсолютного движения ЛА. Однако в реальном движении аэродинамические силы, действующие на ЛА, определяются не вектором абсолютной скорости $\overline{V}_a$, а вектором скорости ЛА относительно вращающейся вместе с Землей атмосферы $\overline{V}_в$, названной в докладе воздушной скоростью ЛА. Причем управление аэродинамическими силами с помощью полного угла атаки $\kappa$ и скоростного угла крена $\gamma$ также определяется именно в относительном движении. В связи с этим движение ЛА в атмосфере необ-

ходимо рассматривать комплексно, т.е. в единстве абсолютного и относительного движений. Единство указанных движений заключается в том, что модули и пространственная ориентация аэродинамических сил определяются в относительном движении относительно вращающейся совместно с Землей атмосферы, но их влияние на движение ЛА рассматривается в абсолютном движении.

Синергетическое маневрирование ЛА в атмосфере имеет свою специфику по сравнению с обычными маневрами КА в космосе, которая состоит в том, что, в относительном движении ЛА, с одной стороны, присутствует диссипативная сила лобового сопротивления $\overline{Q}$, рассеивающая кинетическую энергию ЛА, а с другой стороны – действует подъемная аэродинамическая сила $\overline{Y}$, обеспечивающая существенное улучшение маневренных возможностей ЛА при одновременном снижении расхода потребного количества топлива для осуществления маневра. Таким образом, как бы ликвидируется отрицательное влияние диссипативной силы, если аэродинамическое качество ЛА при этом больше единицы.

Наличие аэродинамических сил требует решения дополнительной проблемы, обусловленной необходимостью ограничить величины тепловых потоков, температур конструкции и перегрузок, величины которых зависят главным образом от интенсивности изменения кинетической энергии ЛА. Следовательно, если каким-либо образом управлять в процессе осуществления маневра интенсивностью изменения энергии ЛА, то можно будет сравнительно просто изменять в нужную сторону величины теплового потока, температуры и перегрузок.

Следует отметить еще один очень важный факт, состоящий в том, что поиск оптимальных траекторий полета любых ЛА в атмосфере на базе традиционных методов оптимизации с математической точки зрения представляет довольно сложную и трудоемкую задачу, обусловленную необходимостью решения вариационных краевых задач, близких, как правило, к некорректным из-за отсутствия решения даже при использовании современных ЭВМ и методов вычислительной техники. Основные трудности решения соответствующих вариационных задач обусловлены, в первую очередь, тем, что для системы сопряженных дифференциальных уравнений не удается получить все необходимые интегралы и возникают большие трудности с поиском начальных условий интегрирования сопряженной системы дифференциальных уравнений. Указанные начальные условия (или их часть), как правило, определяют методом простого подбора. Это ставит под большое сомнение оптимальность управления, полученного с помощью принципа максимума Л.С. Понтрягина, так оно напрямую зависит от сопряженных переменных, содержащих в себе волюнтаризм подбора начальных условий интегрирования сопряженной системы дифференциальных уравнений. Поэтому в общем случае можно говорить о некоторых «попадающих» в заданную точку траекториях, полученных с помощью принципа максимума Л.С. Понтрягина, но не об оптимальных траекториях.

На основании изложенного ясно, что решение проблемы синергетического маневрирования связано с разработкой новых оперативных методов определения оптимальных программ движения на основе исследования интенсивности (скорости) изменения энергии в процессе осуществления маневра с учетом единства абсолютного и относительного движений.

Рассмотрим изменение полной механической энергии ЛА $E_a$ в абсолютном движении и покажем, что полная механическая энергия в процессе маневра изменяется только за счет составляющей скорости изменения кинетической энергии $T$, которая в свою очередь зависит только от поверхностных сил $\overline{R}_{пов}$ и не зависит от силы притяжения Земли $\overline{G}$.

В случае рассмотрения абсолютного движения вращение атмосферы совместно с Землей не учитывается, т.е. считается, $\Omega_з = 0$, и, следовательно $\dot{E}_a = \dot{E}_r(\Omega_з = 0)$. С учетом этого получим:

(1) $\dot{E}_a = \overline{R}_{пов} \cdot \overline{V}_a + \dot{m} \cdot \left( \frac{V_a^2}{2} - \frac{\pi_0}{r} \right),$

где $\overline{R}_{пов} \cdot \overline{V}_a$ - мощность поверхностных сил в абсолютном движении.

Выражение (1) можно представить в виде суммы скоростей изменения кинетической и потенциальной энергий:

(2) $\dot{E}_a = \dot{T}_a + \dot{\Pi},$

где

(3) $\dot{T}_a = \overline{R}_{пов} \cdot \overline{V}_a + \dot{m} \frac{V_a^2}{2},$

(4) $\dot{\Pi} = -\dot{m} \frac{\pi_0}{r}.$

Если через $\dot{\tilde{T}}_a = \overline{R}_{пов} \cdot \overline{V}_a$ обозначить скорость изменения кинетической энергии ЛА в абсолютном движении, обусловленную действием только поверхностных сил $\overline{R}_{пов}$, то формулу (3) можно переписать в виде:

(5) $\dot{T}_a = \dot{\tilde{T}}_a + \dot{m} \frac{V_a^2}{2}.$

Второе слагаемое в (5) всегда меньше нуля, так как характеризует изменение кинетической энергии ЛА за счет уменьшения его массы. Очевидно, что величина второго слагаемого зависит в общем случае от значения $\dot{m}$, которое характеризует вид топлива и качество двигательной установки на аппарате. Другими словами, величина $\dot{m}$ должна быть определена в процессе баллистического проектирования летательного аппарата. Уменьшение второго слагаемого с технической точки зрения эквивалентно наличию на борту аппарата двигательной установки с максимально возможной эффективной скоростью истечения $W_{эф}$.

Если рассматривать маневрирование ЛА с окончательно выбранными конкретными видами топлива и двигательной установки, то оказать влияние на величину второго слагаемого в (5) уже не представляется возможным. Иными словами говоря, управление вторым слагаемым исключено.

Таким образом, управлять ЛА в процессе маневра можно только путем целенаправленного изменения первого слагаемого, которое в теоретической механике называют мощностью поверхностных сил. Поскольку маневр летательного аппарата в частном случае может осуществляться с выключенными двигателями, например, только под действием аэродинамических сил, что характерно для синергетических маневров, то указанную выше мощность поверхностных сил $\dot{\tilde{T}}_a = \overline{R}_{пов} \cdot \overline{V}_a$ будем в дальнейшем называть интенсивностью изменения кинетической энергии летательного аппарата в абсолютном движении в процессе осуществления маневра.

Оптимальное оперативное автономное адаптивное управление движением ЛА определяется путем исследования на экстремум скорости изменения полной механической энергии ЛА по управлению $\overline{u}$.

Для определения структуры оптимального управления надо исследовать $\dot{E}_a$ на экстремум по координатам вектора управления $\overline{u} = \left[ u_1, u_2, ... u_n \right]^T$, то есть решить систему уравнений:

(6) $$\frac{\partial \dot{E}}{\partial \overline{u}} = 0$$ .

Данная система уравнений (6) равносильна системе уравнений:

(7) $$\frac{\partial\left(\overline{R}_{пов} \cdot \overline{V}\right)}{\partial \overline{u}} = \frac{\partial N}{\partial \overline{u}} = \frac{\partial}{\partial \overline{u}}\left(\overline{p} \cdot \bar{f}_{пов}\right) = \overline{p} \cdot \frac{\partial \bar{f}_{пов}}{\partial \overline{u}} = \overline{0},$$

где под $\overline{V}$ понимается либо вектор абсолютной скорости $\overline{V}_a$, либо вектор воздушной скорости $\overline{V}_в$ в зависимости от того, какое движение рассматривается.

В скалярном виде систему (7) мо3жно записать следующим образом:

(8) $$\begin{cases} \dfrac{\partial f_1}{\partial u_1} p_1 + \cdots + \dfrac{\partial f_n}{\partial u_1} p_n = 0 \\ \cdots \\ \dfrac{\partial f_1}{\partial u_m} p_1 + \cdots + \dfrac{\partial f_n}{\partial u_m} p_n = 0 \end{cases}.$$

где $\overline{u}$ - вектор управления размерности $m$, координатами которого могут быть, например, углы тангажа, крена, рыскания, атаки, стреловидности, скоростного угла крена, полного угла атаки, установки двигателя, изменения его ориентации и т.п.

В качестве вектора управления примем вектор управления движением центра масс ЛА в виде $\overline{u} = \left[\kappa, \gamma, u_\partial\right]^T$, где $\kappa$ - полный угол атаки, отсчитываемый от вектора воздушной скорости $\overline{V}_в$, $\gamma$ - скоростной угол крена, отсчитываемый от вертикальной плоскости относительного движения ЛА, $u_\partial$ - угол установки двигателей на ЛА, отсчитываемый от оси $Ox_1$ связанной системы отсчета.

Для вычисления управления по полному углу атаки целесообразно представить зависимость коэффициента силы лобового сопротивления от полного угла атаки в виде полинома второй степени $c_x = k_{Q_1}\kappa^2 + k_{Q_2}\kappa + k_{Q_3}$, а зависимость коэффициента подъемной силы от $\kappa$ в виде полинома второй степени $c_y = k_{Y_1}\kappa^2 + k_{Y_2}\kappa + k_{Y_3}$, где коэффициенты $k_{Q_1}, k_{Q_2}, k_{Q_3}, k_{Y_1}, k_{Y_2}, k_{Y_3}$ являются функциями числа Маха.

Для того, чтобы избежать неопределенности управления по скоростному углу крена, надо исследовать на экстремум мощность поверхностных сил в абсолютном движении.

Запишем систему уравнений (7) для абсолютного движения ЛА:

(9) $$\begin{cases} \dfrac{\partial\left(\overline{R}_{пов} \cdot \overline{V}_a\right)}{\partial \kappa} = 0, \\ \dfrac{\partial\left(\overline{R}_{пов} \cdot \overline{V}_a\right)}{\partial \gamma} = 0, \\ \dfrac{\partial\left(\overline{R}_{пов} \cdot \overline{V}_a\right)}{\partial u_\partial} = 0. \end{cases}$$

Выразим скалярное произведение $\overline{R}_{пов} \cdot \overline{V}_a$ через проекции векторов на оси вращающейся системы отсчета:

(10) $$\overline{R}_{пов} \cdot \overline{V}_a = R_{пов_{x_в}} \cdot V_{a_{x_в}} + R_{пов_{y_в}} \cdot V_{a_{y_в}} + R_{пов_{z_в}} \cdot V_{a_{z_в}}.$$

Проекции вектора абсолютной скорости $\overline{V}_a$ на оси вращающейся системы отсчета определяются следующим образом:

$$(11)\ \overline{V}_a = \begin{bmatrix} V_{a_{x_в}} \\ V_{a_{y_в}} \\ V_{a_{z_в}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_r \\ \omega_z r \\ 0 \end{bmatrix}.$$

С учетом выражений (9)-(11) получим:

$$\overline{R}_{пов} \cdot \overline{V}_a = V_r\left[-Q\sin\theta_r + P\cos u_P \sin\theta_r + Y\cos\gamma\cos\theta_r + P\sin u_P \cos\gamma\cos\theta_r\right] +$$

$$+ r\omega_z \cdot \begin{bmatrix} -Q\cos\theta_r\cos(\eta_r - \eta) + P\cos u_P \cos\theta_r \cos(\eta_r - \eta) - \\ -Y\cos\gamma\sin\theta_r\cos(\eta_r - \eta) - P\sin u_P \cos\gamma\sin\theta_r\cos(\eta_r - \eta) + \\ +Y\sin\gamma\sin(\eta_r - \eta) + P\sin u_P \sin\gamma\sin(\eta_r - \eta) \end{bmatrix}.$$

Решив уравнение $\dfrac{\partial\left(\overline{R}_{пов} \cdot \overline{V}_a\right)}{\partial\gamma} = 0$, получим:

$$(12)\ \operatorname{tg}\gamma = \frac{-r\omega_z \sin(\eta_r - \eta)}{r\omega_z \sin\theta_r \cos(\eta_r - \eta) - V_r \cos\theta_r}.$$

Из уравнения $\dfrac{\partial\left(\overline{R}_{пов} \cdot \overline{V}_a\right)}{\partial u_д} = 0$ получим:

$$(13)\ u_д = \operatorname{arctg}\left(-\frac{N2}{N1}\right) - \kappa,$$

где

$$N1 = -V_r \sin\theta_r - r\omega_z \cos\theta_r \cos(\eta_r - \eta),$$

$$N2 = V_r \cos\gamma\cos\theta_r - r\omega_z\left[\cos\gamma\sin\theta_r\cos(\eta_r - \eta) - \sin\gamma\sin(\eta_r - \eta)\right].$$

Решив уравнение $\dfrac{\partial\left(\overline{R}_{пов} \cdot \overline{V}_a\right)}{\partial\kappa} = 0$, получим:

$$(14)\ \kappa = -\frac{k_{Q_2} \cdot N1 + k_{Y_2} \cdot N2}{2\left(k_{Q_1} \cdot N1 + k_{Y_1} \cdot N2\right)}.$$

Если двигатели на МВКС зафиксированы в течение всего полета, то тогда $u_д = const$ и вектор управления принимает вид $\overline{u} = [\kappa, \gamma]^T$.

В этом случае скоростной угол крена определяется по формуле (12), а для определения полного угла атаки решается трансцендентное уравнение $f(\kappa_{опт}) = 0$,

где

$$f(\kappa) = 2\kappa\left(k_{Q_1} \cdot N1 + k_{Y_1} \cdot N2\right) + \left(k_{Q_2} \cdot N1 + k_{Y_2} \cdot N2\right) +$$

$$(15)\ + \frac{2P}{\rho V_в^2 S_M}\left(\sin(\kappa + u_д) \cdot N1 + \cos(\kappa + u_д) \cdot N2\right).$$

Следует отметить, что в формулу (15) входит модуль скорости $V_в$, так как модуль и ориентация в пространстве аэродинамических сил определяется вектором воздушной скорости $\overline{V}_в$, хотя мощность этих сил рассматривается в абсолютном движении.

Полученное управление в виде (12)-(15) на активном участке траектории обеспечивает максимизацию мощности поверхностных сил в абсолютном движении и максимальный набор полной механической энергии, а на участке спуска – минимизацию рассеивания имеющегося запаса кинетической энергии ЛА.

На основании анализа полученных управлений для относительного и абсолютного движений получена структура оперативного оптимального адаптивного автономного управления, аналогичная структуре оптимального управления при решении вариационных задач с использованием принципа максимума Л.С. Понтрягина, которую в общем виде можно записать следующим образом:

$$(16)\quad \operatorname{tg}\gamma = \frac{p^0_{z_в}\cos(\eta_r-\eta) - p^0_{y_в}\sin(\eta_r-\eta)}{p^0_{z_в}\sin\theta_r\sin(\eta_r-\eta) + p^0_{y_в}\sin\theta_r\cos(\eta_r-\eta) - p^0_{x_в}\cos\theta_r},$$

$$(17)\quad u_\partial = \operatorname{arctg}\left(-\frac{N2}{N1}\right) - \kappa,$$

$$(18)\quad \kappa = -\frac{k_{Q_2}\cdot N1 + k_{Y_2}\cdot N2}{2\left(k_{Q_1}\cdot N1 + k_{Y_1}\cdot N2\right)},$$

где

$$N1 = -p^0_{x_в}\sin\theta_r - p^0_{y_в}\cos\theta_r\cos(\eta_r-\eta) - p^0_{z_в}\cos\theta_r\sin(\eta_r-\eta),$$

$$N2 = p^0_{x_в}\cos\gamma\cos\theta_r - p^0_{y_в}\left[\cos\gamma\sin\theta_r\cos(\eta_r-\eta) - \sin\gamma\sin(\eta_r-\eta)\right] -$$

$$- p^0_{z_в}\left[\cos\gamma\sin\theta_r\sin(\eta_r-\eta) + \sin\gamma\cos(\eta_r-\eta)\right].$$

$p^0_{x_в}, p^0_{y_в}, p^0_{z_в}$ - проекции орта вектора импульсов $\bar{p}^0$ единичной массы на оси вращающейся системы отсчета, относительно которого максимизируется мощность поверхностных сил.

**Заключение**

В докладе показана связь вариационного и энергетического принципов определения оптимального управления, из которой очевидно, что «гамильтониан» представляет собой не энергию, а мощность поверхностных сил.

Показано, что управляя только мощностью поверхностных сил можно управлять полной механической энергией ЛА в случае заданного режима работы двигателей ЛА. В случае, если режим работы двигателей не задан, то в качестве координаты вектора управления $\bar{u}$ можно рассматривать скорость изменения массы ЛА, т.е. массовый секундный расход $m_{сек}$.

Практические приложения энергетической теории в виде конкретных программ движения для синергетических маневров позволяют эффективно использовать их при оперативном расчете оптимальных адаптивных программ движения ЛА непосредственно на борту с опережением темпа маневра без решения сложных и трудоемких вариационных задач на основе принципа максимума Л.С.Понтрягина.

**Список литературы**

[1] Насонов В.П. Нетрадиционный подход к решению традиционных задач динамики полета ракетносителей. – СПб: ВИКИ им. А.Ф.Можайского. – 1992. – 64 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**Н.А. Сазонникова**

Самарский государственный аэрокосмический университет
443086, Самара, Московское шоссе, 34, Россия
nasazonnikova@yandex.ru
тел: +7 (846) 267-46-65

***Ключевые слова:*** *лазерное зондирование поверхности, вероятность обнаружения, отражательные характеристики*

**Abstract**

Experimental investigations on aircraft surface reflecting characteristics were carried out During investigation parameters of sound laser beam influence at probability of detecting and recognition the laser location installation was used. Contrast from incident angle, light wave and relative pulse duration dependencies were received. The experimental estimation of light wave to detecting probability influence at the aircrafts surfaces distance sounding was carried out. For the purpose of detection and recognition probabilities estimation of objects depending on parameters of measurement system statistical modeling of the given process was spend. The functions of probability depend on relation of spot diameter to the characteristic size of an element of investigated surface, level of noise, number of rereflections in surface elements were defined. Possibilities of noise level decrease in measuring systems was shown at laser power stabilization.

## Введение

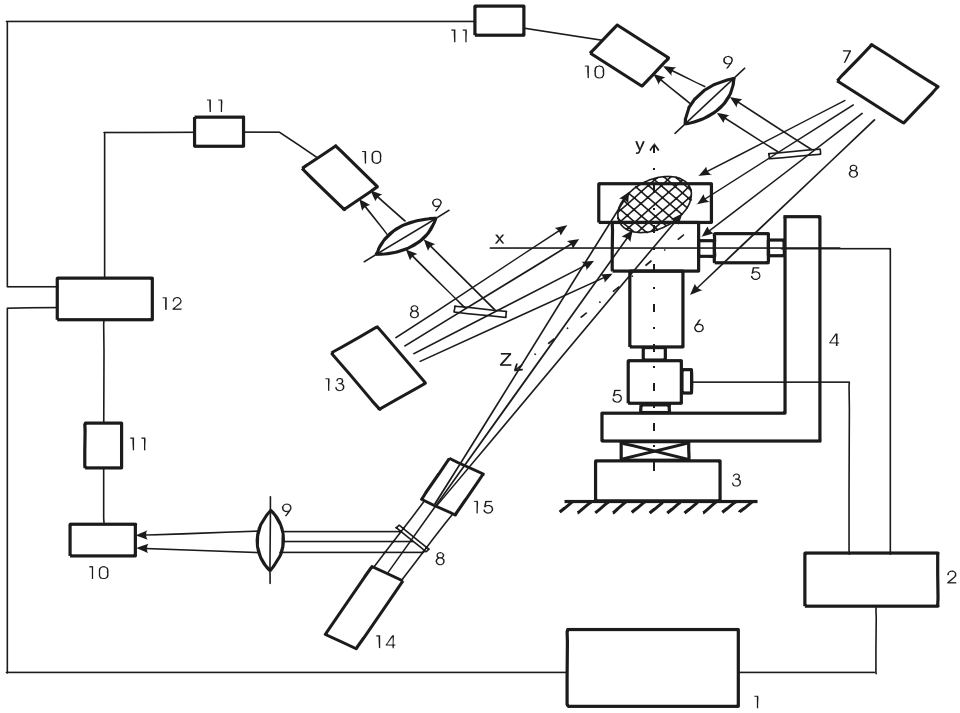
В настоящее время находят широкое применение оптические методы контроля качества изделий машиностроения и массового производства благодаря их бесконтактности, высокой информативности, быстродействию, возможности работы в реальном масштабе времени. Лазерные диагностические системы применяются в России и за рубежом для контроля качества изделий машиностроения, авиационной и космической техники, автомобилестроения, приборостроения, для выявления повреждений нефте- и газопроводов и скважин [1-7]. Лидерство в области лазерной дефектоскопии принадлежит ученым Европы и США. Зарубежные дефектоскопические системы обеспечивают разрешающую способность на уровне 10 мкм [1]. Отечественные лазерные дефектоскопические системы не обеспечивают требуемой вероятности обнаружения и распознавания дефектов поверхностного слоя изделий авиационной и космической техники, также не имеют возможности адаптации к условиям проведения контроля.

С целью дальнейшего повышения эффективности лазерно-электронных систем дистанционного зондирования поверхностей требуется оценить влияние параметров зондирующего лазерного излучения на вероятность обнаружения и распознавания элементов поверхности и внешней компоновки летательных аппаратов и элементов конструкции газотурбинных двигателей.

В силу сложности аналитического расчета зависимости величины регистрируемого сигнала и вероятностей обнаружения и распознавания объектов при дистанционном зондировании с использованием лазерно-электронных систем актуальными являются методы численного и физического моделирования данных процессов.

## 1 Физическое моделирование процесса лазерной локации

При проведении исследования влияния параметров зондирующего лазерного излучения на вероятность обнаружения и распознавания использовался стенд лазерной локации (рисунок 1).




1 - ПЭВМ; 2 - блок управления приводов модели; 3 - узел крепления стенда; 4 - рама крепления приводов; 5 - привод с датчиками углового поворота; 6 - модель цели; 7 - первый имитатор источника света; 8 - полупрозрачное зеркало; 9 - линза; 10 - фотоприемник; 11 - фоторегистратор; 12 - блок обработки информации; 13 - второй имитатор источника света; 14 - лазер; 15 - формирователь зондирующего пучка; 16 – телекамера

Рисунок 1 – Испытательный стенд лазерной локации

Он включает в свой состав включает механическую систему углового сопровождения и устройства оптической визуализации и необходим для решения следующих задач: проведение анализа уровня освещённости участков элемента конструкции, исследование оптических свойств поверхностей и распределение освещённости в зондирующем пучке освещения, определение координат энергетического центра освещенности изделия при заданном уровне фона, определение вектора перемещения энергетического центра освещенности при изменении положения изделия в пространстве, определение оптических свойств материалов (коэффициент отражения и индикатриса отражения) при заданных температурах

Для осуществления физического моделирования процесса дистанционного зондирования поверхностей ЛА необходимо соблюдать принцип дифракционного подобия полей, рассеянных реальным объектом и его масштабной моделью в дальней зоне [6]. Испытательный стенд обеспечивает идентичность углов облучения и приема по сравнению с реальной измерительной системой. Используемые модели цели должны подробно воспроизводить в масштабе копии объект локации и имитировать характеристики рассеяния его покрытий. Для создания зондирующего пучка освещения модели служат лазеры с рабочими длинами волн излучения в диапазоне $(0{,}56\text{-}1{,}06)\cdot 10^{-6}$ м.

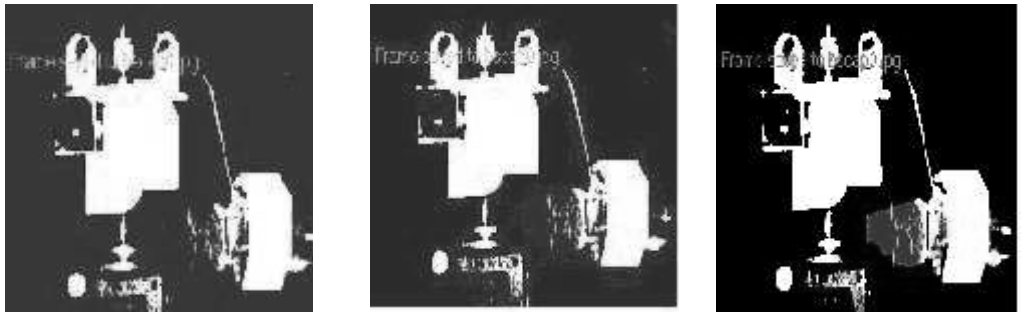
Зондирующий поток лазерного излучения располагался под углами φ=- 30°—- 45°, β= 0-30° (φ – угол между вертикальной плоскостью и направление зондирующего потока лазерного излучения, β – угол между горизонтальной плоскостью и потоком лазерного излучения). Использовалось импульсное лазерное излучение со скважностью в диапазоне 2…4 и длиной волны излучения 0,56…1,06 мкм (Скважность – отношение периода следования (повторения) импульсов одной последовательности к их длительности). Примеры полученных изображений приведены на рисунке 2.

Для анализа полученных изображений был применен стандартный пакет программ *MATLAB* 7.5 (пакет *Image Processing Toolbox*). На рисунке 3 приведены примеры полученных гистограмм.

По результатам анализа гистограмм распределения интенсивности в изображениях рассчитывалась величина контрастности изображения по зависимости:

$$(1) \quad K = \frac{I_{\max} N_{\max} - I_{\min} N_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}},$$

где $I_{max}$ – максимальное значение интенсивности в изображении, $N_{max}$ –число пикселов с интенсивностью $I_{max}$, $I_{min}$ – минимальное значение интенсивности в изображении, $N_{min}$ – число пикселов с интенсивностью $I_{min}$.



1 2 .3

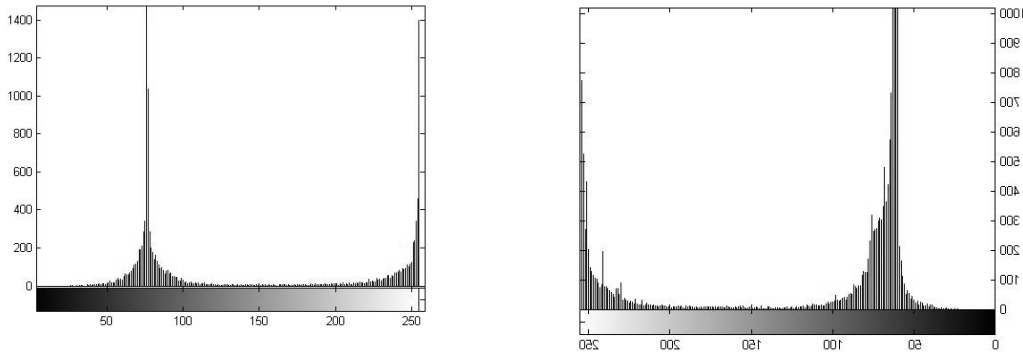
Рисунок 2 – Изображения фотометрических моделей космических аппаратов

Построены зависимости контрастности изображения от угла падения излучения, длины волны излучения и скважности импульсов (рис.5, 6).

Полученные зависимости показывают, что с ростом угла падения излучения в диапазоне 30…45 при скважности, равной 6, контрастность возрастает в 1,5 раза, а при скважности, равной 2 – в 2 раза. С ростом длины волны с 0,56 мкм до 0,63 мкм сначала происходит снижение контрастности на 10…15%,, а затем ее рост на 15…20%.

Проведена экспериментальная оценка влияния длины волны излучения на вероятность обнаружения объектов при лазерной локации. Коэффициент правдоподобия лазерной локации Р определяется как отношение площади видимого изображения, ограниченной распределением плотности мощности отраженного сигнала, к общей величине площади его изображения. Построена зависимость коэффициента правдоподобия *P* от безразмерного параметра $K_1 = B_1 / \lambda$, где $B_1$ – диаметр зондирующего потока лазерного излучения.

На рисунке 6 приводятся сравнительные зависимости величины Р для различных объектов типа КА с учетом изменяемой длины волны λ, частоты генерации ν и величины скважности импульса излучения Λ.




а б

Рисунок 3 – примеры гистограмм обработки изображений: а – гистограмма для изображения 1, б – гистограмма для изображения 2

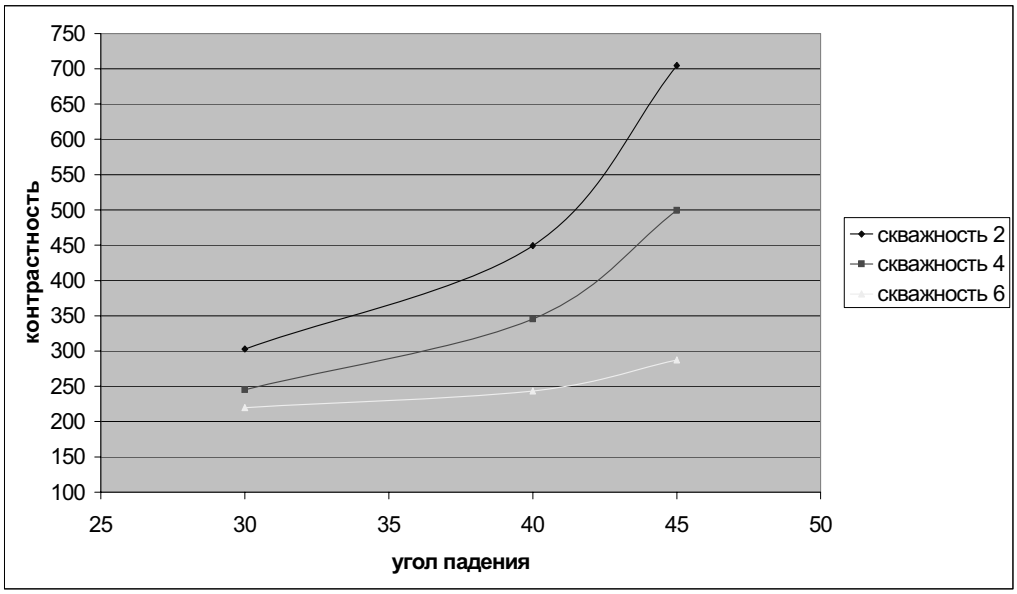



Рисунок 4 – Зависимости контрастности изображений от угла падения излучения и скважности импульсов

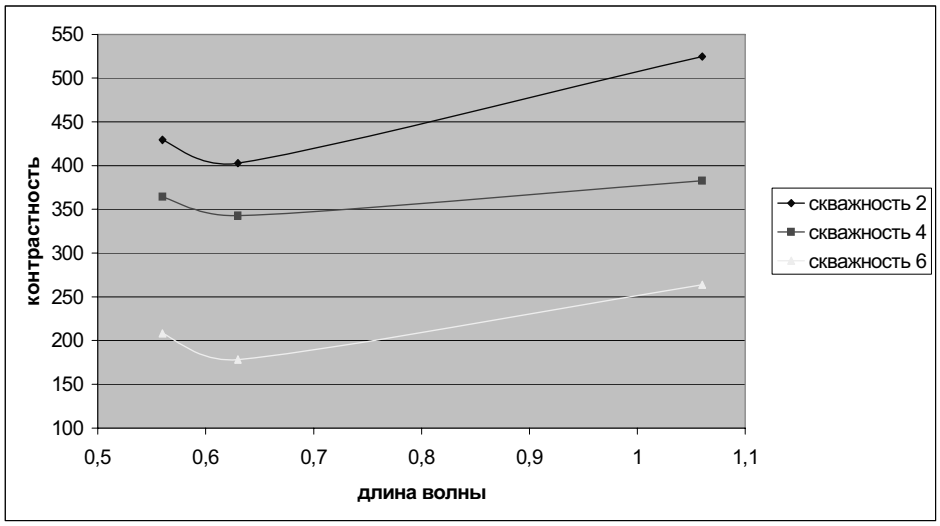



Рисунок 5 – Зависимости контрастности изображений от длины волны и скважности импульсов

Заметим, что величина коэффициента правдоподобия обнаружения объекта *P* зависит от его конструкции при неизменном составе группы материалов внешней компоновки. Состав группы материалов внешней компоновки:: теплоизоляционная капроновая ткань; пластины с покрытием на основе диоксида циркония; алюминиевые сплавы после химполирования; пластины радиационных элементов из арсенида галлия. В данных условиях проведения исследований объект типа КА «Ikonos» (США) имеет большую вероятность обнаружения (оптическая ось зондирующего пучка перпендикулярна строительной оси объекта).

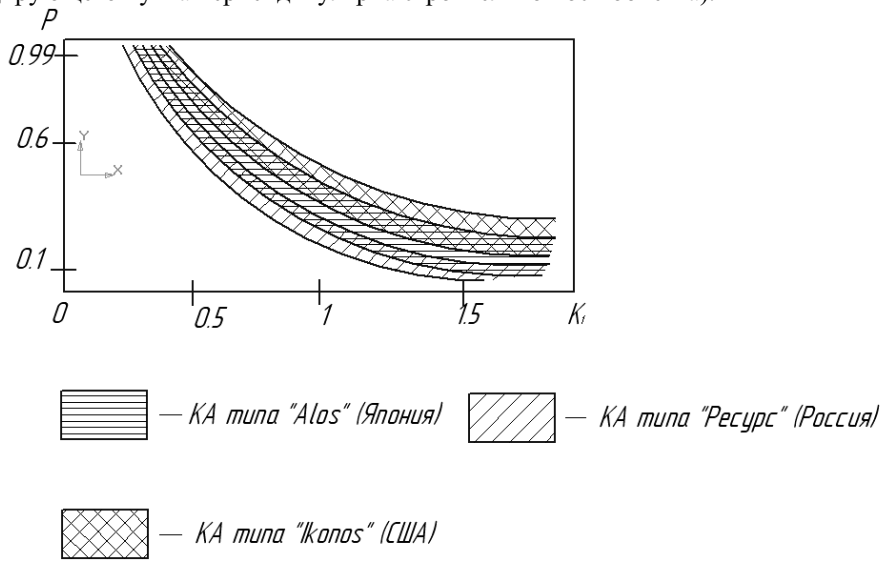



Рисунок 6 – Зависимость коэффициента правдоподобия лазерной локации от длины волны излучения для моделей различных космических аппаратов:
1 – верхняя граница области обнаружения: частота генерации- 30 Гц, скважность импульса 1/5;
2 – нижняя граница области обнаружения: непрерывный режим генерации

## 2 Численное моделирование процессов обнаружения и распознавания при лазерном зондировании поверхности

С целью оценки вероятностей обнаружения и распознавания объектов в зависимости от параметров измерительной системы проведено статистическое моделирование данного процесса с использованием ранее полученных аналитических зависимостей [8].

Проведено статистическое моделирование процессов обнаружения и распознавания с помощью стандартного пакета программ *Матлаб 7.5* (*Statistic tool box)*.

На первом этапе статистического моделирования определялись необходимые длительность и число прогонов.

Необходимая длительность прогонов составляет: для $B_1$=0.75; n=40; для $B_1$=1; n=80; для $B_1$=1.5; n=140. Оптимальное число прогонов равно 5. В этом случае погрешность моделирования не превышает 5%.

Затем проводилось моделирование обнаружения и распознавания при различных значениях уровня шума, оцененных экспериментально. Величина порога обнаружения определялась в зависимости от типа измерительной системы и уровня шумов [9]

Влияние характеристик источника излучения на пороговую величину сигнала при обнаружении было оценено экспериментально и определяется стабильностью мощности излучения, оси диаграммы направленности, длины волны для выбранных типов излучателей с учетом режимов эксплуатации.

Относительная величина уровня шумов составляла в зависимости от источника излучения: 0….0,05 – гелий неоновый лазер, 0….0,10 – твердотельный лазер (или полупроводниковый со стабилизацией), 0….0,25 – полупроводниковый лазер без стабилизации мощности излучения.

Определены зависимости вероятности обнаружения от значения относительного диаметра пятна на поверхности, уровня шумов, числа переотражений в элементах поверхности (рисунок 7).

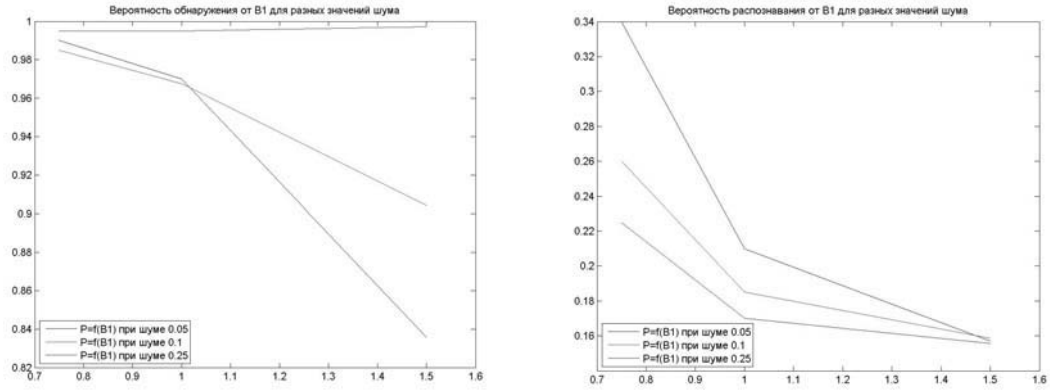



Рисунок 7 – . Зависимость вероятности обнаружения от уровня шума и диаметра пятна (а) и зависимость вероятности распознавания геометрии элементов от диаметра пятна и уровня шума при значении порогового отношения правдоподобия $L_{пор}$=4 (б)

Снижение диаметра пятна в диапазоне $B_1/H_1$= 1,5…0,75 приводит к увеличению вероятности обнаружения на 15…20 % при уровне шумов 0,1. При уровне шумов 0,05 влияние диаметра пятна соизмеримо с погрешностью моделирования. Аналогичное изменение диаметра пятна приводит к увеличению вероятности распознавания на 20…25%. Снижение уровня шу-

мов, обусловленного источником излучения в диапазоне 0,25…0,1 приводит к повышению вероятности распознавания на 13…18%.

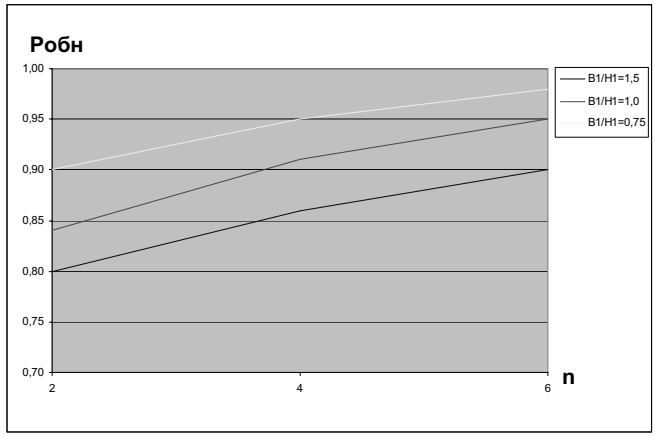



Рисунок .8 – Зависимость вероятности обнаружения от параметра n и диаметра пятна

Изменение параметра n в диапазон 2…6 (т.е изменение угла геометрии элемента поверхности в диапазоне 30…10º) приводит к увеличению вероятности обнаружения на 15% и снижению вероятности распознавания на 20…25% (рис.8) . Измерение величины зеркальной составляющей при двух различных углах падения позволяет повысить вероятность распознавания на 20…25%.

Для повышения вероятности распознавания на 20% требуется изменение показателя индикатрисы в диапазоне 4….20 за счет изменения длины волны или скважности импульса. Определение показателя индикатрисы при трех различных измерениях (модуляция длины волны, скважности импульса) позволяет) увеличит вероятность распознавания на 20…25%.

Определены зависимости вероятности обнаружения от значения отношения диаметра пятна к характерному размеру элемента поверхности на исследуемой поверхности, уровня шумов, числа переотражений в элементах поверхности. Снижение относительного диаметра пятна в диапазоне 1,5…0,75 приводит к увеличению вероятности обнаружения на 15…20 % при отношении шум/сигнал 0,1. При относительном уровне шумов 0,05 влияние диаметра пятна соизмеримо с погрешностью моделирования. Аналогичное изменение диаметра пятна приводит к увеличению вероятности распознавания на 20…25%. Снижение уровня шумов, обусловленного источником излучения в диапазоне.

Проведены экспериментальные исследования флуктуаций мощности различных типов излучателей с целью оценки уровня порогового сигнала и выбора оптимального типа излучателя для систем дистанционного зондирования. Наименьшая величина порогового сигнала (уровня шумов) (на уровне 8…10%) достигается при использовании газовых и твердотельных лазеров. С целью компенсации флуктуаций мощности излучателя вводится опорный измерительный канал. Это позволяет снизить уровень порогового сигнала до 3…5%. Исследования показали, что стабильность излучательных характеристик полупроводниковых лазеров определяется структурой и материалом активной среды. Доказано, что из рассмотренной группы полупроводниковых лазеров наиболее приемлемыми для измерительных систем являются полупроводниковые инжекционные лазеры с квантово-размерными структурами на основе материалов четверных систем, характеризующиеся отсутствием дефектов темных линий, слабой зависимостью величин порогового тока от температуры лазерного кристалла и окружающей среды, наибольшей стабильностью оси диаграммы направленности и отсутствием изгибов на ватт-амперной характеристике. Возможны два способа стабилизации мощности излучения лазерного диода: обратная связь по току при измерении мощности с помощью встроенного

фотодиода и обратная связь при использовании светодиода в качестве усилителя. Использование указанных мер позволяет снизить величину порогового сигнала при использовании полупроводниковых лазеров до 5%.

**Заключение**

Таким образом, в данной работе проведены экспериментальные исследования по определению коэффициента отражения в зависимости от длины волны, угла падения и скважности импульсно-периодического излучения. С использованием разработанного стенда лазерной локации получены зависимости контрастности изображения от длины волны, угла падения излучения и скважности импульсов. Показано, что с ростом длины волны в диапазоне 0,56…1,06 мкм и угла падения излучения в диапазоне 30…45º контрастность изображений возрастает. С увеличением скважности импульсов с 2 до 6 контрастность изображений снижается. Коэффициент правдоподобия обнаружения объекта зависит от его конструкции при неизменном составе группы материалов внешней компоновки.

Проведено численное моделирование процессов обнаружения и распознавания. Определены требуемые диапазоны параметров измерительной системы для повышения вероятности обнаружения и распознавания на 20…25%. Выбраны наиболее приемлемые типы полупроводниковых лазеров с целью повышения отношения сигнал/шум.

**Список литературы**


[1] Валентюк, А.Н. Оптическое изображение при дистанционном наблюдении [Текст]/ А.Н. Валентюк, К.Г. Предко //Институт физики имени Б.И. Степанова АН БССР - Минск: Навука і тэхніка, 1991 - 358 с.

[2] Butler, M.A. Laser surface profiler[Text]/ M.A. Butler, An-Shyang Chu// Optics Letters, 1999, Vol.24, No.7, P.457-459.

[3] Лебедько, Е.Г., Нгуен Ву Тунг. Анализ рельефа поверхности при моноимпульсной лазерной локации [Текст]/Е.Г. Лебедько, Нгуен Ву Тунг //Сборник трудов конференции "Лазеры, измерения, информация 2005"– СПб: СПбГТУ. –2005 - С.36.

[4] Смирнова, Ю.Л.. Лазерная дальномерная станция как составная часть аэрокосмической системы [Текст]/Ю.Л. Сиирнова//Аэрокос-мические технологии: материалы Первой международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея. М., 2004. С.– 38 – 42.

[5] Белов, М.Л.. Рассеяние лазерного излучения на неровной поверхности со сложной локальной индикатриссой отражения в турбулентной атмосфере. [Текст]/ М.Л. Белов, В.И. Козинцев, Б.В. Стрелков. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение»/ М.: 2007.№1, с.-63-73.

[6] Математическое и физическое моделирование переходных характеристик 3D-объектов в однопозиционной системе оптической локации [Текст]/Л.В. Лабунец//Радиотехника и электроника. - 2002. – Т. 47, N 3. - С. 308-321.

[7] Кеткович, А.А. Лазерная компьютерная система контроля лопаток газотурбинных двигателей ПКПЛ-1 [Текст]/ А.А. Кеткович, Н.И. Яковлева, Б.А. Чичигин.// Контроль. Диагностика № 3, 2007. М., Машиностроение. – С. 32-34.

[8] Сазонникова, Н.А., Исследование переотражения излучения в элементах поверхности [Текст]/Н.А. Сазонникова // Компьютерная оптика, М.: МЦНТИ, 2002, выпуск 22, С..23-28.

[9] Сазонникова, Н.А. Повышение эффективности обнаружения при лазерном зондировании поверхности [Текст]/Н.А Сазонникова//Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, Самара: СГАУ, 2009, №3(19), С. 219 – 226.

# ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ УСПОКОЕНИЯ МАГНИТНОГО МИКРОСПУТНИКА НА ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ОРБИТЕ

**Н.Д. Сёмкин, В.В. Любимов, В.И. Малышев**

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева
(национальный исследовательский университет)
443086, Самара, Московское шоссе, 34, кафедра высшей математики, Россия
тел: +7 (846) 267-45-01

***Ключевые слова**: магнитный микроспутник, закон управления, прецессионное движение*

**Abstract**
This clause describes application of optimal control laws for magnetic executive agencies to reduce the initial angular velocity of the microsatellite. We obtain two solutions of the problem - in general and particular solutions (for given values of individual components of the magnetic moment). It has been numerically simulated to determine the time required for stabilization.

## Введение

В современной космонавтике при управлении вращательным движением спутников различного назначения широко применяются пассивные и полупассивные системы управления, основанные на взаимодействии магнитного поля спутника с геомагнитным полем [1]. Основным достоинством таких систем управления перед активными системами является тот факт, что они не требуют расхода рабочего тела в процессе своего функционирования. По этой причине эти системы управления могут быть использованы для спутников со сроком эксплуатации, составляющим несколько лет. Существенным недостатком магнитных систем управления являются относительно небольшие управляющие моменты и, как следствие, значительное время, затрачиваемое на процесс управления. С этой точки зрения изучение оптимальных по времени законов управления магнитными исполнительными органами является практически важным результатом.

## Постановка задачи

Вращательное движение управляемого микроспутника описывается системой уравнений, включающей динамические и кинематические уравнения Эйлера.

Динамические уравнения Эйлера в проекциях на центральные оси микроспутника X,Y,Z запишем в виде [2]:

$$(1)\quad \begin{aligned} &\frac{dKx}{dt}+\frac{C-B}{CB}\times KyKz = Mux,\\ &\frac{dKy}{dt}+\frac{A-C}{AC}\times KxKy = Muy,\\ &\frac{dKz}{dt}+\frac{B-A}{BA}\times KxKy = Muz. \end{aligned}$$

где $|\mathrm{Mu}| = ((\mathrm{Mux})^2 + (\mathrm{Muy})^2 + (\mathrm{Muz})^2)^{1/2} \le \mathrm{b}$ – модуль управляющего магнитного момента. Кинематические уравнения Эйлера имеют традиционный вид [3].

Известно [2], что оптимальное по быстродействию время успокоения микроспутника в виде твердого тела определяется следующим образом:

(2) $Mu_i = -bK_i/|K|, |Mu| = b$ .

Причем, минимальное время успокоения микроспутника равно функции Беллмана $V(x) = b^{-1}(|K| - R)$ , где R – заданное число, ограничивающее величину кинетического момента за рассматриваемое время движения. Из выражения (2) следует, что вектор оптимального управления максимален по величине, а его направление противоположно направлению вектора кинетического момента.

**Нахождение оптимальных законов успокоения микроспутника**

Рассмотрим вращательное движение микроспутника как твердого тела на орбите управляемого электромагнитными исполнительными органами. Известно, что магнитный управляющий момент спутника, учитываемый в правых частях динамических уравнений (1) имеет вид [1]:

(3) $\vec{M}_u = -\vec{L} \times \vec{B}$.

Вектор магнитной индукции геомагнитного поля $\vec{B}$ известен во всех точках траектории. Аналитическое представление данного вектора может быть представлено в виде разложения магнитного потенциала Земли в ряд по сферическим функциям [1]. Вектор $\vec{L}$ фактически задаёт закон управления магнитными исполнительными органами. Будем определять векторы $\vec{B}$ и $\vec{L}$ в проекциях на оси X,Y,Z.

Приравняв вектор управляющих моментов (2) и (3) получим систему трех алгебраических линейных уравнений относительно трех неизвестных компонентов вектора магнитного момента микроспутника $(L_x, L_y, L_z)$. В скалярном виде получаем систему уравнений

$$L_y B_z - L_z B_y = bK_x / K,$$

(4) $$L_z B_x - L_x B_z = bK_y / K,$$

$$L_x B_y - L_y B_x = bK_z / K.$$

Представим систему уравнений (4) в вектором виде:

(5) $$\begin{Vmatrix} 0 & B_z & -B_y \\ -B_z & 0 & B_x \\ B_y & -B_x & 0 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} bK_x / K \\ bK_y / K \\ bK_z / K \end{Vmatrix}.$$

Рассмотрим два решения данной системы уравнений.

**Решение 1**

Решим систему (5) в общем виде. Приведем систему (5) к треугольному виду, применяя метод Гаусса. В результате имеем

$$(6)\quad \begin{Vmatrix} B_y & -B_x & 0 \\ 0 & -\dfrac{B_x B_z}{B_y} & B_x \\ 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} L_z \\ L_y \\ L_x \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} b\dfrac{K_z}{K} \\ b\dfrac{K_y}{K} + b\dfrac{K_z B_z}{K B_y} \\ b\dfrac{K_x}{K} + b\dfrac{K_y}{K}\dfrac{B_y}{B_x} + b\dfrac{K_z}{K}\dfrac{B_z}{B_x} \end{Vmatrix}.$$

Система (6) эквивалентная системе (5). Она является совместной при выполнении условия $b\dfrac{K_x}{K} + b\dfrac{K_y}{K}\dfrac{B_y}{B_x} + b\dfrac{K_z}{K}\dfrac{B_z}{B_x} = 0$. Следовательно, система (6) совместна, если скалярное произведение $\vec{K} \cdot \vec{B} = 0$. Данное условие может быть выполнено, если микроспутник движется по экваториальной круговой орбите, совершая прецессионное движение относительно оси, совпадающей с местной вертикалью. Если выполнено условие $\vec{K} \cdot \vec{B} = 0$, то система (6) имеет бесконечное множество решений. Задаваясь величиной составляющий $L_y$, например $L_y = L_{\max}$, из первых двух уравнений (6) определяем значения составляющих магнитного момента $L_x, L_z$. Решение системы (6) принимает вид:

$$L_x = \frac{B_z}{B_y} L_y + \frac{1}{B_x}\left(\frac{K_y}{K} + \frac{K_z}{K}\frac{B_z}{B_y}\right),$$

$$(7)\quad L_y = L_{\max},$$

$$L_z = \frac{B_x}{B_y} L_y + \frac{K_z}{K B_y}.$$

**Решение 2**

Решим систему уравнений (4) в частном случае. Пусть, $L_z = 0$. При этом, из системы уравнений (4) получаем

$$L_y B_z = bK_x / K,$$

$$(8)\quad -L_x B_z = bK_y / K,$$

$$L_x B_y - L_y B_x = bK_z / K.$$

Выражая из первого уравнения системы (8) величину $L_y$, а из второго уравнения – величину $L_x$ и подставляя полученные выражения в третье уравнения, находим

$$L_x = -\frac{b}{B_z}\frac{K_y}{K},$$

$$(9)\quad L_y = \frac{b}{B_z}\frac{K_x}{K},$$

$$b\frac{K_z}{K} + b\frac{K_y}{K}\frac{B_y}{B_z} + b\frac{K_x}{K}\frac{B_x}{B_z} = 0.$$

Из последнего уравнения системы (9) следует, что полученное частное решение является решением системы (4) при выполнении условия $\vec{K} \cdot \vec{B} = 0$. Таким образом, данное решение 2, также как решение 1, справедливо для микроспутника, движущегося по экваториальной круговой орбите и совершающего прецессионное движение относительно оси, совпадающей с местной вертикалью. В окончательном виде данное частное решение имеет вид:

$$L_x = -\frac{b}{B_z}\frac{K_y}{K},$$

$$L_y = \frac{b}{B_z}\frac{K_x}{K}, \quad (10)$$

$$L_z = 0.$$

Аналогичным образом могут быть найдены частные решения системы (4) при $L_x = 0$ или $L_y = 0$.

**Результаты численного моделирования**

Рассмотрим поведение микроспутника, при использовании данных законов управления. Считаем, что микроспутник массой 100 килограмм имеет форму прямоугольного параллелепипеда с габаритными размерами 400×400×600 миллиметров в направлении главных центральных связанных осей инерции X,Y,Z соответственно. Магнитная система управления микроспутника включает: три магнитометра, измеряющие составляющие геомагнитного поля вдоль главных осей $B_x, B_y, B_z$; три электромагнитных катушки, являющиеся магнитными исполнительными органами управления (МИО), которые создают составляющие магнитного момента микроспутника $L_x, L_y, L_z$.

Вектор магнитной индукции рассчитывается по модели прямого диполя, являющейся простейшей моделью магнитного поля Земли, в которой геомагнитная ось совпадает с географической осью Земли. В этом случае проекции вектора магнитной индукции на оси орбитальной системы координат $CX_oY_oZ_o$ записываются в виде [1]:

$$B_{x0} = \mu_e \sin i \cos u / r^3,$$

$$B_{y0} = \mu_e \cos i / r^3,$$

$$B_{z0} = -2\mu_e \sin i \sin u / r^3,$$

где $i$ – наклонение орбиты ($i = 0^\circ$ – для экваториальной орбиты), $u$ – аргумент широты, $r$– радиус круговой орбиты, $\mu_e = 8.1\times10^{22}$ *Ам*$^2$ – магнитный постоянная Земли.

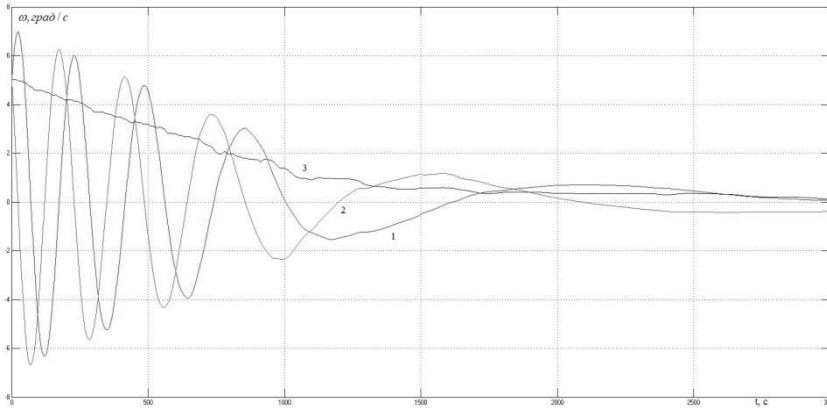
В качестве возмущающих моментов, действующих на микроспутник, учитывается влияние гравитационного и аэродинамического моментов.

Законы управления электромагнитными катушками в системе управления, уменьшающими угловую скорость микроспутника имеют несколько разновидностей. Основные законы управления вектором магнитного момента электромагнитных катушек на первом этапе предварительного успокоения традиционно имеют следующий вид: $\vec{L} = -k_{c1}\frac{d\vec{B}}{dt}$, $\vec{L} = -k_{c2}\frac{\vec{\omega}\times\vec{B}}{B^2}$ и

$\vec{L} = -k_{c3} \dfrac{\vec{K} \times \vec{B}}{B^2}$. Здесь $k_{c1}, k_{c2}, k_{c3}$ - коэффициенты управления, $B$ – модуль вектора магнитной индукции. Для сравнения будем использовать модифицированный закон управления вида:

$$(11)\quad \vec{L} = \begin{cases} -k_{ci} \vec{K} \times \vec{B} / B^2, \varepsilon_{i-1} \geq |\vec{\omega}| \geq \varepsilon_i, \\ -k_{ci+1} \vec{K} \times \vec{B} / (B^2), \varepsilon_{i+1} \leq |\vec{\omega}| \leq \varepsilon_i. \end{cases}$$

Здесь $\varepsilon_i$ – пороговые значения модуля вектора угловой скорости, $k_{ci}$ – коэффициенты управления, $k_{ci+1} = k_{ci} / d$, $i=2..n$, $n$ – количество пороговых значений. Данный закон управления показал лучшее время управления во время предыдущих исследований.

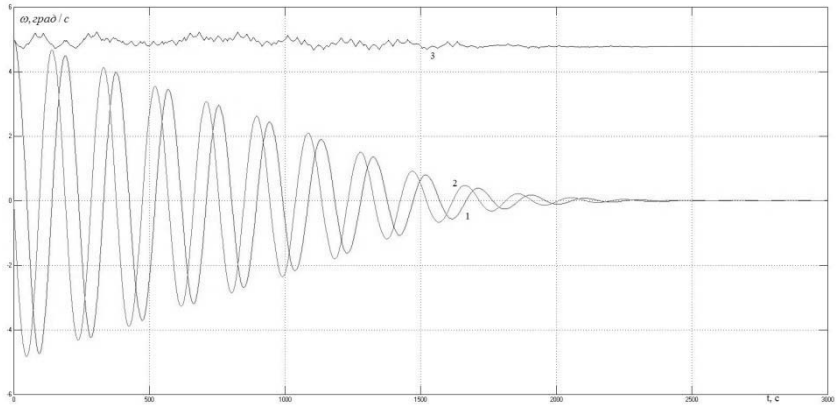



1-3 – проекции вектора угловой скорости $\omega_x, \omega_y, \omega_z$

Рисунок 1 – График изменения угловой скорости

График изменения угловой скорости при использовании закона управления (11) представлен на рисунке 1.

На рисунке 2 представлен график изменения угловой скорости при использовании закона управления (10).




1-3 – проекции вектора угловой скорости $\omega_x, \omega_y, \omega_z$

Рисунок 2 – График изменения угловой скорости

Таким образом, при использовании данного закона управление возможно уменьшение угловой скорости микроспутника по двум осям. На остальном участке траектории спутник совершает прецессионное вращение с малым углом.

**Заключение**

Время, затрачиваемое на успокоение микроспутника, при использовании закона управления (10) является наименьшим в сравнении как с наиболее используемыми законами, так и с модифицированными. Однако ограничения, накладываемые данным законом управления (экваториальная орбита, малый угол нутации) сужают область использования полученных оптимальных законов на реальных микроспутниках.

**Список литературы**


[1] Коваленко А.П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1975.

[2] Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. – М.: Высшая школа, 1998.

[3] Борисов А.В., Мамаев И.С. Динамика твердого тела – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЕКТНО-БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАНОСПУТНИКА НА УГЛОВОЕ ДВИЖЕНИЕ ПРИ СНИЖЕНИИ С НИЗКИХ КРУГОВЫХ ОРБИТ

**Л.В. Глухова, И.А. Тимбай**

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)
443086, Самара, Московское шоссе, 34, Россия
bazonchik@gmail.com, timbai@ssau.ru
тел: +7 (846)-267-45-02

***Ключевые слова:*** *проектно-баллистические параметры, аэродинамический момент, гравитационный момент, аэродинамические характеристики, спутник double CubeSat*

Abstract

The planar motion of an uncontrolled double CubeSat nanosatellite standard relative to the its center of mass under the influence of the gravitational and the restoring aerodynamic moments when descent from low circular orbits is considered. The aerodynamic characteristic to the different nature of interaction of molecules with the surface of the satellite are determined. The influence of design and ballistic parameters on the motion of the satellite is analyzed. The ranges of design and ballistic parameters that provide a prescribed angular motion are determined.

## Введение

Рассматривается плоское движение относительно центра масс неуправляемого наноспутника при снижении с низких круговых орбит под действием гравитационного и восстанавливающего аэродинамического моментов. Исследуется влияние проектно-баллистических параметров (начальных условий углового движения, запаса статической устойчивости, отношений моментов инерции) на угловое движение спутника (вращение, колебания).

Характер движения спутника относительно центра масс определяется начальными условиями углового движения, величинами гравитационного и аэродинамического моментов. По мере снижения спутника, с ростом плотности атмосферы, величина аэродинамического момента меняется, тогда, как величина гравитационного момента остается практически постоянной, что может приводить к изменению характера углового движения спутника. Так спутник, совершающий колебательное движение относительно одного положения равновесия по углу атаки, в процессе снижения может перейти «скачкообразно» в колебательное движение относительного другого положения равновесия; спутник, совершающий вращательное движение может перейти в плоские колебания и наоборот. В некоторых случаях, при незначительном изменении начальных условий углового движения, спутник может переходить в колебательные движения относительно различных положений равновесия по углу атаки. Возникает вероятностная задача.

В работе Белецкого В.В. [1] методом фазовой плоскости исследованы случаи плоского углового движения спутника на низких круговых орбитах под действием гравитационного момента и восстанавливающего аэродинамического момента, имеющего синусоидальную зависимость от угла атаки, при этом изменением плотности атмосферы в процессе движения пренебрегается. В работе [2] рассмотрены переходные режимы движения спутника относительно центра масс на начальном участке траектории спуска в атмосфере под действием восстанавливающего аэродинамического момента, который имеет вид бигармонического ряда по углу атаки, при этом действием гравитационного момента пренебрегается. В работах [3, 4]

исследуются случаи движения спутника относительно центра масс на начальном участке траектории спуска в атмосферу под действием восстанавливающего аэродинамического момента, который описывается рядом Фурье по углу атаки с тремя первыми гармониками, действием гравитационного момента при этом пренебрегается. В работе [5] методом фазовой плоскости исследованы случаи плоского движения относительно центра масс спутника при снижении с низких круговых орбит под действием гравитационного момента и восстанавливающего аэродинамического момента, который имеет вид бигармонического ряда по углу атаки. Получены формулы, позволяющие определить высоты полёта, на которых происходит изменение характера углового движения спутника, а также формулы вероятности попадания в колебания относительно того или иного положения равновесия по углу атаки. В данной работе на основе результатов, полученных в [5], проводится анализ влияния проектно-баллистических параметров на плоское угловое движение спутника стандарта double CubeSat при снижении с низких круговых орбит под действием гравитационного и восстанавливающего аэродинамического моментов.

## 1 Уравнения движения

Спутник double CubeSat представляет собой двойной куб, каждый из которых размером $0.1\times 0.1\times 0.1$ м. Введём систему координат $Oxyz$, начало которой совпадает с геометрическим центром спутника, а оси параллельны соответствующим рёбрам (рисунок 1).

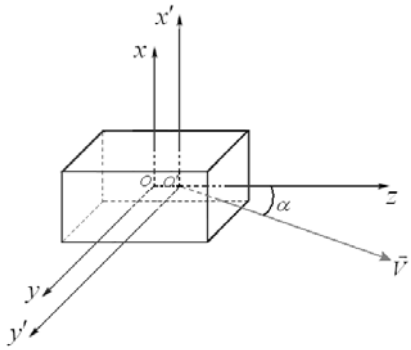



Рисунок 1

Будем полагать, что центр масс спутника $O'$ лежит на продольной оси $Oz$ на расстоянии $z_T$ от геометрического центра и главные центральные оси инерции спутника параллельны осям системы координат $Oxyz$. Введём связанную систему координат $O'x'y'z$, оси которой являются главными центральными осями инерции спутника. Считая, что движение спутника относительно центра масс происходит в плоскости орбиты и ось $O'y'$ перпендикулярна плоскости орбиты, плоское угловое движение спутника double CubeSat при снижении с низких круговых орбит под действием гравитационного момента и восстанавливающего аэродинамического момента, имеющего вид бигармонического ряда по углу атаки, описывается уравнением вида [1, 5]

$$\ddot{\alpha} + a(H)\sin\alpha + (b(H)+c)\sin 2\alpha = 0, \quad a(H) = a_0^{\alpha} Slq / A,\ b(H) = a_1^{\alpha} Slq / A, \tag{1}$$

где $\alpha$ - угол атаки (угол между продольной осью $Oz$ и вектором скорости центра масс $\vec{V}$ спутника); $a(H)$, $b(H)$ - коэффициенты моментной характеристики, обусловленные аэроди-

намическим моментом, $a_0^\alpha$ и $a_1^\alpha$ - постоянные коэффициенты; $S$ - характерная площадь; $l$ - характерный размер спутника; $q = V^2\rho(H)/2$ - скоростной напор, $V$ - скорость полёта, $H$ - высота полёта; $\rho(H) = \rho_0 \exp(-\lambda(H - H_0))$, $H_0$, $\rho_0$ - высота полёта и плотность атмосферы в начальный момент времени $t_0$, соответственно; $\lambda$ - логарифмический градиент плотности по высоте; $c = 3(B - C)\omega^2/(2A)$ - коэффициент, обусловленный действием гравитационного момента; $A$, $B$, $C$ - главные моменты инерции спутника, $A$ и $B$ - поперечные моменты инерции относительно осей $O'x'$ и $O'y'$, $C$ - продольный момент инерции; $\omega = \sqrt{\mu / R^3}$ - угловая скорость движения центра масс спутника на круговой орбите; $\mu$ - гравитационная постоянная планеты; $R$ - расстояние от притягивающего центра до спутника.

Коэффициент $c$ уравнения (1), обусловленный действием гравитационного момента, при снижении спутника с низких орбит меняется незначительно. Пренебрегая изменением расстояния от притягивающего центра до спутника, полагаем $c = const$.

Считая, что угол снижения спутника, движущегося по почти круговой орбите, мал и меняется медленно, изменение высоты по времени можно определить по приближённой формуле [6]:

$$\dot{H} = -\frac{2C_{xa}qS}{mg}V, \quad (2)$$

где $g = g_n(R_n / R)^2$; $g_n$ - ускорение свободного падения на поверхности планеты, $C_{xa}$ - коэффициент силы лобового сопротивления, $R_n$ - радиус планеты, $m$ - масса спутника.

Интеграл энергии системы (1) в случае невозмущённого движения ($a(H) = a = const$, $b(H) = b = const$) имеет вид

$$\dot{\alpha}^2/2 - a\cos\alpha - (b + c)\cos^2\alpha = E_0. \quad (3)$$

Характер движения спутника определяется соотношением величин $a$, $b$, $c$ и $E_0$ [5]:

Случай 1. $|b + c| \le 0.5|a|$. При таком соотношении спутник имеет два положения равновесия по углу атаки: устойчивое при $\alpha = 0$ и неустойчивое при $\alpha = \pi$. Вращательному движению спутника соответствует условие: $E_0 > |a| - (b + c)$, колебательному: $E_0 < |a| - (b + c)$.

Случай 2. $(b + c) > 0.5|a|, (b + c) > 0$. В этом случае $\alpha = 0$ и $\alpha = \pi$ являются устойчивыми положениями равновесия. У спутника появляются дополнительные неустойчивые положения равновесия по углам атаки $\alpha_* = \pm\arccos(-0.5a/(b + c)) + 2n\pi$ $(n = \pm 1, \pm 2, ...)$. Вращательному движению соответствует условие: $E_0 > a^2/(4(b + c))$, колебательному относительно $\alpha = 0$ или $\alpha = \pi$: $E_0 < a^2/(4(b + c))$.

Случай 3. $|b + c| > 0.5|a|$, $(b + c) < 0$. В этом случае два положения равновесия по углу атаки $\alpha_* = \pm\arccos(-0.5a/(b + c)) + 2n\pi$ $(n = \pm 1, \pm 2, ...)$ являются устойчивыми, а положение равновесия по углу атаки $\alpha = 0$ неустойчивым. Вращательному движению соответствует условие: $E_0 > |a| - (b + c)$. Колебательному движению относительно $\alpha = 0$ соответствует условие: $|a| - (b + c) > E_0 > -|a| - (b + c)$. Колебательному относительно устойчивых положений равновесия $\alpha_*$: $E_0 < -|a| - (b + c)$.

В возмущённом движении с изменением величины коэффициентов $a$ и $b$, обусловленным ростом плотности атмосферы в процессе снижения, возможно изменение характера дви-

жения спутника: вращательное движение может переходить в колебательное, колебательное движение может переходить во вращательное, колебательное движение может «скачкообразно» переходить в колебательное же движение, но с другими амплитудными характеристиками. Высоты полёта $H_*$ в моменты, соответствующие изменениям характера движения, определяются из решения трансцендентных уравнений [5]:

- для случаев 1 и 3 при переходе из вращательного движения в колебательное относительно $\alpha = 0$ и наоборот:

(4) $I_0 = 4\sqrt{2(b(\mathrm{H}_*)+c)}\left[\sqrt{u_*-1}+u_*\mathrm{arctg}\left(\sqrt{1/(\mathrm{u}_*-1)}\right)\right]$, при $(b(H_*)+c)>0$,

$I_0 = 4\sqrt{-2(b(H_*)+c)}\left[\sqrt{u_*+1}+u_*\ln\left((1+\sqrt{\mathrm{u}_*+1})/\sqrt{\mathrm{u}_*}\right)\right]$, при $(b(H_*)+c)<0$,

где $I_0 = \int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} \dot{\alpha}\, d\alpha$ - интеграл действия, вычисленный по начальным условиям движения, $\alpha_{\min}$, $\alpha_{\max}$ - амплитудные значения угла атаки (при вращении $\alpha_{\min} = -\pi$, $\alpha_{\max} = \pi$; при колебаниях $\alpha_{\min} = -\alpha_{\max}$), $u_* = |0.5a(H_*)/(b(H_*)+c)|$;

- для случая 3 при переходе из колебательного движения относительно $\alpha = 0$ в колебательное относительно одного из двух положений равновесия $\alpha_*$ и наоборот:

(5) $I_0 = 4\sqrt{-2(b(H_*)+c)}\left(\sqrt{1-u_*}-u_*\ln\left((1+\sqrt{1-u_*})/\sqrt{u_*}\right)\right)$,

- для случая 2 при переходе из колебательного движения относительно $\alpha = 0$ во вращательное:

(6) $I_0 = 2\sqrt{2(b(H_*)+c)}\left(\sin\alpha_* - \alpha_*\cos\alpha_*\right)$,

где $\alpha_* = \arccos\left(-0.5a(H_*)/(b(H_*)+c)\right)$;

при переходе из колебательного движения относительно $\alpha = \pi$ во вращательное:

(7) $I_0 = 2\sqrt{2(b(H_*)+c)}\left(\sin\alpha_* + (\pi - \alpha_*)\cos\alpha_*\right)$;

при переходе из вращательного движения в колебательное относительно одного из двух положений равновесия $\alpha = 0$ или $\alpha = \pi$:

(8) $I_0 = 4\sqrt{2(b(H_*)+c)}\left(\sin\alpha_* + (0.5\pi - \alpha_*)\cos\alpha_*\right)$;

вероятность $P$ попадания в колебания относительно $\alpha = 0$ или $\alpha = \pi$ вычисляется по формулам [5]:

(9) $\dfrac{P_{\alpha=0}}{P_{\alpha=\pi}} = \dfrac{\Theta_{\alpha=0}}{\Theta_{\alpha=\pi}}$,

(10)
$$\Theta_{\alpha=0} = f_z\left(\frac{2b(H_0)}{\sqrt{2(b(H_*)+c)}}\left[\sin\alpha_* - \alpha_*\cos\alpha_*\right] + 2\sqrt{2(b(H_*)+c)}\alpha_* v_* \sin\alpha_*\right),$$

$$\Theta_{\alpha=\pi} = f_z\left(\frac{2b(H_0)}{\sqrt{2(b(H_*)+c)}}\left[\sin\alpha_* + (\pi - \alpha_*)\cos\alpha_*\right] - 2\sqrt{2(b(H_*)+c)}(\pi - \alpha_*) v_* \sin\alpha_*\right),$$

где $f_z = -\lambda\exp(-\lambda(H - H_0))$, $v_* = \dfrac{0.5a(H_0)c}{\sqrt{1-u_*^2}\,(b(H_*)+c)^2}$.

## 2 Аэродинамические характеристики спутника

Определим аэродинамические характеристики спутника double CubeSat. Считая, что набегающий на поверхность спутника поток газа свободномолекулярный, гиперзвуковой, характер взаимодействия молекул с поверхностью зеркально-диффузный, молекулы газа испытывают однократные соударения с поверхностью спутника, нормальное $P_n$ и касательное $P_\tau$ напряжения, действующие на элементарную площадку поверхности $dS$, можно определить по формулам [7]

$$(11)\quad P_{n_i} = q\left\{(2-a_n)2\cos^2\psi_i + a_n\left[\frac{\pi(\chi-1)}{\chi}\right]^{1/2} t_w{}^{1/2}\cos\psi_i\right\},$$

$$(12)\quad P_{\tau_i} = qa_\tau 2\sin\psi_i\cos\psi_i,$$

где $\psi_i$ - местный угол наклона *i*-ого элемента поверхности к вектору скорости $\vec{V}_\infty$ набегающего потока; $a_n$, $a_\tau$ - коэффициенты аккомодации нормального и касательного импульсов; $\chi$ - отношение удельных теплоёмкостей (показатель адиабаты); $t_w = T_w / T_0$ - температурный фактор; $T_0$, $T_w$ - температура торможения и температура поверхности спутника.

Значения коэффициентов $a_n$, $a_\tau$ в выражениях (10)-(11) зависят от физических свойств газа и поверхности спутника. Величину коэффициентов определяют экспериментально. Исследования, проведённые в [8], показывают, что значения коэффициентов аккомодации для воздуха, взаимодействующего с алюминием и сталью, составляют от 0.87 до 0.97. Значения температурного фактора $t_w$ могут изменяться от 0.001 до 1 [9].

Аэродинамические характеристики (коэффициент нормальной $c_n$ и тангенциальной $c_\tau$ аэродинамических сил) определяются интегрированием зависимостей (10)-(11) по обтекаемой потоком газа поверхности спутника. Исследуем влияние величин $a_n$, $a_\tau$ и $t_w$ на аэродинамические характеристики спутника double CubeSat. На рисунке 2 приведены максимальные и минимальные значения коэффициентов $c_n$ и $c_\tau$ от угла атаки. Максимальные значения $c_{n_{\max}}$ и $c_{\tau_{\max}}$ получены при $a_n = 0.87$, $a_\tau = 0.97$, $t_w = 1$ (рисунок 2 штрих-пунктирная линия), минимальные $c_{n_{\min}}$ и $c_{\tau_{\min}}$ – при $a_n = 0.97$, $a_\tau = 0.87$, $t_w = 0.001$ (рисунок 2 пунктирная линия).

В случае когда $a_n = 1$, $a_\tau = 1$, $t_w = 0$ взаимодействие молекул с поверхностью спутника является абсолютно неупругим (все молекулы полностью теряют свою энергию при столкновении со спутником и не отражаются). В этом случае аэродинамические характеристики определяются проекцией площади спутника на плоскость перпендикулярную вектору скорости набегающего потока и могут быть вычислены по формулам:

$$(13)\quad c_n = c_0\widetilde{S}\sin(\alpha),\quad c_\tau = c_0\widetilde{S}\cos(\alpha),$$

$$(14)\quad c_0 = \left(2(2-a_n) + a_n\sqrt{\pi(\chi-1)t_w/\chi}\right),$$

где $\widetilde{S} = \left(2|\sin(\alpha)| + |\cos(\alpha)|\right)$ - проекция площади спутника на плоскость перпендикулярную вектору скорости набегающего потока, отнесённая к характерной площади.

Коэффициент $c_0$ соответствует значению $c_\tau$, полученному при условии $\alpha = 0$, и принимает значения от 2 до 3.

Значения коэффициентов $c_n$ и $c_\tau$ в случае абсолютно неупругого удара, вычисленные путём интегрирования по поверхности зависимостей (10)-(11), совпадают со значениями коэффициентов $c_n$ и $c_\tau$, вычисленными по формулам (12)-(13) (рисунок 3).

Формулы (12)-(13) могут использоваться для вычисления аэродинамических характеристик и в случае не абсолютно неупругого удара (рисунок 2 сплошная линия). При этом максимальная относительная погрешность для $c_{n_{\max}}$ и $c_{\tau_{\max}}$ составляет 13% и 17%, а для $c_{n_{\min}}$ и $c_{\tau_{\min}}$ составляет 8% и 9%.

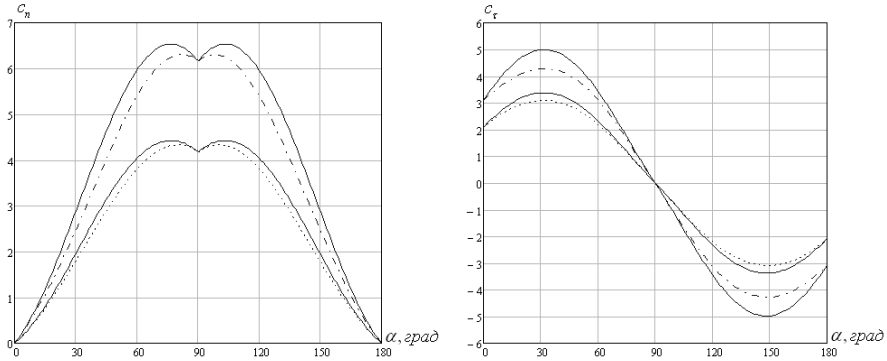



Рисунок 2 – Зависимость коэффициентов $c_n$ и $c_\tau$ от угла атаки

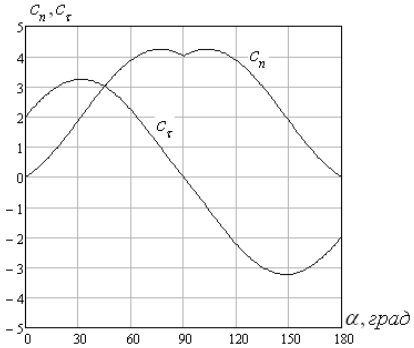



Рисунок 3 – Зависимость коэффициентов $c_n$ и $c_\tau$ от угла атаки в случае абсолютно неупругого удара

Равнодействующая аэродинамических сил приложена в геометрическом центре спутника. В этом случае коэффициент восстанавливающего аэродинамического момента определяется по формуле:

(15) $m_\alpha = -\bar{z}_T c_n$,

где $\bar{z}_T = z_T / l$, $z_T$ – положение центра масс, отсчитываемое от геометрического центра спутника.

Зависимость коэффициента $m_\alpha$ от угла атаки при $\bar{z}_T = 0.1$ приведена на рисунке 4 (штрих-пунктирная линия для $c_{n_{\max}}(\alpha)$, пунктирная линия для $c_{n_{\min}}(\alpha)$). Зависимость $m_\alpha(\alpha)$ можно с достаточной точностью аппроксимировать синусоидальной зависимостью $a_0^\alpha \sin(\alpha)$

(рисунок 4 сплошная линия). В таблице 1 приведены максимальные и минимальные значения коэффициента $a_0^{\alpha}$ для различных $\bar{z}_T$.

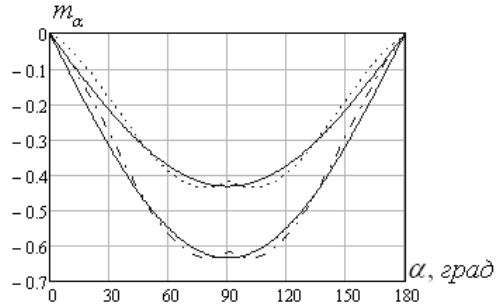



Рисунок 4 – Зависимость коэффициента $m_\alpha$ от угла атаки

Таблица 1 – Значения коэффициента $a_0^{\alpha}$ в зависимости от $\bar{z}_T$

| $\bar{z}_T$ | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 |
|---|---|---|---|---|---|
| $a_0^{\alpha}$, соответствующие $c_{n_{\min}}(\alpha)$ | -0.22 | -0.43 | -0.87 | -1.31 | -1.74 |
| $a_0^{\alpha}$, соответствующие $c_{n_{\max}}(\alpha)$ | -0.31 | -0.62 | -1.23 | -1.85 | -2.5 |

## 3 Выбор проектно-баллистических параметров, обеспечивающих заданное угловое движение

Определим проектно-баллистические параметры для динамически симметричного ($A = B$) спутника double CubeSat, обеспечивающие заданное угловое движение. На рисунках 5 и 6 изображены номограммы для выбора проектно-баллистических параметров спутника. Кривые, которые определяются уравнением (3), построены для отношений моментов инерции спутника: $C/B = 0.3$ (сплошная линия), $C/B = 0.4$ (пунктирная линия), $C/B = 0.5$ (штрих-пунктирная линия); высот: $H_0 = 380$ км, $H_0 = 245$ км; коэффициентов $a_0^{\alpha}$, соответствующих $c_{n_{\min}}(\alpha)$, и значений плотности ночной атмосферы при минимальном индексе солнечной активности [10]. Значения начальных условий углового движения над кривой соответствуют вращательному движению, под кривой – колебательному движению. Рисунки приведены для положительных значений начальной угловой скорости $\dot{\alpha}_0$ (для отрицательных значений картина симметрична относительно оси $\alpha_0$).

Как видно из рисунка 5, если спутнику double CubeSat с относительным запасом статической устойчивости $\bar{z}_T = 0.05$ и отношением моментов инерции $C/B = 0.3$ при движении с высоты $H_0 = 380$ км необходимо задать колебательное движение относительно устойчивого положения равновесия $\alpha = 0$, то надо выбрать начальные значения $\alpha_0$ и $\dot{\alpha}_0$ из заштрихованной области. Амплитудные значения угла атаки, с учётом (3), определяются из решения уравнения $E_0 = -a\cos\alpha_{\max} - (b+c)\cos^2\alpha_{\max}$.

Если же в начальный момент времени необходимо задать вращательное движение, то необходимо учитывать, что в процессе снижения спутник double CubeSat может перейти в колебательное движение относительно одного из двух устойчивых положений равновесия по углу атаки $\alpha = 0$ град или $\alpha = 180$ град. Высота перехода из вращательного движения в колебательное, а также вероятность перехода в колебательное движения относительно различных положений равновесия по углу атаки определяются из решения уравнений (8) и (9).

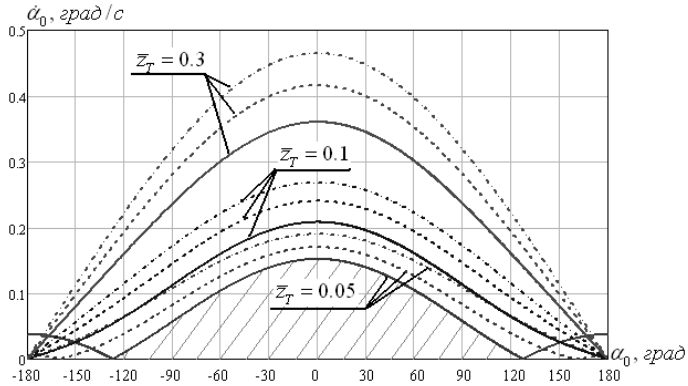



Рисунок 5 – Номограмма для выбора проектно-баллистических параметров спутника double CubeSat на высоте $H_0 = 380$ км

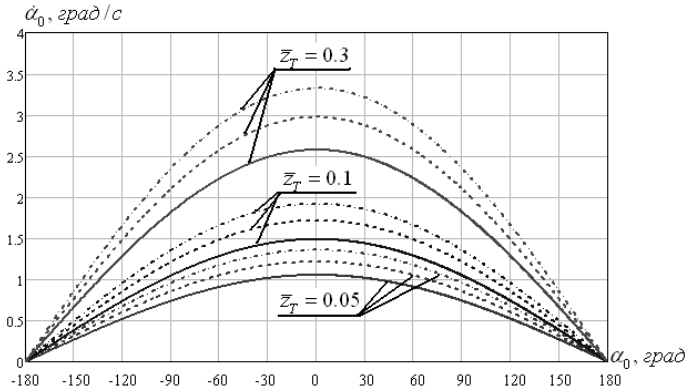



Рисунок 6 – Номограмма для выбора проектно-баллистических параметров спутника double CubeSat на высоте $H_0 = 245$ км

Номограмма, изображённая на рисунке 6, соответствует случаю, когда аэродинамический момент является преобладающим для динамически симметричного спутника double CubeSat. В этом случае в процессе снижения возможен только один переход – вращения в колебание относительно устойчивого положения равновесия по углу атаки $\alpha = 0$. Высота перехода определяется из решения уравнения (4).

Таким образом, построенные в данной работе номограммы позволяют определить проектно-баллистические параметры наноспутника double CubeSat, обеспечивающие заданное угловое движение под действием гравитационного и восстанавливающего аэродинамического моментов при снижении с низких круговых орбит.

В статье использованы результаты, полученные при выполнении работ, поддержанных Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 11-08-00644-а).

**Список литературы**


[1] Белецкий В.В. Движение искусственного спутника относительно центра масс [Текст] / В.В. Белецкий - М.: Наука, 1965.

[2] Асланов В.С., Тимбай И.А. Переходные режимы углового движения КА на верхнем участке траектории спуска [Текст]/ В.С. Асланов, И.А. Тимбай// Космические исследования. 1997. Т. 35. № 3. С. 279-286.

[3] Баринова Е.В, Тимбай И.А. Исследование плоского движения относительно центра масс спускаемого аппарата с тригармонической моментной характеристикой при входе в атмосферу // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2010. – №1 (21). – с. 9 -19.

[4] Баринова Е.В, Тимбай И.А. Исследование пространственного движения относительно центра масс спускаемого аппарата с тригармонической моментной характеристикой при входе в атмосферу // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2010. – №4 (24). – с. 11-19.

[5] Глухова, Л.В. Исследование плоского движения относительно центра масс космического аппарата под действием гравитационного и аэродинамического моментов при снижении с круговых орбит [Текст] / Л.В. Глухова, И.А. Тимбай // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2010. – №4 (24). – с. 30-37.

[6] Балк М.Б. Элементы динамики космического полёта [Текст] / М.Б. Балк - М.: Наука, 1965

[7] Бондарев, Е.Н. Аэрогидромеханика [Текст] / Е.Н. Бондарев, В.Т. Дубасов, Ю.А. Рыжов, С.Б. Свирщевский, Н.В. Семенчиков. – М.: Машиностроение, 1993. – 608 с.

[8] Авдуевский, В.С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике [Текст]: учебник для авиац. специальностей вузов / В.С. Авдуевский, Б.М. Галицейский, Г.А. Глебов и др.; под общ.ред. В.С Авдуевского, В.К. Кошкина. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 528 с.: ил.

[9] Воронич, И.В. Влияние особенностей взаимодействия газа с поверхностью на аэродинамические характеристики космического аппарата [Текст] / И.В. Воронич, З.М. Мьинт // Вестник МАИ. – 2010. – Т. 17. – № 3. – С. 59-67.

[10] Основы теории полёта космических аппаратов [Текст] / В. С. Авдуевский, Б. М. Антонов, Н. А. Анфимов и др.; под ред. Г. С. Нариманова и М. К. Тихонравова. - М.: Машиностроение, 1972. – 607 с.

# СИНТЕЗ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРОГРАММ УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

**Ю.Н. Горелов[1], С.Б. Данилов[2], Л.В. Курганская[1], А.И. Мантуров[3], М.В. Морозова[1]**

[1]Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
yungor07@mail.ru
тел: +7 (846) 333-27-70, факс: +7 (846) 333-27-70

[2]Самарский государственный университет
443011, Самара, ул. Академика Павлова, 1, Россия
тел: +7 (846) 335-86-75

[3]ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ - Прогресс»
443009, Самара, ул. Земеца, 18, Россия
csdb@samtel.ru

***Ключевые слова:*** *интегральные программы управления, план зондирования, маршрут съемки, аппаратура наблюдения, сканирование, перенацеливание, переориентация, оптимизация*

**Abstract**

The problem of synthesis of integrated program to control Earth remote sensing spacecraft angular motion at multiorbit flight intervals is discussed. Solution methods for problems connected with synthesis of integrated programs are presented. These programs realize sensing plans, namely, tasks to control scanning of arbitrary sensing paths in the coverage zone and tasks of spacecraft redirection during redirecting of on-board observation equipment. Some simulation results related to integrated control programs development and synthesis are presented.

## Введение

В настоящее время находят все более широкое применение системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, а получаемая с их помощью информация находит эффективное применение для решения задач в интересах социально-экономического развития территорий [1-4]. Дистанционное исследование Земли из космоса основано на определении геометрических, энергетических и спектральных характеристик наблюдаемых районов на ее поверхности, получаемым при обработке и анализе спектрозональных изображений [5, 6]. Для космических аппаратов (КА) ДЗЗ с оптико-электронной аппаратурой наблюдения с использованием многоэлементных фотоприемных детекторов линейного типа или линеек ПЗС (приборы с зарядовой связью) основным способом съемки является режим «push broom» (заметания) [4], осуществляемый посредством сканирования заданных маршрутов съемки, которые могут иметь произвольную конфигурацию и произвольное расположение относительно трассы полета КА в зависимости от геометрических характеристик района зондирования. Такой способ съемки применяется на КА «Ресурс-ДК» с оптико-электронным телескопическим комплексом [2, 4]. Современные требования, предъявляемые к информации ДЗЗ, обусловливают повышение требований к эффективности КА ДЗЗ по качеству получаемой информации и производительности [3, 7, 8]. При этом в значительной степени меняется характер и перечень решаемых задач по управлению движением КА ДЗЗ при наблюдении множества районов зондирования, так как они могут образовывать интенсивные потоки маршрутов съемки (МС) [7]. Управление функционированием КА ДЗЗ в таких условиях может потребовать большей эффективности, в первую очередь в части обеспечения автономности, оперативности и производительности КА

ДЗЗ, что связано с большим привлечением ресурсов бортового комплекса управления (БКУ), чем это имеет место в настоящее время. Разработка таких БКУ − актуальная проблема и ее решение напрямую связано с реализацией в БКУ задач высокого уровня. В первую очередь, к ним относится планирование процессов зондирования с помощью БКУ [7-10] и их реализация с помощью интегральных программ управления для КА ДЗЗ на длительных интервалах полета КА ДЗЗ (до нескольких десятков витков) [10, 11].

## 1 О задаче синтеза интегральных программ управления

Синтез интегральных программ управления непосредственно связан с формированием планов зондирования [10, 12, 13], с одной стороны, и с другой стороны, с решением таких задач управления: во-первых, сканирование произвольных МС, и, во-вторых, переориентации КА ДЗЗ на межмаршрутных подынтервалах при перенацеливании аппаратуры наблюдения. В свою очередь, решение указанных задач также тесно взаимосвязано в силу необходимости согласования для них граничных условий на подынтервалах сканирования и межмаршрутных переходов. При этом решение первой задачи влияет в основном на качество получаемой информации зондирования, а решение второй – на производительность КА ДЗЗ. Вместе с тем эти задачи в иерархическом отношении относятся к задачам управления нижнего уровня по отношению к задаче синтеза плана зондирования и интегральной программы управления угловым движением для КА ДЗЗ на заданном интервале планирования. То же самое относится и к критериям оптимальности для решаемых задач, то есть оптимизация плана зондирования по качеству получаемой информации и производительности КА ДЗЗ требует соответствующей оптимизации и для указанных парциальных задач управления угловым движениям КА ДЗЗ, но с привлечением, естественно, различных критериев оптимальности. В общем случае качество синтезируемой для оптимального плана зондирования интегральной программы управления будет определяться качеством решения задачи сканирования МС, включаемых в план зондирования, и качеством управления переориентацией КА ДЗЗ на межмаршрутных подынтервалах. В связи с этим отметим, что вторая задача в отличие от первой является классической задачей теории управления ориентацией КА и основная особенность ее решения связана с необходимостью согласования для нее граничных условий с граничными условиями, получаемыми для кинематических характеристик углового движения КА на подынтервалах сканирования МС, то есть здесь должен рассматриваться маневр обобщенной переориентации КА, когда начальные и конечные значения угловых скоростей и, быть может, ускорений КА ДЗЗ тождественно отличны от нулевых. В свою очередь, задача сканирования произвольного МС по своему содержанию относится к неклассическим задачам управления ориентацией КА, так как управление его угловым движением здесь формируется исходя из необходимых условий сканирования с учетом качества получаемой информации. Предваряя формулировку задачи синтеза интегральной программы управления, здесь необходимо дать более подробное описание процессов сканирования в режиме «push broom» и регистрации первичной информации зондирования с помощью оптико-электронной аппаратуры наблюдения сканирующего типа [4-6, 10].

Итак, сканирование каждого заданного маршрута съемки может выполняться в общем случае одновременно в нескольких спектральных диапазонах, а получаемая информация в цифровом виде затем передаваться на наземные пункты приема и обработки. Изображение, например, в $k$-м спектральном диапазоне – это массив (таблица) отсчетов яркости $B_k(m,n)$, $k=1,2,3,\ldots$, где $m$, $n$ – номера строк и столбцов массива, которые формируются в процессе сканирования точек земной поверхности в результате преобразования лучистой энергии фотоприемными детекторами ПЗС- линейки [4-6], а именно:

(1) $B_k(m,n) = \int_0^{\infty} E(\mathbf{r},\lambda) S_k(\lambda) d\lambda$,

где $E(\mathbf{r},\lambda)$ – спектральная яркость точки земной поверхности с радиус-вектором $\mathbf{r} = \mathbf{r}(x, y, z)$ в гринвичской системе координат (ГСК) для элемента изображения с координатами $(m,n)$, $S_k(\lambda)$ – спектральная чувствительность сканирующего устройства в *k*-м спектральном диапазоне, а $\lambda$ – длина волны излучения. Точность соответствующих характеристик наблюдаемых объектов определяется точностью соответствия между спектральной яркостью точек земной поверхности $E(\mathbf{r},\lambda)$ и элементами изображения $B_k(m,n)$ в виде композиции координатного $(m,n) \leftrightarrow \mathbf{r}(x, y, z)$ и яркостного $B_k(m,n) \leftrightarrow E(\mathbf{r},\lambda)$ соответствий, которые и определяют, в конечном счете, качество получаемой информации [5]. Кроме того, ее качество зависит также от условий сканирования МС и формирования значений $B_k(m,n)$ по сигналам с чувствительных элементов ПЗС-линейки [4, 6, 10].

Соответственно, основное необходимое условие сканирования МС имеет вид [5, 14]:

(2) $\mathbf{r}_{\text{КА}}(t) + \mathbf{r}_{\text{ЛВ}}(t) = \mathbf{r}_{\text{М}}(t), \quad \forall t \in [t_0, t_f]$,

где $\mathbf{r}_{\text{КА}}$ – радиус-вектор КА, задаваемый в ГСК кинематическими уравнениями его орбитального движения, $\mathbf{r}_{\text{М}}$ – радиус-вектор центральной линии маршрута съемки (ЦЛМ), который также должен задаваться в ГСК, а $\mathbf{r}_{\text{ЛВ}}$ – радиус-вектор линии визирования (ЛВ) бортовой аппаратуры наблюдения. Так как в (2) $\mathbf{r}_{\text{М}}(t) = \mathbf{r}_{\text{М}}(s(t))$, где s – дуговая координата, отсчитываемая вдоль ЦЛМ, то для выполнения (2) $\forall t \in [t_0, t_f]$ необходимо указывать закон сканирования заданного МС в виде

(3) $s = s(t)$,

где $s(t)$ – строго монотонно возрастающая функция, для которой имеют место: $s(t_0) = 0$ – для начального момента времени и для момента окончания сканирования МС – $s_f = s(t_f)$. Еще одно необходимое условие сканирования заданного МС связано с требуемой текущей ориентацией КА ДЗЗ в пространстве [10,14], которая определяет направление скорости бега изображения текущей точки ЦЛМ в фокальной плоскости бортовой аппаратуры наблюдения – $\mathbf{w}$. А именно, требуется, чтобы вектор $\mathbf{w}$ был ортогонален приемной линейке ПЗС [14,15]. Кроме того, текущее значение модуля вектора $\mathbf{w}$ должно быть согласовано с режимом записи ПЗС-линейки [4]. Указанные и некоторые другие необходимые условия сканирования определяют точность координатного соответствия $(m,n) \leftrightarrow \mathbf{r}(x, y, z)$ и качество получаемой информации (изображения) в виде $B_k(m,n)$ (1).

Переходя к постановке задачи синтеза интегральной программы управления КА ДЗЗ, введем в рассмотрение множество потенциальных МС, которые доступны для сканирования в пределах полосы обзора КА ДЗЗ в заданных районах зондирования на некотором интервале планирования $[T_0, T_f]$. Полоса обзора КА ДЗЗ формируется в силу его кинематических уравнений движения:

(4) $\mathbf{r}_{\text{КА}} = \mathbf{r}_{\text{КА}}(t), \quad \forall t \in [T_0, T_f]$,

а МС в общем случае должны задаваться моделями ЦЛМ [14]:

(5) $\mathbf{r}_{\mathrm{M}}^{(k)} = \mathbf{r}_{\mathrm{M}}^{(k)}(s),\ s \in [0, s_f^{(k)}],\ k = 1, 2, 3, ..., K_{\Pi}$,

где $K_{\Pi}$ – количество маршрутов съемки в полосе обзора. МС характеризуются рядом условий зондирования, которые можно задавать в виде некоторого множества – $U_k$ [10, 12]; к его элементам обычно относят момент начала и продолжительность сканирования МС, условия освещенности и контрастность объекта съемки и т.п.

Индексацию МС (5) в их потоке в полосе обзора можно ввести в порядке возрастания моментов времени $t_k$ начала их прохождения траверза КА. Множество $[1, 2, ..., K_{\Pi}]$ вместе с атрибутами возможных МС, то есть с учетом $t_k$, $U_k$, $k = 1, 2, ..., K_{\Pi}$, образует их множество:

(6) $\mathbf{M}_{\Pi} = \{k, t_k, U_k\}_{k=1,2,...,K_{\Pi}}$.

План зондирования − это подмножество номеров МС $k_j \in [1, 2, ..., K_{\Pi}]$, $j = 1, 2, ..., J_{\Pi}$, где $J_{\Pi}$ – число МС, включенных в план зондирования (в порядке возрастания номеров j ): $0 < J_{\Pi} \le K_{\Pi}$. При этом расчетное время начала сканирования $t_{k_j}^*$ может не совпадать с $t_{k_j}$ с точностью до вариации для $t_k$ ($|\Delta t_{k_j}| \le \Delta t_{k_j}^*$).

Согласно $\{k_j\}_{j=1,2,...,J_{\Pi}} \subseteq [1, 2, ..., K_{\Pi}]$ каждому плану зондирования на множестве (6) можно поставить в соответствие, с учетом замены $t_{k_j}$ на $t_{k_j}^*$ и $U_{k_j}$ на $U_{k_j}^*$, его подмножество

(7) $\mathbf{M}_{\Pi}^* = \{k_j, t_{k_j}^*, U_{k_j}^*\}_{j=1,2,...,J_{\Pi}}$,

где $U_{k_j}^*$ – условия зондирования $k_j$ -го МС, при включении его в план зондирования на интервале $[T_0, T_f]$. Следует отметить, что при формировании планов зондирования (7) можно использовать любые допустимые программы управления угловым движением КА ДЗЗ при решении задач сканирования МС и при его переориентации на межмаршрутных подынтервалах.

План (7) определяет структуру интегральной программы управления угловым движением КА ДЗЗ на интервале $[T_0, T_f]$. Для разработки алгоритмов его синтеза существенное значение имеет выбор показателей оптимальности, которые могут отличаться от показателей качества управления парциальных задач. Ориентируясь на схемы динамического программирования, в [10,12,13] в качестве таких показателей было предложено выбирать определенного вида аддитивные функции «выигрыша» от включения k-го МС из множества (6) в план зондирования (7). Интерпретация оптимальности плана зондирования определяется их видом [12,13]. Разработанный алгоритм формирования оптимальных планов зондирования на многовитковых интервалах полета КА ДЗЗ для множеств (6), включавших до нескольких тысяч МС с длительностью от нескольких секунд до нескольких десятков секунд по результатам моделирования подтвердил эффективную возможность одновременного синтеза структуры и оптимизации интегральных программы управления угловым движением КА ДЗЗ на многовитковых интервалах полета $[T_0, T_f]$.

## 2 Задача оптимального сканирования маршрута съемки в режиме «push broom»

Структура интегральной программы управления угловым движением КА ДЗЗ находится при формировании плана зондирования, а ее оптимизация (и соответствующая оптимизация плана зондирования), в первую очередь, по качеству получаемой информации зондирования

во многом определяется законами сканирования маршрутов съемки. Разработка методов синтез таких законов для сканирования произвольных МС – важная задача прикладной теории управления КА ДЗЗ [10, 14].

Базовыми элементами в задаче синтеза законов оптимального сканирования являются [10, 14]: во-первых, геометрическая модель МС, а точнее, его ЦЛМ; во-вторых, необходимые условий сканирования, и, наконец, критерии качества сканирования МС. Общая математическая модель МС представляется подходящей геометрической аппроксимацией физической поверхности Земли (ее рельефа) в пределах полосы сканирования и задаваемой на ней ЦЛМ в виде (5): $\mathbf{r}_{\text{М}} = \mathbf{r}_{\text{М}}(s)$ (здесь и далее номер МС для удобства записи опускается). Соответственно, зависимость (3) – заданный или искомый закон сканирования, с учетом которого $\mathbf{r}_{\text{М}}(t) = \mathbf{r}_{\text{М}}(s(t))$, и, стало быть, радиус-вектор ЛВ тогда определяется из основного необходимого условия (2). В общем случае, когда требуется найти закон сканирования МС, условие (2) следует переписать в виде [14]:

(8) $\mathbf{r}_{\text{ЛВ}}(t,s) = \mathbf{r}_{\text{М}}(s) - \mathbf{r}_{\text{КА}}(t)$, $\forall t \in [t_0, t_f] \subset [T_0, T_f]$, $\forall s \in [0, s_f]$.

Качество сканирования заданного МС определяется многими факторами и, в конечном счете, реализуемым законом сканирования $s = s(t)$, как решения следующего дифференциального уравнения [10, 14, 15]:

(9) $\dfrac{ds}{dt} = v_{\text{М}}$, $\quad s(t_0) = 0$,

где $v_{\text{М}}$ – модуль вектора скорости сканирования $\mathbf{v}_{\text{М}} = v_{\text{М}}\, d\mathbf{r}_{\text{М}} / ds$ или, что то же самое, скорость скольжения конца ЛВ по ЦЛМ. Ее величина определяется условиями сканирования маршрута съемки, к которым относятся: 1) условие совмещения оси визирования бортовой съемочной аппаратуры КА ДЗЗ с радиус-вектором $\mathbf{r}_{\text{ЛВ}}$ (8); 2) условие пропорциональности проекции вектора скорости $\mathbf{v}_{\text{М}}$ на фокальную плоскость бортовой съемочной аппаратуры КА ДЗЗ и вектора скорости бега изображения сканируемой точки ЦЛМ – $\mathbf{w}$, а именно [9, 10, 14]:

(10) $v_{\text{М}} = P(t,s)w$,

где $w = |\mathbf{w}|$, а $P(t,s)$ – некоторая заданная функция; 3) ортогональность проекции вектора $\mathbf{v}_{\text{М}}$ на фокальную плоскость, и, стало быть, вектора $\mathbf{w}$, приемной линейке ПЗС.

Отметим, что при сканировании в режиме «push broom» в каждый момент времени (точнее, за время накопления зарядовых пакетов в соответствующих элементах ПЗС-линейки) с учетом закона $s = s(t)$ экспонируется элементарная полоска $d\mathbf{P}_{\text{М}}(s)$ на поверхности Земли [4-6, 14], скан которой отвечает соответствующей строке изображения (1). Полоска $d\mathbf{P}_{\text{М}}(s)$ образуется как пересечение поверхности Земли и сектора сканирования бортовой аппаратуры – $\mathbf{S}_{\text{М}}$, нормалью к которому является орт $\mathbf{n}_{\text{S}}$. При выполнении перечисленных необходимых условий орт $\mathbf{n}_{\text{S}}$ направлен по вектору $\mathbf{r}_{\text{ЛВ}} \times (\mathbf{v}_{\text{М}} \times \mathbf{r}_{\text{ЛВ}})$. Качество сканирования полоски $d\mathbf{P}_{\text{М}}$ зависит от многих факторов, к которым в первую очередь относятся [3-7, 10, 14, 15]: 1) разрешающая способность для элементарных полосок; 2) т.н. «смазы», обусловленные разностью скоростей бега изображений изображений точек полосок в фокальной плоскости аппаратуры наблюдения [9], и, соответственно, 3) дефокусировка для изображений точек элементарных полосок за счет различных дальностей от них до КА ДЗЗ. Для описания этих факторов введем в рассмотрение ЛВ для точек одной полоски $d\mathbf{P}_{\text{М}}$. В пределах сектора $\mathbf{S}_{\text{М}}$ эти ЛВ (боковые

ЛВ, в отличие от ЛВ для ЦЛМ) задаются ортами: $\mathbf{e}_{\text{ЛВ}}^{(\varepsilon)} = \mathbf{e}_{\text{ЛВ}} \cos\varepsilon + (\mathbf{e}_{\text{ЛВ}} \times \mathbf{n}_{\text{S}}) \sin\varepsilon$, $-\varepsilon_0 \le \varepsilon \le \varepsilon_0$, где $\mathbf{e}_{\text{ЛВ}} = \mathbf{e}_{\text{ЛВ}}^{(0)}$ – орт центральной ЛВ ($\varepsilon = 0$), а $\varepsilon_0$ – параметр полосы захвата аппаратуры наблюдения. Орты $\mathbf{e}_{\text{ЛВ}}^{(\varepsilon)}$ лежат в плоскости сектора $\mathbf{S}_{\text{M}}$. В общем случае, $D_\varepsilon = |\mathbf{r}_{\text{ЛВ}}^{(\varepsilon)}|$ – наклонные дальности для них отличаются от дальности для точки ЦЛМ $D = D_0 = |\mathbf{r}_{\text{ЛВ}}|$. Параметр $\delta D_\varepsilon = D_0 / D_\varepsilon$ будет определять степень дефокусировки для изображения точек $M_\varepsilon \in d\mathbf{P}_{\text{M}}$. Кроме того, для них векторы скорости бега в фокальной плоскости $\mathbf{w}_\varepsilon = w_\varepsilon \mathbf{n}_{\text{S}} + \Delta w_\varepsilon (\mathbf{e}_{\text{ЛВ}} \times \mathbf{n}_{\text{S}})$ также будут отличаться от $\mathbf{w}_0 = \mathbf{w}^*$, где $\mathbf{w}^*$ – некоторое заданное настроечное значение для точек ЦЛМ; здесь $w_\varepsilon = w_\varepsilon(t, s, w_0, \varepsilon, \delta D_\varepsilon)$, $\Delta w_\varepsilon = \Delta w_\varepsilon(t, s, w_0, \varepsilon, \delta D_\varepsilon)$ – поперечные и продольные компоненты (относительно ПЗС-линейки). Соответственно, для этих же точек разрешающая способность будет пропорциональна величине $\dfrac{D_\varepsilon p}{\cos\beta_\varepsilon}$, где $p$ – размер пиксела для ячеек ПЗС-линейки, а $\cos\beta_\varepsilon = -\mathbf{e}_{\text{ЛВ}}^{(\varepsilon)} \cdot \mathbf{r}_{\text{M}_\varepsilon} / r_{\text{M}_\varepsilon}$. Таким образом, качество изображений точек элементарной полоски $d\mathbf{P}_{\text{M}}$ для заданной функции $w = w_0(t, s)$ будет определяться интегралом

$$G(t, s, w) = \frac{1}{2\varepsilon_0} \int_{-\varepsilon_0}^{+\varepsilon_0} R(t, s, w, \varepsilon)) d\varepsilon ,$$

где $R$ – функция качества сканирования, учитывающая влияние на него перечисленных выше факторов и, быть может, иных факторов, также влияющих на качество получаемой информации.

Поскольку полоска $d\mathbf{P}_{\text{M}}$, ширина которой равна $ds$, только элементарная часть полосы сканирования МС, то качество ее сканирования будет определяться величиной $G(t, s, w) ds$, то есть качество сканирования всего МС тогда можно определить величиной интеграла

$$(11)\quad J = \frac{1}{s_f} \int_0^{s_f} G(t, s, w)\, ds ,$$

Для некоторой функции $w = \tilde{w}_0(t, s) > 0$ в силу (9), (10) можно получить закон сканирования $s = s(t)$, где $s(t)$ является строго монотонно возрастающей функцией. Следовательно, в (11) допустима замена переменной $s$ на $t$ и, стало быть, тогда показатель качества сканирования (11) можно привести к следующему виду:

$$(12)\quad J = \frac{1}{s_f} \int_0^{s_f} G(t, s, w)\, ds = \frac{1}{s_f} \int_{t_0}^{t_f} G(t, s, w) P(t, s) w dt = \int_{t_0}^{t_f} F(t, s, w) w dt ,$$

где $t_f$ – нефиксированный момент времени завершения сканирования МС, который определяется, в конечном счете, законом сканирования; то же самое может иметь место и для момента $t_0$ (если допустимо его варьирование). Управляющий параметр в (12) по условиям настройки ПЗС-линейки будет удовлетворять следующим ограничениям:

$$(13)\quad 0 < w_{\min} \le w \le w_{\max} < \infty .$$

Поскольку оптимальному закону сканирования заданного МС по физическому содержанию должен отвечает минимум функционала (12), то можно сформулировать следующую вариационную задачу [14, 15]: найти такое допустимое управление $w = w_{\text{opt}}(\cdot)$, которое удовлетворяет ограничениям (13) и доставляет минимум функционалу (12) с учетом дифференциальной связи:

(14) $\dot{s} = P(t, s)\, w$,

и граничным условиям для нее:

(15) $s(t_0) = 0$; $\quad s(t_f) = s_f$.

Отметим, что в формулировке задачи оптимального управления (12) – (15) моменты времени $t_f$ и, быть может, $t_0$ не фиксированы. Кроме того, в этой задаче имеются следующие особенности: во-первых, подынтегральная функция в (12) «квазилинейна» по управляющему параметру $w$, и, во-вторых, дифференциальная связь (14) является линейной по $w$. Все это существенно как для разработки, так и для выбора метода решения задачи (12)-(15), в том числе базирующихся на принципе максимума Понтрягина. В [15] изложен соответствующий алгоритм решения задачи (12)-(15), который при дополнительной модификации допускает реализацию средствами БКУ.

## 3 Об одном подходе к решению задачи оптимального управления переориентацией КА ДЗЗ на межмаршрутных подынтервалах

Возможности оптимизации интегральной программы управления угловым движением КА ДЗЗ и, соответственно, плана зондирования по показателю производительности тесно связано с оптимизацией межмаршрутных переходов, то есть оптимальной переориентации КА ДЗЗ при перенацеливании его аппаратуры наблюдения. В связи с этим в [16] был предложен подход к решению задачи оптимальной переориентации КА ДЗЗ с произвольными граничными условиями для кинематических характеристик углового движения. Последнее обусловлено тем, что эти граничные условия при синтезе интегральной программы необходимо согласовывать с соответствующими граничными условиями на подынтервалах сканирования.

Итак, далее рассматривается вращательное движение КА ДЗЗ вокруг центра масс [16]:

(16) $\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{N}(\boldsymbol{\sigma})\tilde{\boldsymbol{\omega}}$; $\quad \dot{\tilde{\boldsymbol{\omega}}} = \mathbf{u} + \mathbf{f}_{\omega}$,

где $\boldsymbol{\sigma} = \text{col}\,(\vartheta, \gamma, \psi)$ – вектор параметров ориентации КА в орбитальной системе координат, $\vartheta$ – угол тангажа, $\gamma$ – угол крена и $\psi$ – угол рысканья; $\tilde{\boldsymbol{\omega}}$ – вектор угловой скорости КА в ОСК, которая вращается с угловой скоростью $\boldsymbol{\omega}_{\text{ОСК}}(t)$ ($\boldsymbol{\omega} = \tilde{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{ОСК}}$ – вектор абсолютной угловой скорости КА); $\mathbf{u}$ – вектор управляющих параметров, а $\mathbf{f}_{\omega} = \mathbf{f}_{\omega}(t, \boldsymbol{\sigma}, \tilde{\boldsymbol{\omega}})$ – вектор-функция, определяемая гироскопическим и иными возмущающими моментами. Соответственно, для выбранных параметров ориентации $\mathbf{N}(\boldsymbol{\sigma}) = \begin{bmatrix} -\sin\psi/\cos\gamma & 0 & \cos\psi/\cos\gamma \\ \cos\psi & 0 & \sin\psi \\ \sin\psi\,\sin\gamma/\cos\gamma & 1 & -\cos\psi\,\sin\gamma/\cos\gamma \end{bmatrix}$.

Маневр переориентации КА ДЗЗ в ОСК задается граничными условиями:

(17) $\boldsymbol{\sigma}(t_0) = \boldsymbol{\sigma}_0$; $\quad \boldsymbol{\sigma}(t_f) = \boldsymbol{\sigma}_f$,

(18) $\boldsymbol{\omega}(t_0) = \boldsymbol{\omega}_0$; $\quad \boldsymbol{\omega}(t_f) = \boldsymbol{\omega}_f$,

где $\boldsymbol{\sigma}_0$, $\boldsymbol{\sigma}_f$, $\boldsymbol{\omega}_0$, $\boldsymbol{\omega}_f$ – значения параметров для начальной и конечной ориентации (состояния) КА, а $[t_0, t_f]$ – заданный интервал управления.

При малых угловых движениях и скоростях КА система (16) распадается на подсистемы, описывающие вращательное движение по соответствующим каналам управления, и при этом $\boldsymbol{\sigma} \approx \boldsymbol{\pi}$, где $\boldsymbol{\pi}$ – вектор квазикоординат, отвечающих параметрам ориентации $\boldsymbol{\sigma}$. Но тогда в (16) первое уравнение можно заменить следующим кинематическим соотношением: $\dot{\boldsymbol{\pi}} = \widetilde{\boldsymbol{\omega}}$, то есть уравнения (16) заменить следующей системой:

(19) $\dot{\boldsymbol{\pi}} = \widetilde{\boldsymbol{\omega}}$; $\dot{\widetilde{\boldsymbol{\omega}}} = \mathbf{u} + \mathbf{f}_\omega$,

а также граничные условия (17) − следующими условиями:

(20) $\boldsymbol{\pi}(t_0) = \boldsymbol{\pi}_0$; $\boldsymbol{\pi}(t_f) = \boldsymbol{\pi}_f$,

где в силу определения квазикоординат можно принять $\boldsymbol{\pi}_0 = 0$, а $\boldsymbol{\pi}_f$ – вектор их значений в конечный момент времени. Если в (19) также предположить, что $\mathbf{f}_\omega$ – некоторая известная на интервале управления вектор-функция времени, тогда эту систему можно рассматривать как линейную управляемую систему, для которой, как и для (16) можно сформулировать двухточечную граничную задачу [17]: найти допустимое управление $\mathbf{u}(\cdot) \in L_q$, удовлетворяющее соответствующим граничным условиям.

В задачах оптимального управления переориентацией КА, при тех же условиях, требуется дополнительно минимизировать (или максимизировать) некоторые функционалы – показатели качества управления, которые можно выбирать, например, как норму $\mathbf{u}(\cdot)$ в функциональных пространствах $L_q[t_0, t_f]$, $1 \le q \le \infty$ [17]:

(21) $J(u(\cdot)) = \| \mathbf{u}(\cdot) \|_{L_q}^{(\nu)} \to \min$,

где $\| \mathbf{u}(\cdot) \|_{L_q}^{(\nu)} = \left( \int_{t_0}^{t_f} \| \mathbf{u}(\tau) \|_\nu^q \, d\tau \right)^{\frac{1}{q}}$ при $1 \le q < \infty$, $\| \mathbf{u}(\tau) \|_\nu$ – гельдеровская норма $\mathbf{u}(\tau)$ ($\forall \tau \in [t_0, t_f]$, $1 \le \nu \le \infty$); если $q = \infty$, то $\| \mathbf{u}(\cdot) \|_{L_\infty}^{(\nu)} = \operatorname{\mathbf{vrai}}\max_{\tau \in [t_0, t_f]} \| \mathbf{u}(\tau) \|_\nu$. Разные сочетания $q$ и $\nu$ в (21) приводят к разным по содержанию постановкам задач оптимального управления (17) – (21), которые эффективно решаются при сведении к оптимальной проблеме моментов [17].

Очевидно, что если бы можно было указать значение $\boldsymbol{\pi}_f$ в (20) с учетом (17), то можно было бы сразу получить оптимальное управление и для задачи (17) – (19), (21):

(22) $\mathbf{u}^*(t) = \mathbf{u}^*(t; \mathbf{c}_\pi, \mathbf{c}_\omega, \boldsymbol{\pi}_f)$, $\forall t \in [t_0, t_f]$,

где $\mathbf{c}_\pi = \boldsymbol{\pi}_f - T\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_0 - \mathbf{g}_{1\mathbf{f}}$ $(T = t_f - t_0)$, $\mathbf{c}_\omega = \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_f - \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_0 - \mathbf{g}_{2\mathbf{f}}$, $\mathbf{g}_{1f} = \mathbf{g}_1(t_f)$, $\mathbf{g}_{2f} = \mathbf{g}_2(t_f)$, а $\mathbf{g}_1(t)$ и $\mathbf{g}_2(t)$ – решение следующей системы: $\dot{\mathbf{g}}_1 = \mathbf{g}_2$; $\dot{\mathbf{g}}_2 = \widetilde{\mathbf{f}}_\omega(t)$; $\mathbf{g}_1(t_0) = 0$; $\mathbf{g}_2(t_0) = 0$, где $\widetilde{\mathbf{f}}_\omega(t) = \mathbf{f}_\omega(t, \boldsymbol{\sigma}(t), \widetilde{\boldsymbol{\omega}}(t))$. Особенности замены задачи управления (16)-(18), (21) задачей (19)-(21) заключаются в следующем: во-первых, для заданных условий (17) заранее нельзя указать значение $\boldsymbol{\pi}_f$ (если $\mathbf{N}(\boldsymbol{\sigma}) \cong \mathbf{E}_3$, то $\boldsymbol{\pi}_f \cong \boldsymbol{\sigma}_f - \boldsymbol{\sigma}_0$); во-вторых, введение функции $\widetilde{\mathbf{f}}_\omega(t)$ приводит к «квазилинеаризации» системы (16) и возможности синтеза (22) методом моментов.

Принимая вначале в (19) $\widetilde{\mathbf{f}}_{\omega}(t) \equiv 0$, нетрудно найти, например, методом градиентного спуска такое значение $\boldsymbol{\pi}_f = \boldsymbol{\pi}_f^{(0)}$, что с учетом (22) решение следующей системы:

$$\dot{\boldsymbol{\pi}}^{(0)} = \widetilde{\boldsymbol{\omega}}^{(0)}; \quad \dot{\widetilde{\boldsymbol{\omega}}}^{(0)} = \mathbf{u}^{(0)}(t) = \mathbf{u}^*(t; \mathbf{c}_{\pi}, \mathbf{c}_{\omega}, \boldsymbol{\pi}_f^{(0)}); \quad \dot{\boldsymbol{\sigma}}^{(0)} = \mathbf{N}(\boldsymbol{\sigma}^{(0)})\widetilde{\boldsymbol{\omega}}^{(0)},$$

будет удовлетворять (с требуемой точностью) граничным условиям (17), (18), (20) и, более того, это решение можно принять в качестве нулевого приближения для задачи (18)-(21). Переходя к отысканию следующего приближения решения этой же задачи, следует принять: $\widetilde{\mathbf{f}}_{\omega}^{(0)}(t) = \mathbf{f}_{\omega}(t, \boldsymbol{\sigma}^{(0)}(t), \widetilde{\boldsymbol{\omega}}^{(0)}(t))$, а также учесть наличие (нулевых в этом, но не в последующих приближениях) поправок $\mathbf{g}_{1f}^{(0)} = 0$ и $\mathbf{g}_{2f}^{(0)} = 0$. Таким образом, требуется найти такое значение $\boldsymbol{\pi}_f = \boldsymbol{\pi}_f^{(1)}$, чтобы и в этом случае выполнялись с требуемой точностью граничные условия (17), (18), (20).

В общем случае построение $k$-го приближения для решения рассматриваемой задачи сводится к отысканию $\boldsymbol{\pi}_f = \boldsymbol{\pi}_f^{(k)}$ и соответствующего ему решения системы

(23) $\dot{\boldsymbol{\pi}}^{(k)} = \widetilde{\boldsymbol{\omega}}^{(k)}; \quad \dot{\widetilde{\boldsymbol{\omega}}}^{(k)} = \mathbf{u}^{(k)}(t) + \widetilde{\mathbf{f}}_{\omega}^{(k-1)}(t); \quad \dot{\boldsymbol{\sigma}}^{(k)} = \mathbf{N}(\boldsymbol{\sigma}^{(k)})\widetilde{\boldsymbol{\omega}}^{(k)}, \ (k = 1, 2, 3, \ldots),$

где $\widetilde{\mathbf{f}}_{\omega}^{(k-1)}(t) = \mathbf{f}_{\omega}(t, \boldsymbol{\sigma}^{(k-1)}(t), \widetilde{\boldsymbol{\omega}}^{(r-1)}(t))$, $\mathbf{u}^{(k)}(t) = \mathbf{u}^*(t; \mathbf{c}_{\pi}^{(k)}, \mathbf{c}_{\omega}^{(k)}, \boldsymbol{\pi}_f^{(k)})$, $\mathbf{c}_{\pi}^{(k)} = \boldsymbol{\pi}_f^{(k)} - T\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_0 - \mathbf{g}_{1f}^{(k-1)}$, $\mathbf{c}_{\omega}^{(k)} = \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_f - \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_0 - \mathbf{g}_{2f}^{(k-1)}$, а $\mathbf{g}_{1f}^{(k-1)} = \mathbf{g}_1^{(k-1)}(t_f)$, $\mathbf{g}_{2f}^{(k-1)} = \mathbf{g}_2^{(k-1)}(t_f)$ – значения поправок, получаемых при решении системы $\dot{\mathbf{g}}_1 = \mathbf{g}_2$; $\dot{\mathbf{g}}_2 = \widetilde{\mathbf{f}}_{\omega}(t)$; $\mathbf{g}_1(t_0) = 0$; $\mathbf{g}_2(t_0) = 0$, но с вектор-функцией $\widetilde{\mathbf{f}}_{\omega}^{(k-1)}(t)$. При $k \to \infty$ для итерационного процесса (23) имеет место: $\boldsymbol{\pi}_f^{(k)} \to \boldsymbol{\pi}_f^*$; $\mathbf{g}_{1f}^{(k)} \to \mathbf{g}_{1f}^*$; $\widetilde{\mathbf{g}}_{2f}^{(k)} \to \mathbf{g}_{2f}^*$, где $\mathbf{g}_{1f}^*$ и $\mathbf{g}_{2f}^*$ такие, что $\mathbf{c}_{\pi}^* = \boldsymbol{\pi}_f^* - T\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_0 - \mathbf{g}_{1f}^*$, $\mathbf{c}_{\omega}^* = \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_f - \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_0 - \mathbf{g}_{2f}^*$, а $\mathbf{u}^*(t) = \mathbf{u}^*(t; \mathbf{c}_{\pi}^*, \mathbf{c}_{\omega}^*, \boldsymbol{\pi}_f^*)$ – оптимальная программа управления (22) для задачи управления (16)-(18), (21). Указанные выше пределы существуют, что можно доказать при использовании для системы (16) схемы последовательных приближений Пикара [16].

Результаты моделирования синтеза оптимального управления в задаче (16)-(18), (21) с функционалом $\|\mathbf{u}(\cdot)\|_{L_2}^{(2)}$ показали высокую эффективность предложенного алгоритма вычисления приближенного решения указанной задачи (с точностью до нескольких угловых секунд), что вполне приемлемо при формировании программы оптимального управления переориентацией КА дистанционного зондирования Земли на межмаршрутных интервалах при перенацеливании аппаратуры зондирования [17].

**Заключение**

Рассмотрен подход к синтезу интегральных программ управления угловым движением КА ДЗЗ на длительных интервалах полета (до нескольких десятков витков), формирование которых тесно связано с задачей построения оптимальных планов зондирования для заданного множества МС. Структура этих программ определяется последовательностью чередующихся подынтервалов сканирования МС и межмаршрутных переходов, необходимых для перенацеливания аппаратуры наблюдения КА ДЗЗ. Оптимизация интегральных программ управления, как и планов зондирования, связана с оптимизацией управления сканированием произвольных МС и переориентации КА ДЗЗ при переходах к сканированию следующего по плану МС, а также с согласованием граничных условий для этих задач управления. В связи с этим рассмот-

рены постановки и подходы к решению задачи синтеза законов оптимального сканирования произвольных МС с учетом качества первичной информации зондирования в режиме «push broom» и задачи оптимальной переориентации КА ДЗЗ при перенацеливании аппаратуры зондирования. По результатам моделирования процедуры формирования оптимальных планов зондирования с использованием схемы динамического программирования было установлено, что эффективность синтеза интегральных программ управления для КА ДЗЗ определяется не только выбором методов для синтеза таких планов, как задачи оптимизации иерархически более высокого уровня, но и условиями согласования граничных условий для парциальных задач управления угловым движением КА ДЗЗ. Моделирование подтвердило эффективность предложенных подходов к решения задач, связанных с синтезом интегральных программ управления угловым движением КА ДЗЗ на временных интервалах полета до нескольких десятков витков и на множествах до одной тысячи МС.

**Список литературы**


[1] Гершензон О., Пупышева Н. Спутниковая съемка – весь спектр решений для пользователей // Аэрокосмический курьер, 2008, № 6 – С. 26-27.

[2] Космический комплекс оптико-электронного наблюдения «Ресурс-ДК1» // Б.А. Абрамов, Ю.А. Лапутин, В.К. Скирмунт, Л.К. Львова // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. – 2001. – № 2(29)–3(30). – С.42–45.

[3] Соллогуб А.В., Аншаков Г.П., Данилов В.В. Комические аппараты систем зондирования поверхности Земли.– М.: Машиностроение, 1993. – 368 с.

[4] Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 234 с.

[5] Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 288 с.

[6] Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.

[7] Аншаков Г.П., Мантуров А.И., Усталов Ю.М., Горелов Ю.Н., Горелова О.И., Данилов С.Б. Моделирование программ управления угловым движением космического аппарата дистанционного зондирования при сканировании набегающего потока районов наблюдения // Сб. тр. XII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным системам. СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2005. – С. 58–64.

[8] Аншаков Г.П., Макаров В.П., Мантуров А.И., Мостовой Я.А. Методы и средства управления в высокоинформативном наблюдении Земли из космоса // Сб. тр. XIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным системам. СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2007. – С. 165–173.

[9] Аншаков Г.П., Мантуров А.И, Усталов Ю.М, Горелов Ю.Н. Управление угловым движением КА дистанционного зондирования // Всерос. научно-технический журнал «Полет», 2006, № 6. – С.12–18.

[10] Горелов Ю.Н., Данилов С.Б., Аншаков Г.П., Мантуров А.И., Усталов Ю.М. Теоретические основы и методы синтеза интегральных программ управления угловым движением космических аппаратов дистанционного зондирования множества районов наблюдения переменного состава на длительных временных интервалах // Сб. тр. XVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным системам. СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – С. 232-244.

[11] Горелов Ю.Н. Интегральные программы управления угловым движением космического аппарата дистанционного зондирования Земли // Обозрение прикладной и промышленной математики, 2008, т.15, в.3. С.1063 – 1065.

[12] Горелов Ю.Н., Горелова О.И., Данилов С.Б. Формирование оптимальных планов сканирования для космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Обозрение прикладной и промышленной математики, 2009, т.16, в.2. С.310-312.

[13] Горелов Ю.Н., Горелова О.И., Данилов С.Б. О критерии оптимальности при формировании планов дистанционного зондирования Земли из космоса // Обозрение прикладной и промышленной математики, 2011, т.18, в.2. С.264-265.

[14] Горелов Ю.Н. Об оптимальном сканировании маршрутов съемки на поверхности Земли космическими средствами дистанционного зондирования // Обозрение прикладной и промышленной математики, 2009, т.16, в.1. С.141-142.
[15] Горелов Ю.Н., Данилов С.Б., Мантуров А.И., Пермяков А.В. Оптимальное управление сканированием маршрутов съемки для космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Общерос. научно-технический журнал «Полет», № 11, 2009. – С.49-55.
[16] Горелов Ю.Н., Данилов С.Б., Тропкина Е.А. Об одном подходе к приближенному решению задачи оптимального управления переориентацией космического аппарата // Обозрение прикладной и промышленной математики», 2011, т.18, в.3. С.429-431.
[17] Красовский Н.Н. Теория управления движением: линейные системы. – М.: Наука, 1965. – 476 с.

# ПРОГРАММНО – МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИК ИСПЫТАНИЙ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЦИФРОВЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ВОЗДУШНОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**В.Н. Степашкин, А.Е. Гриценко**

Военный учебно-научный центр ВВС
«Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
125190, Москва, ул. Планетная, 3, Россия
umcvunc@mail.ru
тел: +7 (499) 250-01-15, факс: +7 (495) 693-59-81

***Ключевые слова:*** *воздушный мониторинг, цифровые оптико-электронные системы (ЦОЭС), испытания ЦОЭС, техническое состояние ЦОЭС, моделирование ЦОЭС, контроль состояния ЦОЭС*

**Abstract**

Principles of construction, functioning and application of the software modeling complex, allowing to work through created techniques for determination of technical state controlled parameters and assessment of efficiency of airborne digital optical – electronic systems for terrestrial surface monitoring in a wide range of conditions of their application are described.

## Введение

Создание методологической основы для разработки отечественной системы испытания и эксплуатации современных цифровых оптико-электронных систем (цифровых ОЭС, ЦОЭС) воздушного мониторинга земной поверхности, которая включает в себя автоматизированные системы сбора и обработки данных с целью оценки технического состояния ЦОЭС, является актуальной фундаментальной проблемой. При этом разработка адекватного методического аппарата требует выполнения дорогостоящих летных экспериментов.

Данная проблема имеет и международное звучание. Так например, авторам известно, что разработка методик сертификации цифровой аппаратуры наблюдения в рамках международного Договора по открытому небу, участником которого является и Российская Федерация, не ограничивается теоретическим обоснованием их положений, а сопровождается лётными экспериментами, а также численным моделированием изображений проверочной миры.

С целью сокращения количества летных экспериментов разработан программно – моделирующий комплекс (ПМК), позволяющий на основе ограниченного количества данных летных испытаний ЦОЭС отрабатывать создаваемые методики определения параметров контроля технического состояния и оценки эффективности ЦОЭС в широком диапазоне условий их применения.

ПМК позволяет получать смоделированные изображения земной поверхности, например, тестового полигона, посредством воспроизведения условий и механизмов формирования аэроснимка в имитированном «полете» над координатно – привязанным ортофотопланом в контексте геоинформационной системы. Смоделированные изображения анализируются и обрабатываются для получения оценок параметров контроля состояния ЦОЭС и показателей эффективности их применения с использованием как визуального, так и автоматического и автоматизированного методов распознавания.

В статье описываются принципы построения и функционирования ПМК, характер входных и выходных данных, а также возможные варианты применения комплекса.

## 1 Принципы построения и функционирования ПМК

Идея расширения объема данных летных экспериментов для отработки методик оценки технического состояния и эффективности применения цифровых оптико-электронных систем (ЦОЭС) воздушного мониторинга земной поверхности за счет данных, получаемых методом численного моделирования, не является новой. Ниже описывается одна из возможных реализаций данной идеи.

ПМК имеет структуру, показанную на рисунке 1. В него входят следующие программные компоненты, разработанные с использованием элементов программ [1-5]:

1) имитатор движения летательного аппарата (ЛА);
2) имитатор блока оптико – электронного (БОЭ);
3) компоненты геоинформационной системы (ГИС);
4) программа управления имитацией полёта и аэрофотосъемки;
5) комплекс средств подготовки исходных данных;
6) комплекс средств обработки и поддержки анализа изображений.

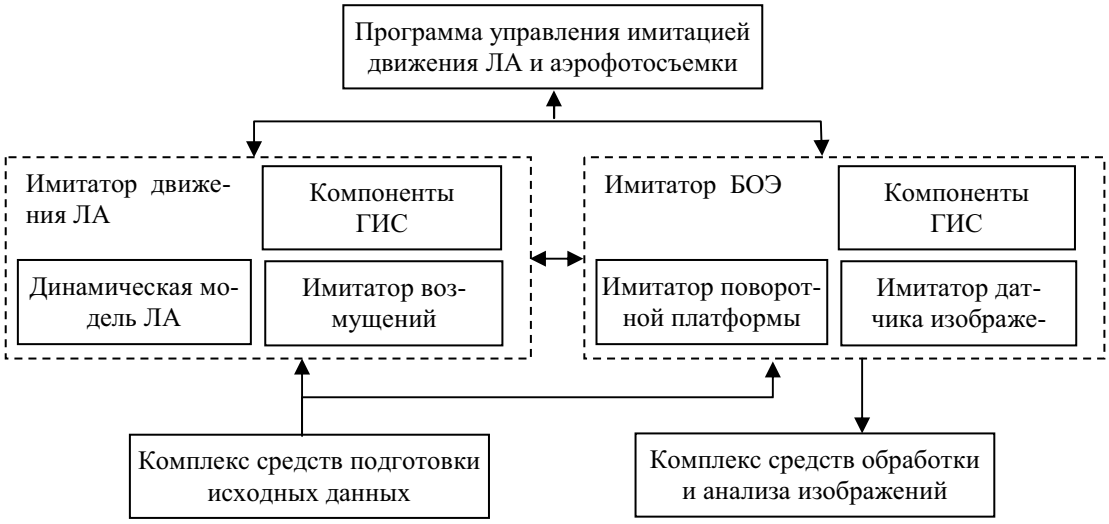



Рисунок 1 – Структура ПМК

Имитатор движения ЛА представляет собой отдельную программу, воспроизводящую поступательную и угловую динамику летательного аппарата в контексте координатной основы ГИС по заранее подготовленному маршруту и профилю полета. Динамическая модель учитывает, в частности, инерционные свойства ЛА в поворотных точках, ветровые воздействия. В имитаторе возмущений используется как численное моделирование «помехи» к параметрам движения, так и выборки соответствующих данных реальных полетов. При этом в случае моделирования обеспечивается возможность получения коррелированных по времени выборок применением методов рекурсивной фильтрации [6].

Имитатор БОЭ также представляет собой отдельную программу и включает в себя имитатор гиростабилизированной управляемой поворотной платформы (ГСП) и имитатор датчика изображения местности.

Первый из них позволяет имитировать съемку при различных установочных углах датчика изображения, а также выполнение гиростабилизированной съемки и съемки в отсутствие гиростабилизации. В имитаторе реализована модель функционирования, учитывающая инерционность и ограничения углов разворота, а также особенности режимов работы и управления в современных коммерческих ГСП ведущих мировых производителей.

Имитатор датчика изображения предназначен для формирования имитированного многокадрового изображения земной поверхности в реальном масштабе времени имитации полёта. Это достигается путем периодического захвата фрагментов ортофотоплана высокого разрешения, попадающих в расчетное поле зрения имитатора датчика и выполнения над этими фрагментами пространственно – спектральных и энергетических преобразований, отвечающих заданным техническим характеристикам ЦОЭС. В математическом обеспечении имитатора используются, в частности: аппарат фотограмметрии, энергетическая модель ОЭС, линейная теория ОЭС, основанная на понятии оптических передаточных функций (ОПФ).

Ещё одна отдельная программа из состава ПМК осуществляет управление имитацией полёта и аэрофотосъемки. Она предназначена для выбора картографической основы, размещения в её контексте первичного изображения – ортофотоплана; подготовки маршрута и профиля «полёта», ввода параметров ЛА, возмущений, имитатора ГСП и датчика изображения; собственно управления полётом путем коррекции маршрута, а также управления имитаторами ГСП и датчика изображения.

Комплекс средств подготовки исходных данных включает в себя ряд программ, предназначенных для подготовки данных, обеспечивающих функционирование имитаторов движения ЛА и БОЭ. В частности, данный комплекс применяется: для подготовки ортофотоплана и его координатной привязки к карте местности; для предварительного моделирования возмущений пилотажно – навигационных параметров полёта; для создания набора цифровых моделей ОПФ элементов тракта формирования конечного изображения: атмосферы, оптики, фотоприемной матрицы, электронного тракта, вибраций, сдвига изображения.

Комплекс средств обработки и анализа смоделированных изображений предназначен для получения данных о параметрах контроля технического состояния моделируемой ЦОЭС, количественных оценок влияния этих параметров на эффективность её применения в условиях выполнения моделирования. В частности, для заданных условий аэросъемки и параметров ЦОЭС оцениваются: пространственное и энергетическое разрешение; влияние этих показателей, а также неточного знания элементов внутреннего ориентирования и снижения реального динамического диапазона на эффективность применения ЦОЭС, выражаемого в геометрической точности и опознавательной способности получаемых изображений. При этом оценки могут формироваться для случаев операторного и автоматического распознавания.

В ПМК используются программные компоненты ГИС «Панорама» и картографическая основа в открытом формате SXF.

Программные компоненты ПМК в процессе моделирования могут запускаться как на нескольких, так и на одном компьютере.

Информационное взаимодействие компонентов ПМК в процессе моделирования осуществляется:

- по реальной или виртуальной (в случае применения единственного компьютера) сети Ethernet, протокол UDP/IP - при передачи моделируемых видеоизображения и пилотажно - навигационной информации;
- по реальным или виртуальным (в случае применения единственного компьютера) последовательным интерфейсам RS-232 - при передаче фраз управления и обмене фразами состояния.

При использовании единственного компьютера на процессоре Intel i7 достигается моделирование с темпом кадров видеоряда разрешением 720x576 пикселов до 7-8 кадров в секунду. При использовании трех аналогичных компьютеров под имитаторы и программу управления возможно получение видеоряда с темпом 25 кадров в секунду.

Адекватность функционирования ПМК в части моделирования изображений с точки зрения аэрофотограмметрии и линейной теории ОЭС проверялась с использованием имеющихся у авторов аэрофотоснимков современных ЦОЭС: Leica RCD105, Intergragh DMC и др.

## 2 Иллюстрация функционирования программно-моделирующего комплекса

На рисунке 2 показан пример опорного ортофотоплана, привязанного к координатной основе местности. В контексте фотоплана показан маршрут и профиль полёта в псевдотрехмерном виде и отметка текущего положения ЛА. Область захвата местности датчиком изображения показана в виде внутренней области четырехугольника в соответствие с текущим угловым положением датчика, определяемым углами ЛА и разворотом датчика в связанной с ЛА системе координат.

Рисунок 2 – Иллюстрация имитации захвата местности датчиком изображения

На рисунке 3 представлено изображение, смоделированное согласно геометрии визирования местности, показанной на рисунке 2.

Рисунок 3 – Пример смоделированного изображения: слева- в отсутствие пространственно – частотных искажений; справа – результат влияния модели ОПФ ЦОЭС

Принцип моделирования изображения путем пространственно – частотных искажений исходного спектра изображения показан на рисунке 4. Для примера показана рассчитанная функция передачи модуляции звена расфокусировки оптической системы.

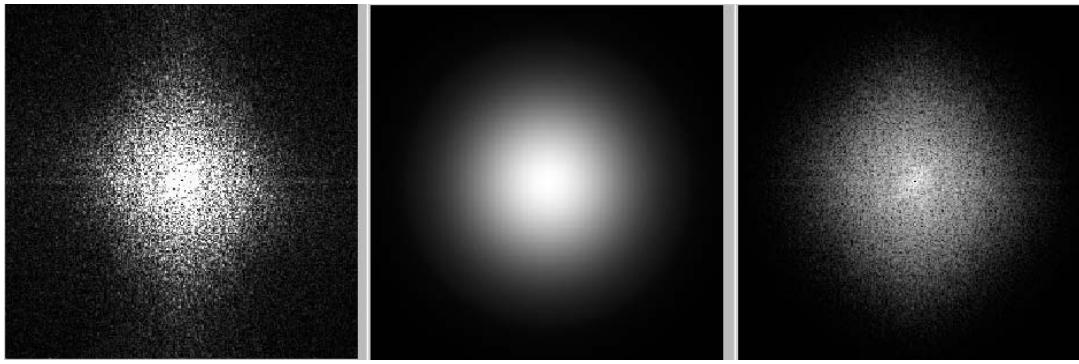


Рисунок 4 – Принцип моделирования пространственно – частотных искажений в ЦОЭС. Слева направо: исходный амплитудный спектр, модель функции передачи модуляции, спектр изображения-результата

### 3 Возможные варианты применения программно – моделирующего комплекса

В задачах разработки методик испытаний и эксплуатации ЦОЭС использование ПМК позволяет дополнять данные лётных испытаний и на этой основе уточнять условия применимости математических моделей методик, выполнять коррекцию их параметров, обосновывать или опровергать корректность логики применения той или иной методики. Так, например, при выборе некоторой модели зависимости детальности изображения от высоты полёта носителя, ПМК позволяет определить, для каких объектов, условий аэросъемки, свойств носителя и самого датчика изображения эта модель дает приемлемые результаты, имитируя множество «проходов» над некоторым тест-объектом, рисунок 5.

В задачах прогноза эффективности применения ЦОЭС ПМК позволяет оценить:

- по смоделированным изображениям тест – объекта: разрешающую способность изображения в масштабе местности и его шумовые характеристики. На этой основе производится расчет вероятности обнаружения и опознавания изображений природных и антропогенных образований при визуальном и автоматическом дешифрировании аэроснимка;
- по смоделированным изображениям реальных объектов: параметры распределений вероятности опознавательных признаков автоматического распознавания изображений; непосредственные оценки вероятности обнаружения и опознавания объектов в широком диапазоне условий съемки путем предъявления изображений дешифровщикам.

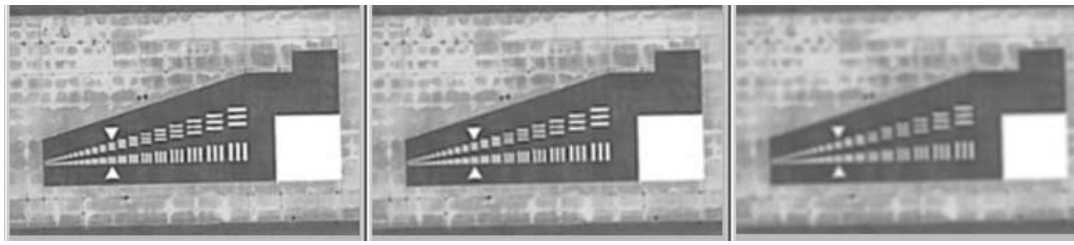


Рисунок 5 – Пример результатов моделирования изображения тест-объекта для разных условий съемки

В задачах обучения операторов – дешифровщиков цифровых аэроснимков ПМК позволяет повысить качество обучения за счет увеличения объема обучающих данных, расширения диапазона условий получения изображения и геометрии визирования местности. При этом

обучение может производиться в динамическом режиме в процессе имитации формирования видеоряда многокадровым датчиком изображения.

### Заключение

Описанный программно – моделирующий комплекс позволяет снизить затраты на разработку методик испытания и эксплуатации цифровых ОЭС. ПМК также может эффективно использоваться в задачах прогноза эффективности применения ЦОЭС и обучения операторов – дешифровщиков цифровых аэроснимков.

### Благодарности

Разработка ПМК выполнялась при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 11-08-00850-а.

### Список литературы

[1] Степашкин В.Н., Михолёнок А.Н. Программа подготовки и ввода полетного задания. Программа для ЭВМ.// Свидетельство о регистрации № 2007614368, 15 октября 2007г. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Реестр программ для ЭВМ.

[2] Степашкин В.Н., Михолёнок А.Н. Программа приема, автоматизированного отбора и дешифрирования кадров видеоряда.// Свидетельство о регистрации № 2007614366, 15 октября 2007г. Там же.

[3] Арбузов П.А., Степашкин В.Н. и др. Предварительная обработка информации, добываемая средствами воздушной разведки. Программа для ЭВМ.// Свидетельство о № 2006612662, 28 июля 2006г. Там же.

[4] Арбузов П.А., Степашкин В.Н. и др. Комплексное дешифрирование результатов воздушной разведки. Программа для ЭВМ.// Свидетельство о № 2006612663, 28 июля 2006г. Там же.

[5] Степашкин В.Н., Дворядкин А.Г., Кондрашев Д.В. Пакет программ для моделирования многоспектральных изображений фоно-целевой обстановки. - В сб. Автоматизированные системы цифровой обработки изображений в задачах распознавания и определения местоположения объектов. Научно – методические материалы /Под ред. И.Н.Белоглазова.- ВВИА им.Н.Е.Жуковского, г.Москва, 1993г. - С.32-45.

[6] Степашкин В.Н., Савельев С.В. Авторегрессионная модель векторного дискретного гауссова случайного поля. - В одноим. сб.- ВВИА им.Н.Е.Жуковского, г.Москва, 1995г. - С.46-55.

[7] Степашкин В.Н., Савельев С.В. Численное моделирование текстур многозональных изображений. Опыт применения авторегрессионной модели. – Там же - С.28-35.

### Biography

*Stepashkin Vladimir Nikolaevitch.* Was born in 1959, graduated from Moscow physical technical institute (1983) and Zhukovsky Air force engineering academy (AFEA, 1988), candidate of technical sciences, senior researcher, till 2010 headed the Department of high-altitude, instrument and optical – electronic aviation equipment of AFEA, author of over 100 scientific works, area of scientific interests: remote sensing of Earth, processing of multidimensional signals (images), pattern recognition, photogrammetry.

*Gritsenko Alexander Evgenievitch.* Vas born in 1973, graduated from Irkutsk highest military aviation engineering college (1996), candidate of technical sciences, lecturer, author of 20 scientific works, area of scientific interests: remote sensing of Earth, images processing, photogrammetry.

# ИНТЕГРАЦИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БОЛЬШЕГРУЗНЫМИ АВТОМОБИЛЯМИ

**А.З. Асанов[1], Д.Х. Валеев[2], А.С. Савинков[2]**

[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет
423812, Набережные Челны, проспект Сююмбике, 10А, Россия
askhat.asanov@yandex.ru
тел: +7 (8552) 38-34-05, факс: +7 (8552) 58-88-94

[2]Научно-технический центр ОАО «КАМАЗ»
423808, Набережные Челны, проспект Автозаводский, 2, Россия

***Ключевые слова:*** *управление подвижными объектами, магистральный автомобиль, система управления, интеллектуальная система управления, интеграция систем управления*

**Abstract**

Обсуждается проблематика автоматизации человеко-машинных систем управления большегрузными автомобилями. Рассматривается концепция иерархий функций управления в сложных эргатических системах, особенности уровней управления. Предлагаются механизмы адаптивной коррекции контуров ручного и полуавтоматического управления движением. Излагаются принципы интеллектуализации человеко-машинного интерфейса.

## Введение

Класс большегрузных (в частности, магистральных) автомобилей является одним из наиболее динамичных и быстро развивающихся направлений современного автомобилестроения. Современный магистральный грузовой автомобиль характеризуется резким возрастанием сложности используемых в нем систем и агрегатов, увеличением взаимосогласованных (оптимизированных) процессов, в автомобилях достаточно широко используются локальные автоматические системы (САУ). Несмотря на автоматизацию целого ряда процессов (впрыск топлива, турбонаддув и др.) и подсистем автомобиля (антиблокировочная система, автоматическая трансмиссия и пр.), что объективно уменьшает объемы производимой водителем работы, объемы информации, поступающие из систем/агрегатов автомобилей и из окружающей среды таковы, что часто превосходят возможности водителя по оперативному анализу этой информации. Все более и более на передний план выступают задачи автоматизации управления автомобилем в целом.

Особенности контроля и управления в автомобилях предопределяются принципиальными особенностями функционирования автомобиля, как сложной технической системы:

- автомобиль функционирует только совместно с человеком (водителем), т.е. они образуют полноценную человеко-машинную систему (ЧМС), относящуюся к классу эргатических систем;
- функционирование ЧМС происходит в условиях недостаточности априорной информации о внешней среде функционирования;
- на работу автомобиля и его систем, да и водителя, влияет большое число трудно учитываемых нестационарных факторов и факторов субъективного характера;
- присутствует значительная изменяемость цели и критериев качества управления автомобилем, обусловленная изменениями дорожных условий, технического состояния автомобиля, психофизиологического состояния водителя, маршрутного задания и многое другое.

В целях повышения эффективности функционирования таких эргатических систем возникает насущная проблема автоматизации (а в последующем, и интеллектуализации) управления грузовыми автомобилями (ГА). Очевидно, что автоматизацию современных ГА необходимо осуществлять на компьютерной основе, формируя автоматизированное управление на базе взаимодействия водителя и бортового компьютера (бортовой компьютерной системы), когда управляющим субъектом является тандем «человек - компьютер».

## 1 Мехатронные системы − основа современных грузовых автомобилей

Современные грузовые автомобили требуют функционирования целого комплекса локальных систем автоматического управления, обеспечивающих эффективность эксплуатации, безопасность движения, экологичность и многое другое [1]. Для этих систем характерно то, что, во-первых, функции, которые они реализуют, являются критичными для эффективного функционирования современного автомобиля, во-вторых, эти функции не могут быть реализованы водителем в ручном режиме из-за скоротечности и сложности. И число локальных САУ автомобиля растет. В современных большегрузных автомобилях становятся актуальным разработка и применение различного рода системы распределения тормозных усилий, систем курсовой стабилизации и экстренного торможения, систем предотвращения опрокидывания автомобиля и помощи при трогании на подъеме, систем мониторинга «мертвых зон» и управления с их учетом, систем контроля (и управления) давления в шинах, загрузки автомобиля, систем активной управляемой подвески автомобиля, систем управления межосевыми и межколесными блокировками автомобиля, смазкой отдельных агрегатов и ряд других. Эти системы управления характеризуются полной автоматизацией выполняемых функций и могут быть отнесены к локальным САУ автомобиля нижнего уровня управления. Здесь мы, по существу, имеем дело с мехатронными системами (объектами), понимаемыми как некоторые обособленные технические комплексы (системы), управляемые с помощью электронного процессора. Общей особенностью существующих и используемых мехатронных систем является отсутствие достаточно полной и непосредственной взаимосвязанности друг с другом.

Мехатронные системы ГА могут быть отнесены к системам, работающим в критических условиях, аварийные ситуации на которых могут привести к тяжелым экологическим последствиям и/или человеческим жертвам. Функционирование локальных САУ автомобиля (мехатронных систем) происходит в сложных внешних условиях. Сложность внешних условия заключается, прежде всего, в широком диапазоне изменения внешних условия, в высокой динамике изменения этих условий, а часто и в неопределенности тех или иных факторов, существенно влияющих на работу мехатронных систем. Построение локальных САУ, максимально эффективных во всех диапазонах изменения внешних условий и факторов, при частом изменении целей и режимов движения автомобиля, практически не реализуемо. Очевидно, что необходима адаптация мехатронных систем к изменяющимся условиям, режимам и целям движения.

Общая задача адаптации локальных САУ распадается на две подзадачи: адаптация к изменениям внешней и внутренней среды автомобиля и адаптация к изменениям режимов и целей движения автомобиля. Первая подзадача адаптации может решаться введением контуров динамической адаптации в локальные САУ (адаптация 1-го рода), использующие дополнительные данные с датчиков автомобиля и, возможно, различные эталонные модели. Вторая подзадача сопряжена с действиями человека, управляющего автомобилем, и потому требует, очевидно, других, более высоких уровней управления (адаптация 2-го рода), ответственных за анализ текущей ситуации и текущих целей управления автомобилем.

Обобщенная схема контура управления с адаптацией 1-го рода может принять вид, представленный на рис. 1.

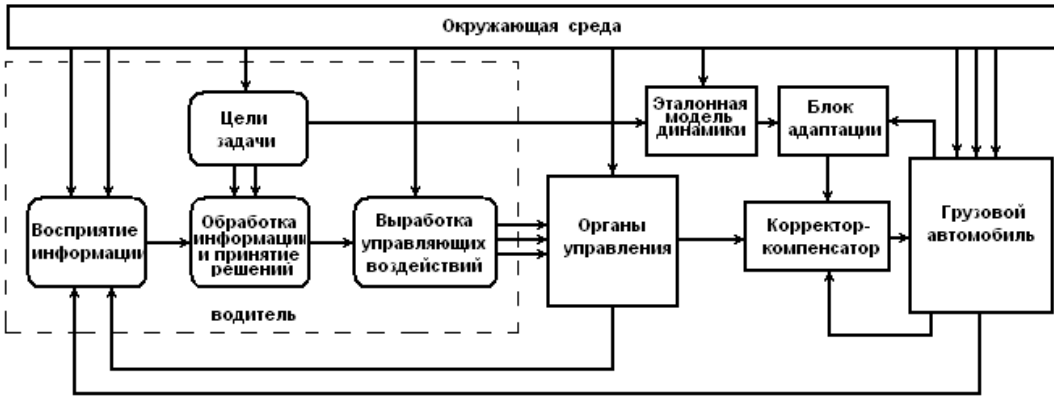



Рисунок 1 – Обобщенная схема контура управления с адаптацией 1-го рода

Здесь собственно функцию динамической коррекции выполняет корректор-компенсатор. Вычисление требуемых коррекций и настройку корректор-компенсатора производит блок адаптации. Алгоритмы блока адаптации анализирует как текущие состояния ГА и состояние окружающей среды, так и эталонные модели движения, определенные из текущих целей и режимов движения автомобиля. Сложность рассматриваемой задачи адаптации контура управления ГА обусловлена необходимостью учета трех изменчивых факторов: цели управления, условий движения, динамических характеристик объекта управления. В силу этого, жесткий алгоритм коррекции в принципе не может быть удовлетворительным. Следовательно, приемлемый результат может дать лишь механизм адаптивной коррекции.

## 2 Интеграция локальных систем управления

Наивысшая эффективность функционирования автомобиля в целом, очевидно, возможна при полностью согласованной работе всех узлов, агрегатов и систем автомобиля. Это в полной мере относится и к системам управления автомобилем. Для повышения эффективности управления процессами и отдельными подсистемами необходима глубокая интеграция локальных САУ автомобиля.

Интеграция локальных САУ автомобиля может быть реализована различными способами и средствами. Так, при решении задач адаптации возможно частичное решение и проблемы интеграции локальных САУ (мехатронных систем) автомобиля за счет получения и использования дополнительной информации из других систем.

Но наиболее перспективной формой интеграции представляется построение многоуровневой бортовой системы управления (БСУ) основными агрегатами и процессами ГА. В такой интегрированной БСУ предусматривается функционирование ГА во многих режимах и, соответственно, настройка основных агрегатов и систем автомобиля для работы в этих режимах. Возникает возможность настройки локальных систем таким образом, чтобы оптимизировать функционирование системы в целом (ГА), например, движение с минимальными затратами топлива. Обеспечение таких оптимальных настроек подсистем возможно, если интегрированная БСУ будет способна различать различные ситуации и реализовывать различные цели управления. А это уже функции, которые в настоящее время полностью отнесены в обязанности водителя автомобиля.

## 3 Автоматизация функций управления водителя

Существующая автоматизация систем автомобиля практически не касается основных функций водителя − управления движением автомобиля, обеспечения максимально возможной эффективности работы транспорта и организации максимально возможной безопасности движения транспорта. При этом сам водитель является, пожалуй, наиболее «слабым звеном» эргатической системы «ГА-водитель».

Повышение функциональной сложности управления ГА сопровождается возрастанием объема воспринимаемой и перерабатываемой водителем информации, усложнением условий принятия и реализации оперативных решений. Это закономерно порождает негативные факторы − возникновению эмоциональных и интеллектуальных перегрузок водителя. Длительные психофизические нагрузки, испытываемые водителями большегрузных автомобилей, особенно магистральных, приводят к сильной усталости, существенному снижению психомоторных реакций и, как следствие, к увеличению вероятности аварий (как правило, крупных, с весьма существенными последствиями), снижению эффективности функционирования эргатической системы «водитель-ГА», к профессиональным болезням водителей и многое другое. В связи с этим одной из важнейших проблем разработки высокоэффективных ботовых систем управления ГА является проблема оптимального распределения функций между водителем и техническими средствами с учетом психофизиологических возможностей человека.

Можно выделить целый ряд задач (функций водителя), которые непосредственно влияют на эффективность функционирования транспортного средства и автоматизация которых актуальна: выбор маршрута движения, выбор оптимального по затратам топлива режима работы двигателя и основных агрегатов автомобиля, задачи поддержания скорости, дистанции до впереди идущего автомобиля, движения в колонне, мониторинга состояния водителя, выбора оптимального режима движения обнаружения и распознавания препятствий, управления распределением тормозных усилий (межосевыми и межколесными блокировками колес), контроля и диагностики состояния автомобиля, приема и реакции на сигналы дорожных знаков и целый ряд других. Алгоритмизация этих задач управления в интегрированной БСУ ГА требует учета их специфики, заключающейся в терминальном характере процессов управления и в априорной неопределенности моделей автомобиля, водителя и окружающей среды.

Особенности перечисленных выше задач управления также указывают на необходимость построения многоуровневых систем управления с широким использованием интеллектуальных алгоритмов [2, 3]. При этом нижний (локальный) уровень управления представляет по существу распределенную (сетевую) подсистему управления, в то время как другие уровни управления образуют иерархическую систем [4]. Обобщенная структурная схема интегрированной БСУ (ИБСУ) грузового автомобиля, учитывающая иерархию базовых групп функций управления и специфику эргатических систем представлена на рис. 2.

Функционирование ИБСУ ГА в целом направлено на выполнение конкретного задания для определенного комплекса работ, отвечающего целевому назначению системы. Представляется рациональным построение трехуровневой иерархической структуры ИБСУ ГА: на верхнем уровне планируются сценарии выполнения некоторого конкретного задания, на среднем уровне осуществляются функции ситуационного управления, на нижнем уровне осуществляется функционирование локальных систем автоматического управления.

На верхнем (стратегическом, сценарном) уровне управления сценарное планирование [5] заключается в разработке возможных сценариев будущего и создании на их основе гибких долгосрочных планов действий. Все возможные сценарии формируются на основе исследования окружающей среды на наличие предопределенных элементов (заданные цели и режимы, характеристики автомобиля, условия внешней среды и т.д.), ключевых неопределенностей и комбинировании исходов последних.

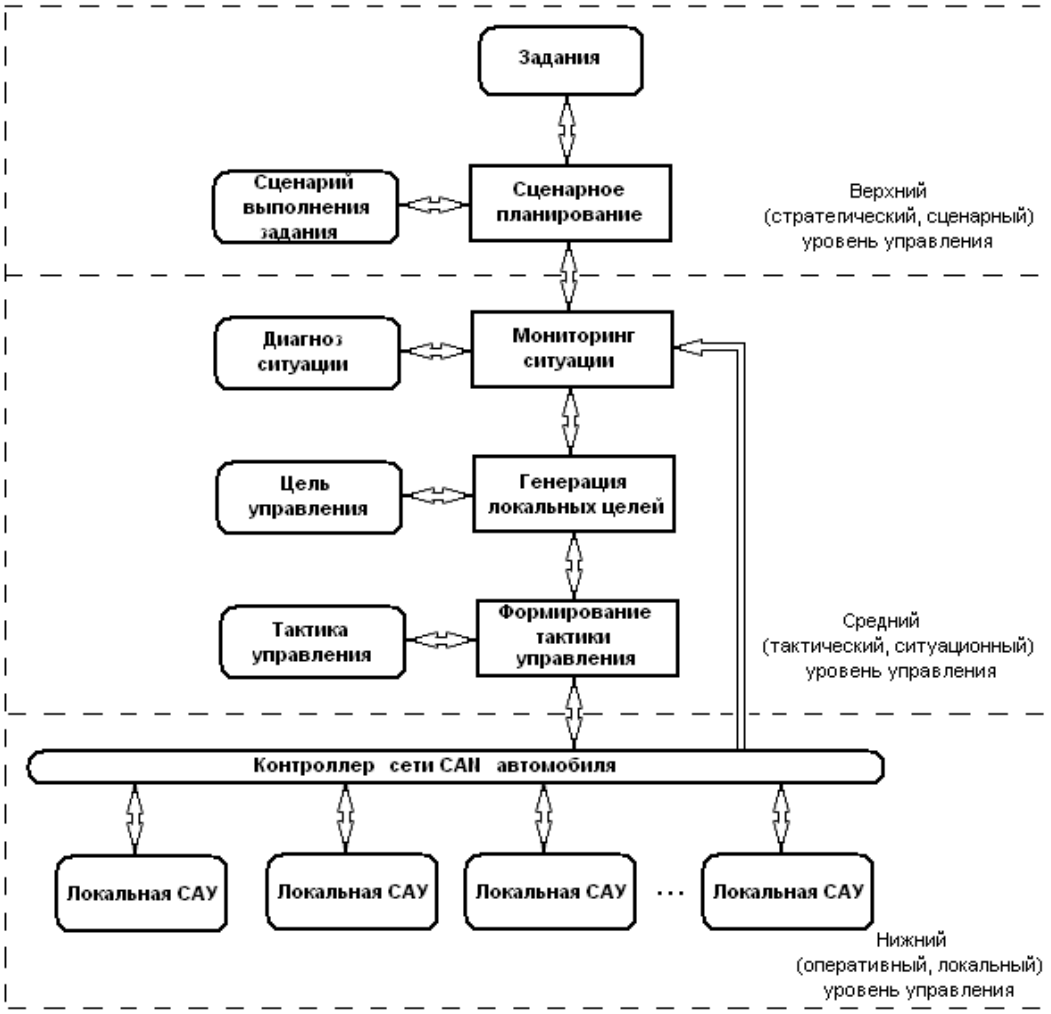



Рисунок 2 – Обобщенная схема иерархической бортовой системы управления магистрального грузового автомобиля

Сценарное планирование рассматривает все сценарии как одинаково возможные в будущем. Сценарный подход придает гибкость стратегиям управления, помогает сократить время реагирования на изменение ситуаций. Сценарий разворачивается в процессе функционирования системы.

На среднем (тактическом, ситуационном) уровне ИБСУ задачи ситуационного управления [6] вытекают из логики отработки сценария. Здесь предполагается последовательное решение следующие задачи: мониторинг текущих ситуаций; генерация локальных целей; формирование тактики управления.

Алгоритм ситуационного управления может быть построен на основе нечеткой когнитивной карты, под которой понимается математическая модель ситуации, представленная в виде ориентированного взвешенного графа. Такая модель позволяет описать субъективное восприятие некоторой ситуации человеком (экспертом) и выявлять структуры причинных связей между элементами (составляющими, существенными факторами) ситуации, оценивать последствия развития ситуации, происходящих под влиянием воздействий. Ситуационная мо-

дель (когнитивная модель) дает формальное описание окружающей среды в форме ситуаций, в которых предстоит действовать ИБСУ ГА. В модели учитываются те факторы, которые действительно влияют на развитие ситуаций. Сюда относятся существенные характеристики объекта и внешнего мира: пространственное положение, режим и условия движения автомобиля, его техническое и динамическое состояния.

С учетом общих положений ситуационного управления мобильными объектами [7] для ИБСУ ГА базовыми могут быть положения:

- ситуация идентифицируется как некоторая область локализации динамических переменных;
- каждая ситуация порождает локальную цель управления, для достижения которой формируется своя тактика (режим) управления – т.е. ситуационное управление по своей структуре является дискретным и многорежимным;
- процесс управления ориентирован на оценку ожидаемого развития ситуации, принятие решений и действия, ведущие к достижению локальных целей;
- характеризация и анализ динамических процессов в объекте с учетом различных факторов неопределенности в динамике объекта и свойствах окружающей среды.

Автоматизация функций управления автомобилем должна быть рассчитана на возможности бортовых программно-аппаратных средств: на уровнях сценарного планирования и ситуационного управления предполагается применение интерактивных процедур принятия решений.

## 4 Перспективные направления интеллектуализации управления грузовыми автомобилями

Построение сложных адаптивных регуляторов, параметры которых автоматически перестраиваются при изменении параметров агрегата (автомобиля), практически всегда имеют ограниченную область применения: трудно найти простой и надежный алгоритм адаптации, работоспособный в широком диапазоне изменения параметров агрегата (автомобиля). Поскольку автомобиль (агрегат), как правило, относится к категории сложных динамических объектов, т.е. он является многосвязным (имеет несколько входов и выходов), описывается интегро-дифференциальными уравнениями высокого порядка, имеет существенно нелинейные характеристики и т.п., то синтез алгоритма адаптации сильно усложнен.

В этих обстоятельствах наиболее перспективным представляется создание интеллектуальных систем управления, контроля и диагностики автомобиля (ИИБСУ). Собственно, представленные выше сценарный и ситуационный уровни управления ИБСУ, призванные обеспечить высокую скорость, комфортность и экономичность движения в широком диапазоне изменения внешних условий, выбор оптимального режима и маршрута движения, автоматически приспосабливающихся к изменениям маршрутного задания или к появлению возможных дефектов (отказов) в работе основных систем автомобиля, гарантирующих высокое качество и безопасность управления движением и многое другое, могут быть реализованы только при широком использовании интеллектуальных алгоритмов управления.

В частности, весьма перспективным аппаратом адаптации и динамической коррекции каналов управления являются искусственные нейронные сети [8], которые обладают двумя важнейшими для ИБСУ функциональными возможностями: обучение и адаптация. Свойство обучения может быть использовано при формировании эталонной модели водителя, механизмов коррекции канала управления, причем необходимую для обучения информацию дает сам процесс функционирования ИБСУ ГА с высококвалифицированным водителем в контуре управления. Свойство адаптации обеспечивает постоянно действующую настройку механизмов коррекции канала управления под конкретного человека-оператора с учетом его профессиональных недостатков и психофизического состояния.

При управлении автомобилем основными являются режимы ручного и автоматизированного управления. При этом предъявляются высокие требования к водителям: к их сенсомоторным реакциям, тренированности и координации движений, способности мгновенно ориентироваться и принимать решения в критических ситуациях и автоматически выполнять эти решения. Поэтому, несомненно, перспективным является построение и использование подсистемы интеллектуальной поддержки деятельности водителя ГА в процессе работы. Здесь могут быть использованы различные инструменты искусственного интеллекта, включая экспертные технологии. Такие системы должны являются системами реального времени, с динамической базой знаний, которая может наращиваться в процессе функционирования ИБСУ ГА. В частности, экспертная система в режиме консультации может выдавать водителю необходимые советы и подсказки.

В задачах выбора и/или согласований, которые необходимо решать на борту автомобиля, весьма перспективными являются мультиагентные технологии [9]. Мультиагентные вычислительные системы способны обеспечить принципиально новые качества адаптации, самоорганизации и интеллектуального поведения, реализуя, фактически, бортовые распределенные информационные системы.

Важнейшим компонентом архитектуры перспективных ИБСУ ГА является человеко-машинный интерфейс, в максимальной степени учитывающий человеческий фактор − психологические, физиологические и анатомические аспекты человеко-машинного взаимодействия, и весь комплекс решаемых функциональных задач. Человеко-машинный интерфейс должен обеспечивать оптимальный информационный баланс и не приводить к таким нежелательным явлениям, как дефицит или излишек информации. Он должен обеспечивать адаптивную фильтрацию информационных потоков: в зону внимания водителя должна вводиться только лишь существенная оперативная информация, отвечающая текущей цели управления. Очевидно, современный диалоговый интерфейс должен организовываться с применением речевого интерфейса, компьютерных технологий 3D визуализации и виртуальной реальности.

Интеллектуализация интерфейса направлена на обеспечение гибкого и адаптивного взаимодействия водителя с компьютером, управление активностью и формами ведения диалога. В его функцию может также входить обеспечение диалога на ограниченном естественном языке.

Новые возможности интеллектуального интерфейса может дать использование многоагентной технологии. Агенты делают интерфейс активным, адаптивным к конкретному пользователю, что позволяет существенно повысить производительность системы при решении тех задач, в которых на человека возлагается основная нагрузка по координации различных действий. Интерфейсные агенты способны выполнить большое число задач, в том числе прогнозирование возможных последствий неправильных действий пользователя, корректировку или блокировку тех его действий, которые ведут к фатальным ошибкам.

## 5 Мониторинг состояния водителя

Развитие бортовых компьютерных средств ГА позволяет, в принципе, решать и такую очень важную задачу, как постоянный мониторинг (контроль) состояния водителя, понимаемый как совокупность организационно-технических мероприятий и приемов, направленных на изучение внутренних возможностей человека решать поставленные задачи. В силу особой ответственности управления большегрузным автомобилем мониторинг состояния водителя проводится непосредственно в процессе работы с целью определения и/или предсказания возникновения у водителя нежелательных состояний, которые могут служить причиной снижения его работоспособности и эффективности принимаемых решений. Мониторинг состояния водителя может вестись по изменению физиологических, психологических, биохимических, поведенческих показателей. Очевидно, что контроль состояния водителя не должен влиять на результаты работы водителя и отвлекать его, результаты контроля должны выдаваться доста-

точно быстро; методы контроля должны обладать высокой помехоустойчивостью, достоверностью, информативностью. В идеальном случае мониторинг (контроль) состояния водителя должен быть бесконтактным, непрерывным, прогнозирующим и достоверным.

## 6 Транспортная телематика

Современная жизнь общества немыслима без эффективной работы транспортной системы, в т.ч. и автомобильного транспорта. Происходит активное замещение существовавших ранее технологий и методов организации транспортного процесса, системы обслуживания и ремонта автомобилей, инфраструктуры информационного обеспечения транспорта и многое другое. Все более востребованными становятся системы транспортной телематики[10], объединяющие информационную и телекоммуникационную технологии для целей эффективной организации движения транспортных потоков, повышения пропускной способности существующей транспортной инфраструктуры, повышения безопасность движения. В связи с этим на борту автомобиля перспективны бортовые комплексы связи (приема-передачи информации) с автоматизированными управляющими дорожными (магистральными) системами, автоматические системы определения рядности и распознавания полосы движения, системы автоматического приема сигналов от дорожных знаков, контроля дистанции до впереди идущего автомобиля, движения в колонне и целый ряд других.

## Заключение

Современные магистральные грузовые автомобили требуют функционирования целого комплекса систем управления, обеспечивающих эффективность эксплуатации, безопасность движения и многое другое. Использование большого числа датчиков и исполнительных механизмов, распределенных по автомобилю, в совокупности с бортовыми микропроцессорами и контроллерами, объединенных в многоуровневую систему управления, способно дать решение многих проблем оптимизации и адаптации режимов функционирования важнейших агрегатов автомобиля и самого автомобиля в целом.

## Список литературы


[1] Kiencke U., Nielsen L. Automotive Control Systems. Berlin: Springer. 2005. 521 p.

[2] Макаров И.М. Концептуальные основы организации интеллектуального управления сложными динамическими объектами // В сб. Интеллектуальные системы автоматического управления/ Под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина – М.: Физматлит, 2001. 576 с.

[3] Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунов Б.Е. Интеллектное управление динамическими системами. - М.: Физматиздат. 2000. −352 с.

[4] Асанов А.З. Структурный синтез системы интеллектуального управления скоростью магистрального автомобиля. − В монографии «Интеллектуальные системы управления» под ред. акад. С.Н. Васильева. − М.: Машиностроение, 2010. −544 с. С. 197 − 203.

[5] Рингланд Дж. Сценарное планирование для разработки стратегии, 2008. М.: ИД «Вильяме», 2008. 560 с.

[6] Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.

[7] Теряев Е.Д., Петрин К.В., Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Современные проблемы автоматизации и интеллектуализации эргатических систем управления подвижными объектами. − В монографии «Интеллектуальные системы управления» под ред. акад. С.Н. Васильева. − М.: Машиностроение, 2010. −544 с. С. 84 − 95.

[8] Омату С, Халид М., Юсоф Р. Нейроуправление и его приложения. М.: ИПРЖР, 2000. 272 с.

[9] Скобелев П.О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях // Мехатроника, автоматизация, управление – 2010, №12.

[10] Пржибыл П., Свитек М. Телематика на транспорте. – М.: МАДИ (ГТУ). 2003. −540 с.

# ФОРМАЛИЗАЦИЯ И ОБОБЩЕНИЕ НЕПРОИЗВОДНЫХ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СИСТЕМЕ МНОГОУРОВНЕГО АНАЛИЗА 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:*** *модель, топологическое пространство, категорно-функторная концепция, непроизводный структурный элемент*

**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

Опыт экспертов показывает, что только системное решение таких стратегических задач, как улучшение транспортной обстановки в городе, позволяет гармонизировать проблемные области и приводить к устойчивым системным результатам. Игнорирование же системного подхода и попытка решения задач только путём увеличения ресурсов, зачастую не только неэффективно, но может приводить и к ухудшению состояния системы в целом. Например, реконструкция и улучшение отдельных участков транспортной сети может приводить к смещению транспортного спроса и предложения, перераспределению нагрузок и, в итоге к незапланированному возникновению дополнительных заторов.

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.

## 1 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].

## 2 Представление системной модели на структурном непроизводном уровне

Рассмотрим транспортную сеть как взаимосвязь между накопителями и потоками. В системной динамике накопители используются для представления таких объектов реального мира, в которых сосредотачиваются различного рода ресурсы, например материальные, энергетические, информационные и т.п. Накопители задают статическое состояние моделируемой системы. Их значения изменяются с течением времени согласно существующим в системе потокам. Если накопители задают статическое состояние моделируемой системы, то потоки задают динамику системы. Значения накопителей изменяются с течением времени именно согласно существующим в системе потокам. Входящие в накопитель потоки увеличивают значение накопителя, а исходящие из него потоки, соответственно, его уменьшают [9].

Из выше сказанного, точка пересечения дорог, или накопитель, является одновременно приемником $V_{\text{i}}$ транспортного потока и его же источником $I_i$ (Рисунок1), тогда для следующего перекрестка входящий поток $V_{\text{i+1}}$ будет равен исходящему потоку от предыдущего накопителя (Рисунок 2), при условии, что все накопители имеют одинаковое состояние.

На основе знания качественного описания входящих и исходящих потоков ТС строится матрица их взаимодействия в системе (Таблица 1) по аналогии с матрицей смежности в теории графов.

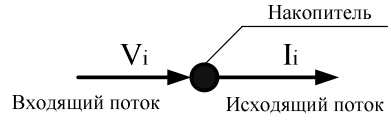



Рисунок 1 – Модель накопителя

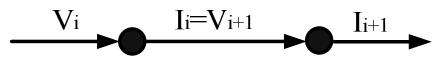



Рисунок 2 – Модели взаимодействия потоков и накопителей

Тогда на основе можно построить граф *G'=(U', X')*, где $U = \{\{V_i,I_i\}...\{V_m,I_m\}\}$ множество вершин графа, а $X = \{P_i,...,P_m\}$ множество соединений вершин графа при условии равенства входящего и исходящего потоков $V_j = I_k$, $j \neq k$. Например, для матрицы из таблицы 1, строится граф *G'=(U', X'),* отображающий структуру взаимоотношения потоков с друг другом (Рис. 3).

Таблица 1 – Матрица взаимодействия потоков

| $I_i \backslash V_i$ | $V_1$ | $V_2$ | $V_3$ | $V_4$ | $V_5$ | $V_6$ | $V_7$ | $V_8$ | $V_9$ | $V_{10}$ | $V_{11}$ | $V_{12}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_1$ | 0 | 1 | | | 1 | | | | | | | |
| $I_2$ | | 0 | 1 | | | 1 | | | | | | |
| $I_3$ | | | 0 | 1 | | | 1 | | | | | |
| $I_4$ | | | | 0 | | | | 1 | | | | |
| $I_5$ | | | | | 0 | 1 | | | 1 | | | |
| $I_6$ | | | | | | 0 | 1 | | | 1 | | |
| $I_7$ | | | | | | | 0 | 1 | | | 1 | |
| $I_8$ | | | | | | | | 0 | | | | 1 |
| $I_9$ | | | | | | | | | 0 | 1 | | |
| $I_{10}$ | | | | | | | | | | 0 | 1 | |
| $I_{11}$ | | | | | | | | | | | 0 | 1 |
| $I_{12}$ | | | | | | | | | | | | 0 |

В качестве единичной составляющей такой структуры предложено принять обобщенное понятие – непроизводный структурный элемент (НСЭ). НСЭ - ограниченная область структуры системы, отличающаяся только ей присущей совокупностью совместно взаимодействующих на категорном уровне свойств простых объектов. На топологическом уровне НСЭ является симплекс, тогда для применения априори известных законов и свойств топологической модели транспортной сети к модели основанной на взаимоотношении накопителей и потоков следует доказать изоморфизм графов *G(U, X)* и *G'(U',X')* в общем виде.

Итак, рассмотрим графы *G(U, X)* и *G'(U',X')*. Так как определяющим условием построения этих графов является количество пересечений дуг или количество взаимоотношений потоков, то количество вершин для обоих графов равно m => $|U| = |U'|$, а количество ребер определяется наличием связи между пересечениями или равностью количества входящего и исходящих потоков => $|X| = |X'| = p$. Будем говорить, что эти графы изоморфны, если можно установить взаимно однозначное соответствие между их вершинами и ребрами так, что если вершины $u_i,u_j$ графа *G(U, X)* соответствуют вершинам $u'_i,u'_j$ графа *G'(U', X')*, то ребро $x_i = (u_i,u_j) \in G$, если оно существует, соответствует ребру $x'_i = (u'_i,u'_j) \in G'$, если оно существует. Если ребро $x'_i$ соответствует ребру $x_i$, то вершины $u'_i,u'_j$ соответствуют вершинам $u_i,u_j$. Из этого следует, что изоморфные графы отличаются лишь нумерацией их вершин, что для нашего случая проверить затруднительно, так как требуется перебор всех *m* соответствий между вершинами. Воспользуемся понятием степени вершины. Степенью вершины *u s(G,u)* в графе *G(U,X)* называется количество его вершин, смежных с *u*, или, что то же, число ребер, инцидентных этой вершине [8]. Ясно, что при всяком изоморфизме ↔ графов *G* и *G'* соответствующие друг другу вершины должны иметь одинаковую степень: для любой $u \in U$ *из* $u \leftrightarrow u'$

должно следовать *s(G,u) = s(G',u').* Далее, пусть *G(U,X) – m* вершинный граф *(|U| = m),* а $s_1,s_2,\ldots,s_m$ – степени его вершин и *G'(U',X') – m* вершинный граф *(|U'| = m)*, а $s'_1,s'_2,\ldots,s'_m$ – степени вершин, ему принадлежащих, тогда упорядоченные системы $s(G) = (s_1,s_2,\ldots,s_m)$ и $s(G') = (s'_1,s'_2,\ldots,s'_m)$ являются векторами степеней графов *G* и *G'* соответственно.

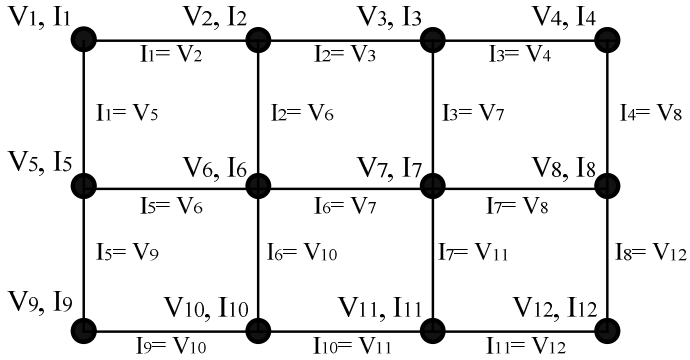



Рисунок 3 – Граф G'=(U, X), взаимодействия потоков в ТС

Из сказанного выше следует, что для изоморфизма графов *G* и *G'* необходимо совпадение векторов их степеней, для нашего случая степени каждой вершины будут равны как для графа *G*, так и для *G' => s(G) = s(G').* Однако это условие является необходимым, но недостаточным, так как для графа $G\ s_1=s_2=,\ldots,=s_m$ и для графа $G'\ s'_1=s'_2=,\ldots,=s'_m$, что говорит об *s* - однородности графов. Тогда рассмотрим постановку задачи об изоморфизме графов *G(U,X)* и *G'(U',X')*, с точки зрения математического программирования [11]. Пусть $A=(A_{ij})_{m\times m}$ и $A'=(A'ij)_{m\times m}$ – матрица смежности графов *G* и *G'* соответственно. Как известно из [8], для изоморфизма этих графов достаточно существование (невырожденной) матрицы $T=(t_{ij})_{m\times m}$, имеющей одну единицу в каждой строке и каждом столбце, чтобы выполнялось условие подобия [11].

$$T^{-1}AT = A'.$$

Условие перепишем в виде

$$AT = TA',$$

что равносильно следующим условиям:

$$\sum_{k=1}^{m} a_{ik}t_{kj} = \sum_{k=1}^{m} t_{ik}a'_{kj}\ ,\ i,j = 1,2,\ldots,m$$

Задача о поиске матрицы T сводится к минимизации функции

$$F_1T = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}\Big(\sum_{k=1}^{m}(a_{ik}t_{kj} - t_{ik}a'_{kj})\Big)^2$$

при условиях

$$\sum_{i=1}^{m} t_{ij} = 1,, \qquad j = 1,2,\ldots,m,$$

$$\sum_{j=1}^{m} t_{ij} = 1, \qquad i = 1,2,\ldots,m,$$

$$t_{ij} \in \{0,1\}\mathrm{t_{ij}}, \qquad i,j = 1,2,\ldots,m.$$

В нашем случае минимальное значение функции $F_1T$ равно нулю, а по [12] нулевые минимальные значения нелинейных целевых функций *($F_1T$)* достигаются для изоморфных графов и только для них, что говорит об изоморфизме графов *G(U, X) и G'(U',X').*

Таким образом, конечной целью представления системной модели на структурном непроизводном уровне является декомпозиция структуры системы на НСЭ и выявление их взаимного сочетания. Эта процедура сводится к поиску полных подграфов («клик») графа *G=(U, X)*. Результатом является набор «клик» соответствующих набору НСЭ ТС.

**Заключение**

Предложенные методы формального представления ТС на этапе структурного непроизводного уровня позволили сформировать базу знаний, включающую в себя несколько десятков НСЭ транспортной сети. Данная база входит в состав информационно-аналитического комплекса анализа состояния ТС.

**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] James M. Lyneis System dynamics applied to project management: a survey, assessment, and directions for future research . [Текст]/ James M. Lyneis and David N. Ford - System Dynamics Review Vol. 23, No. 2/3, (Summer/Fall 2007): 157-189.

[10] Антонов А.В. Системный анализ. Учеб. для ВУЗов [Текст] / А.В. Антонов – М.: Высш. шк., 2004. – 454 с.

[11] Мишина А.П. Высшая алгебра [Текст] / А.П. Мишина, И.В. Проскуряков – М.: Наука, 1962.

[12] Сигал И.Х. Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы. Учеб. пособие. [Текст] / И.Х. Сигал, А.П. Иванова – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 240 с.

# СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТИПОВ ПОДВИЖНЫХ ЕДИНИЦ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

**М.В. Ромкин[1], В.А. Засов[2]**

[1]Куйбышевская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»
Самарская дистанция сигнализации, централизации и блокировки
443036, Самара, ул. Неверова, 168-А, Россия
romkinmaks@rambler.ru
тел: +7 (846) 303-72-93

[2]Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС)
443066, Самара, 1-й Безымянный пер., 18, Россия
vzasov@samiit.ru
тел: +7 (846) 958-09-52

***Ключевые слова:*** *идентификация, информационно-управляющая система, геометрические параметры, типы единиц подвижного состава, база данных, индуктивные датчики, блок вычисления*

**Abstract**
The identification of railway vehicles is based on their geometric parameters: both measurable (the distance between the wheel set axis) and designed (overall lengths). The paper describes the system's structure, an algorithm of its performance, and the structure of the database stating the compliance of identity features with the types of railway rolling stock.

## Введение

Одним из важных направлений совершенствования работы железнодорожного транспорта является разработка научно-обоснованных методов управления, в которых должна найти отражение специфика функционирования как отдельных дорог, так и железнодорожной сети в целом. Реализация этих методов в значительной мере связывается с разработкой и внедрением новых информационно-управляющих систем (ИУС), которые позволяют осуществлять слежение за положением вагонов и локомотивов на полигонах дорог и контролировать перемещение поездов с заданной схемой расположения вагонов через железнодорожные станции и узлы. Важнейшей составной частью таких ИУС являются системы автоматической идентификации (САИ) единиц железнодорожного подвижного состава, которые по существу представляют собой низовое звено, служащее для сбора первичной информации для ИУС обеспечивающих слежение за размещением единиц железнодорожного подвижного состава на полигонах дорог.

Проблема автоматической идентификации единиц железнодорожного подвижного состава сформировалась еще в 60-70-е годы прошлого века. За прошедшее время, как в России, так и за рубежом накоплен солидный опыт в разработке и внедрении различных методов идентификации с использованием самых различных физических принципов, таких, например, как оптического, радиационного, магнитного, радиоволнового, с использованием спутниковых систем навигации и связи.

Работа существующих САИ базируется, как правило, на считывании информации с бортовых датчиков (транспондеров), маркеров или меток, которыми оснащается железнодорожный подвижной состав [1, 2]. Отсюда следует основной недостаток существующих САИ - необходимость установки на подвижной состав таких специальных устройств и оперативный контроль их работоспособности. Такие факторы, как громадное число эксплуатируемых единиц подвижного состава, расположение и перемещение локомотивов и вагонов на большой

территории, жесткие внешние воздействия при проведении погрузочно-разгрузочных работ, обуславливающие высокую вероятность загрязнения или поломки бортовых устройств САИ, вандализм существенно усложняют эксплуатацию и мониторинг САИ, снижают надежность идентификации единиц железнодорожного подвижного состава и, следовательно, эффективность управления перевозочным процессом. Кроме того, на процесс идентификации единиц железнодорожного подвижного состава существенно влияют и другие факторы: погодные условия, время суток, сезонные и климатические условия.

Существуют САИ типов подвижных единиц железнодорожного транспорта, принцип работы которой основан на определении геометрических параметров подвижных единиц. Эти параметры естественным образом присущи типам подвижных единиц, не требуют доработки последних. К числу таких САИ относится устройство идентификации в составе многофункционального комплекса технических средств (КТСМ) [3]. Но это устройство имеет ограниченные функциональные возможности и позволяет идентифицировать только класс подвижной единицы (локомотив или вагон) и вид вагона (пассажирский или грузовой), без определения конкретного типа единиц подвижного состава.

Таким образом, разработка САИ, отличающихся невысокой стоимостью, высокой надежностью и функциональными возможностями, позволяющими увеличить число идентифицированных типов подвижных единиц, является актуальной задачей.

## 1 Выбор и обоснование идентификационных признаков, присущих единицам железнодорожного подвижного состава

Условно все множество единиц железнодорожного подвижного состава, подлежащих классификации можно представить множеством $E = \{e_k\}$. Каждая единица подвижного состава обладает числом степеней свободы m, равным числу признаков, с помощью которых ее можно описать. Таким образом, любую единицу подвижного состава $e_k$ можно описать с помощью многомерной дискретной величины (или многомерного признака) $e_k = (x_k^{(1)}, x_k^{(2)}, \ldots x_k^{(m)})$, при этом под $x_k^{(n)}$ понимается результат измерения $n$ - го признака $k$ - ой единицы подвижного состава.

Очевидно, что для надежной идентификации типов единиц подвижного состава необходимо определение (измерение) многочисленных наборов и сочетаний разнородных технических признаков, однозначно характеризующих конкретный тип единицы подвижного состава.

Технические параметры единиц подвижного состава к которым относятся: осность, определяемая общим числом колесных пар данной единицы подвижного состава; линейные размеры, определяющие базу единицы подвижного состава, длину по осям автосцепки, длину и ширину кузова, высоту кузова от головок рельсов; тара - вес всех частей единицы подвижного состава (в порожнем состоянии), включая вес тележек и колесных пар; максимальная скорость движения; грузоподъемность (для грузовых вагонов) - наибольший вес груза, который можно перевозить в данном вагоне; тип планировки, населенность и масса экипировки для пассажирских вагонов; мощность локомотивов и род используемого тока для электровозов однозначно характеризуют конкретный тип единицы подвижного состава и их аппаратурное определение может позволить осуществлять идентификацию типов единиц подвижного состава. Однако, определение всех вышеперечисленных параметров при движущемся с произвольной скоростью поезде представляет трудности, как со стороны выбора измерительной аппаратуры и ее размещения в зоне движения поезда, так и со стороны научно-технического обоснования выбора того или иного метода идентификации.

В то же время идентификацию типов единиц подвижного состава можно производить, контролируя сочетания их одноразмерных идентификационных признаков.

В настоящей работе предлагается развитие метода использования геометрических параметров для идентификации типов единиц железнодорожного подвижного состава [4, 5].

Из параметров, присущих всем единицам подвижного состава и неизменных, при любых скоростях и загрузке, остаются осность единиц подвижного состава и их линейные размеры.

Наличие и количество колесных пар единиц подвижного состава без особых затруднений определяются техническими средствами, применяемыми в настоящее время на железных дорогах России (магнитные педали, короткие рельсовые цепи).

Для использования разработанных и уже проверенных в эксплуатации устройств, фиксирующих колесные пары, в качестве датчиков системы идентификации типов единиц подвижного состава, рассмотрим возможность определения с их помощью каких-либо параметров (в данном случае линейных размеров), позволяющих идентифицировать тип единицы. Другими словами, установим возможна ли взаимосвязь между типами единиц подвижного состава и количеством-расположением в них колесных пар, то есть величинами и комбинациями межосевых расстояний.

С этой точки зрения все множество единиц подвижного состава $E$ можно описать одним и тем же набором классов межосевых расстояний $E = \{M(a), M(b), \ldots M(n)\}$. На рисунке 1 показано взаимное расположение межосевых расстояний определенных классов у единицы подвижного состава, которое является постоянным.

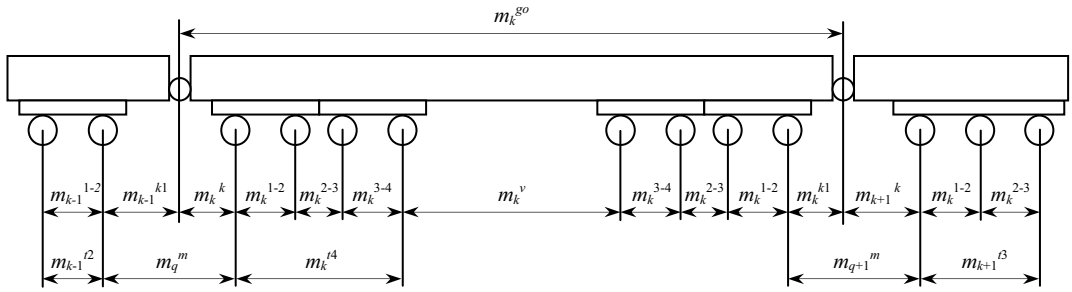



Рисунок 1 – Взаимное расположение межосевых расстояний

Порядок межосевых расстояний следующий:

- расстояние (расстояния) между осями в тележке mkti. Для четырехосной (i=4), трехосной (i=3) и двухосной ($i$=2) тележек данное расстояние будет соответственно:
  $m_k^{t4} = m_k^{1-2} + m_k^{2-3} + m_k^{3-4}$,
  $m_k^{t3} = m_k^{1-2} + m_k^{2-3}$,
  $m_k^{t2} = m_k^{1-2}$,

где $m^{1-2} \in M^{(t)}$ - расстояние между осями первой и второй колесных пар тележки;
$m^{2-3} \in M^{(t)}$ - расстояние между осями второй и третьей колесных пар тележки;
$m^{3-4} \in M^{(t)}$ - расстояние между осями третьей и четвертой колесных пар тележки,
окончание следования которых можно контролировать по принадлежности их к соответствующему классу;

- расстояние между последней колесной парой первой тележки и первой колесной парой второй тележки единицы подвижного состава $m_k^{v} \in M^{(v)}$;
- расстояние (расстояния) между осями в тележке $m_k^{ti}$.

Следовательно, любую единицу подвижного состава можно выразить формулой (1):

(1) $e_k = \{m_k^{ti}, m_k^{v}\}$.

Известно, что с увеличением числа признаков, используемых при распознавании, вероятность правильного распознавания объектов увеличивается. Для увеличения числа идентификационных признаков, введем дополнительно габаритную длину единицы подвижного состава по осям автосцепки (которая является одним из линейных размеров единицы подвижного состава) и обозначим ее как $m_k^{go} \in M^{(go)}$. Данное расстояние можно представить формулой (2):

(2) $m_k^{go} = m_k^{k} + m_k^{ti} + m_k^{v} + m_k^{ti} + m_k^{k1}$,

где $m_k^{k} \in M^{(k)}$ - расстояние от оси автосцепки до первой колесной пары;

$m_k^{k1} \in M^{(k)}$ - расстояние от последней колесной пары до оси автосцепки.

Измерение напрямую, то есть без установки дополнительных функциональных датчиков, расстояния от оси автосцепки до первой колесной пары $m_k^{k}$ невозможно. Но при движении единиц подвижного состава в поезде появляется еще одно межосевое расстояние - расстояние между осями внешних колесных пар единиц подвижного состава, следующих друг за другом $m_q^{m} \in M^{(m)}$. Величина последнего может использоваться для определения расстояния от оси автосцепки до первой колесной пары, при известном типе и соответственно известном расстоянии от последней колесной пары до оси автосцепки предшествующей подвижной единицы, по формуле (3):

(3) $m_k^{k} = m_q^{m} - m_{k\text{-}1}^{k1}$,

где $m_{k\text{-}1}^{k1}$ - расстояние от последней колесной пары до оси автосцепки предшествующей подвижной единицы.

После добавления габаритной длины по осям автосцепки $m_k^{go} \in M^{(go)}$ в формулу (1), получим

(4) $e_k = \{m_k^{go}, m_k^{ti}, m_k^{v}\}$.

Для определения габаритных длин по осям автосцепок по формуле (2) необходимо знать тип предшествующей подвижной единицы. Таким образом, идентификация типов единиц подвижного состава в поезде возможна только при правильном определении типа первой единицы подвижного состава, то есть локомотива. Однако у локомотивов, согласно формуле (4), будут присутствовать все те же классы расстояний. Поэтому идентификация его типа должна производиться без определения расстояния от оси автосцепки до первой колесной пары, ввиду отсутствия возможности измерить «навесную» часть локомотива. Это без особых затруднений реализуемо ввиду индивидуальных значений у локомотивов таких классов расстояний, как класс расстояний между осями колесных пар в тележке и класс расстояний между последней колесной парой первой тележки и первой колесной парой второй тележки единицы подвижного состава.

Определение расстояний этих классов, с указанием принадлежности каждого к своему, позволит однозначно произвести идентификацию типа единицы подвижного состава. Таковыми являются класс расстояний между осями колесных пар в тележке $M^{(t)}$, класс габаритных расстояний по осям автосцепки $M^{(go)}$ и класс расстояний между последней колесной парой первой тележки и первой колесной парой второй тележки единицы подвижного состава $M^{(v)}$.

Проведенные выше рассуждения о соответствии определенного набора межосевых расстояний конкретному типу единицы подвижного состава были подтверждены реальными техническими характеристиками локомотивов и вагонов и позволили выделить классы расстояний, которые являются неотъемлемыми и универсальными при построении исходных моделей различных типов единиц подвижного состава.

Предлагаемые классы расстояний позволяют идентифицировать следующие типы единиц железнодорожного подвижного состава: локомотивы (электровозы и тепловозы различных модификаций), пассажирские вагоны, грузовые вагоны (крытые вагоны, полувагоны, платформы, хопперы, цистерны, думпкары, транспортеры и др.), мотрисы, дрезины и другие типы.

## 2 Алгоритм идентификации типов единиц железнодорожного подвижного состава

Проведенный анализ позволил установить взаимосвязь идентификационных признаков и типов единиц подвижного состава, которая представлена на рисунке 2. Например, на основе измеренных расстояний между осями в тележке определяется ее тип (блок «тележки»). Далее, на основе информации о типе тележки и дополнительной информации о количестве осей,

расстоянии между колесными парами разных тележек и др. (блок «модели»), определяется конкретный тип единицы подвижного состава.

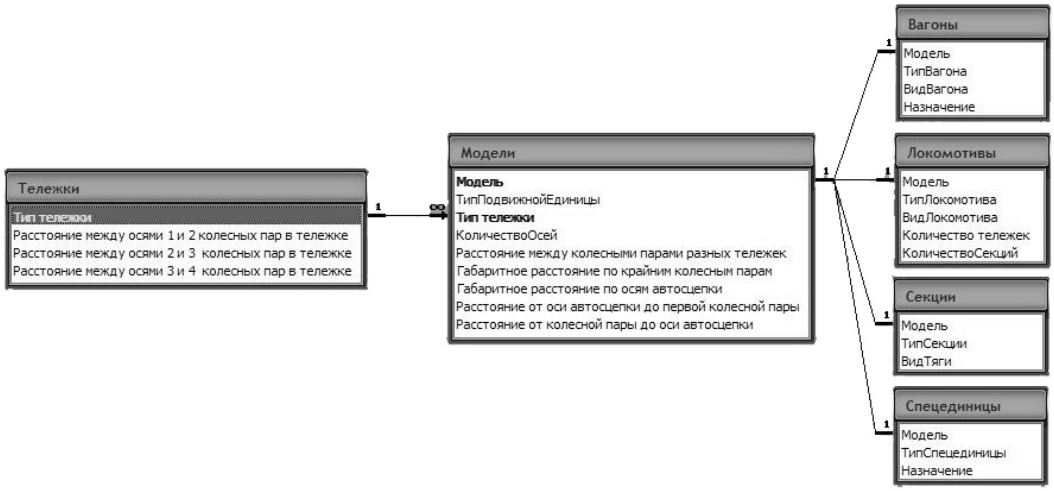



Рисунок 2 – Взаимосвязь идентификационных признаков и типов единиц подвижного состава

Алгоритм процесса идентификации типов единиц подвижного состава представлен на рисунке 3, а в [6] описывается реализующая его программа.

При прохождении первой единицы подвижного состава (ПЕ) зоны контроля, производится измерение всех ее межосевых расстояний (МР), их идентификация и выборка из базы данных соответствующих типов единиц подвижного состава. После прохождения единицы подвижного состава зоны контроля, идентифицируется принадлежность ее к классу локомотивов.

Если единица подвижного состава – локомотив, то производится запись длины его навесной части из базы данных в память, измерение расстояния между единицами подвижного состава по осям колесных пар и обновление в памяти значения длины навесной части следующей подвижной единицы.

Если единица подвижного состава – вагон, производится считывание из памяти значения длины навесной части, расчет габаритной длины вагона по осям автосцепки, идентификация типа вагона, измерение расстояния между единицами подвижного состава по осям колесных пар и обновление в памяти значения длины навесной части следующей подвижной единицы.

Идентификация следующих за первой единиц подвижного состава, производится аналогично, то есть, алгоритм работы системы является циклическим.

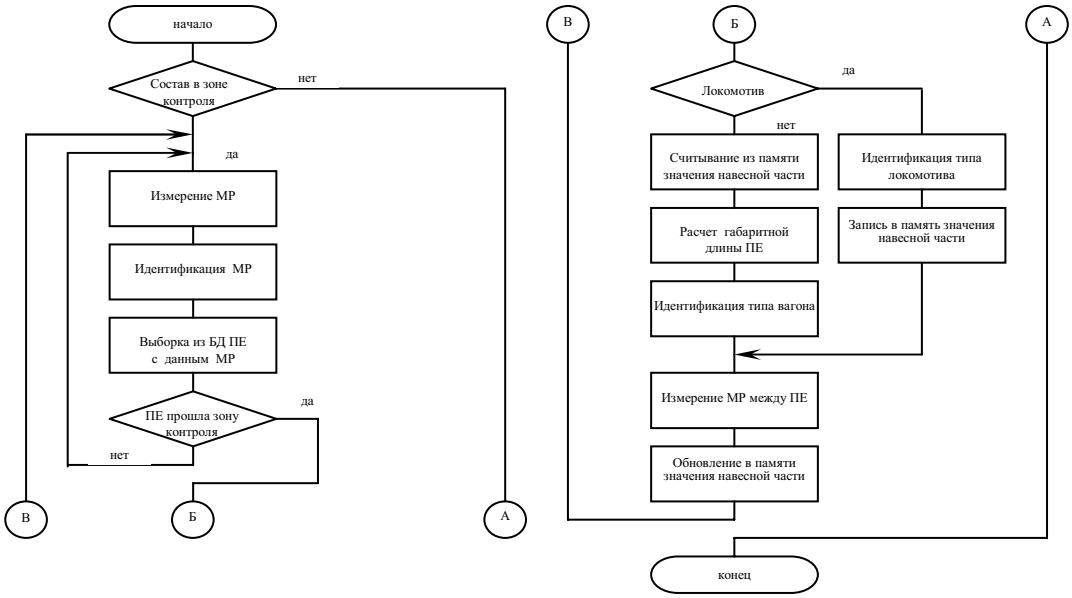



Рисунок 3 – Алгоритм идентификации типа единицы подвижного состава

## 3 Реализация системы идентификации типов единиц железнодорожного подвижного состава

Функциональная схема системы идентификации типов единиц подвижного состава, реализующей вышерассмотренный алгоритм работы, представлена на рисунке 4.

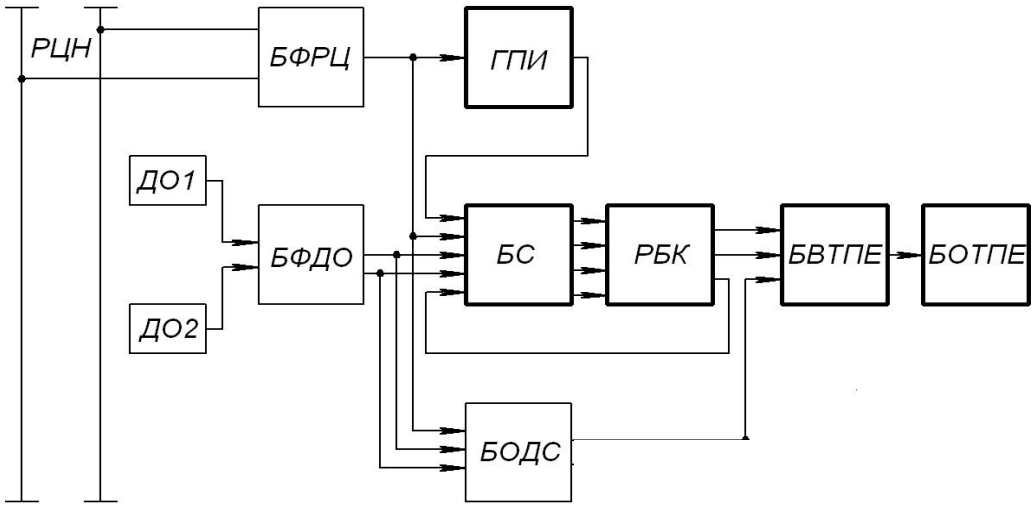



Рисунок 4 – Функциональная схема системы идентификации типов единиц подвижного состава

Предлагаемая система [7] содержит рельсовую цепь наложения (РЦН), блок формирователя рельсовой цепи (БФРЦ), генератор прямоугольных импульсов (ГПИ), блок счетчиков (БС), включающий в себя три счетчика, блок обработки дискретных сигналов (БОДС), два индукционных датчика прохода колесной пары (ДО1, ДО2), блок формирователей датчиков осей (БФДО), регистрирующий блок коммутации (РБК), включающий в себя оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), блок вычисления типа подвижной единицы (БВТПЕ), включающий в себя перепрограммируемое запоминающее устройство (ППЗУ), с записанными в него значениями всех межосевых расстояний и габаритных длин единиц подвижного состава, блок отображения типов подвижных единиц (БОТПЕ).

Система работает следующим образом.

При заходе поезда на рельсовую цепь наложения происходит включение измерительной аппаратуры.

При проходе первой колесной пары локомотива в зоне первого датчика прохода колесной пары, фиксируется проход первой колесной пары единицы подвижного состава и одновременно начинается отсчет временных интервалов, соответствующих мерному расстоянию между первым и вторым датчиками прохода колесной пары и расстоянию между осями первой и второй колесных пар.

После прохождения первой колесной пары в зоне второго датчика, заканчивается измерение временного интервала, соответствующего мерному расстоянию, ограниченному датчиками прохода колесной пары. На основании результата данного измерения рассчитывается скорость движения поезда в данный момент времени.

Измерение временного интервала, соответствующего расстоянию между осями первой и второй колесных пар заканчивается по сигналу от первого датчика при проходе второй колесной пары локомотива в его зоне, при известной скорости движения, рассчитывается реальное межосевое расстояние и определяется к какому классу оно относится. По этому же сигналу одновременно начинается отсчет временных интервалов, соответствующих мерному расстоянию между первым и вторым датчиками прохода колесной пары и расстоянию между осями второй и третьей колесных пар.

Измерение всех расстояний между осями соседних колесных пар в составе производится аналогично вышеописанному.

После прохождения первых трех колесных пар в зоне первого датчика и определения расстояний между ними, производится идентификация конкретного типа тележки. Далее, при прохождении остальных колесных пар локомотива фиксируется их прохождение, производится измерение и классификация расстояний между ними и выявляется последняя колесная пара локомотива.

По сигналу о прохождении последней колесной пары локомотива одновременно производится идентификация типа локомотива, начинается формирование модели поезда, записывается в ОЗУ из ППЗУ значение длины навесной части данного типа локомотива и начинается измерение расстояния между осями последней колесной пары локомотива и первой колесной пары следующей за ним единицы подвижного состава.

По сигналу о прохождении первой колесной пары в зоне первого датчика следующей за локомотивом единицы подвижного состава заканчивается измерение расстояния между осями последней колесной пары локомотива и первой колесной пары следующей единицы подвижного состава. Далее, используя полученную величину и величину, находящуюся в ОЗУ, производится расчет расстояния от оси автосцепки до оси первой колесной пары, следующей за локомотивом единицы подвижного состава, после чего данное расстояние записывается в ОЗУ.

После прохождения единицы подвижного состава, следующей за локомотивом, в зоне первого датчика, идентификации конкретного типа ее тележки, измерения расстояния между последней колесной парой первой тележки и первой колесной парой второй тележки и фикси-

рования последней колесной пары, используя величину, находящуюся в ОЗУ, определяется габаритная длина по осям автосцепки и идентифицируется тип единицы подвижного состава.

Идентификация типов остальных единиц подвижного состава и формирование модели поезда производится аналогично вышеописанному. При этом каждый раз после определения расстояния между осью последней колесной пары идентифицируемой единицы и осью первой колесной пары следующей производится обновление значения в ОЗУ.

При превышении значения данного расстояния максимально возможного из данного класса формируется сигнал о проходе поезда, сравнение переданной с предыдущего контрольного пункта с полученной моделью его, передача ее на следующий контрольный пункт и выключение измерительной аппаратуры.

Рассмотренный принцип идентификации является технологичным, так как, позволяет использовать датчики, широко применяемой в настоящее время на железных дорогах России аппаратуры КТСМ. Таким образом, стоимость и сроки внедрения предлагаемой в работе САИ, можно существенно сократить.

**Заключение**

Предложена САИ типов подвижных единиц железнодорожного транспорта, принцип работы которой основан на определении геометрических параметров подвижных единиц: габаритных размеров между автосцепками, расстояний между осями колесных пар и др. Эти параметры естественным образом присущи типам подвижных единиц, не требуют доработки последних, что выгодно отличает предлагаемую систему от известных.

Обоснована однозначность определения типов подвижных единиц по предложенным геометрическим признакам, сформировано информационное пространство идентификационных признаков и предложена математическая модель определения типов подвижных единиц: локомотивов, пассажирских и различных грузовых вагонов.

Разработаны алгоритм и функциональная схема САИ.

Рассмотрен вариант реализации САИ с использованием датчиков аппаратуры КТСМ, что позволяет сократить стоимость и сроки внедрения предлагаемой в работе системы.

**Список литературы**


[1] «Пальма» – система автоматической идентификации транспортных средств / В.В.Белов [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2002. № 8. С. 54...59.

[2] Малыгин Л.Л., Мошников В.В., Царев В.А. Оптоэлектронная система идентификации объектов подвижного состава ARSCIS на станции Череповец Северной железной дороги / Сборник докладов научно-практической конференции «Инновационные проекты, новые технологии и изобретения». – 27-28 октября 2005 г., Экспериментальное кольцо ВНИИЖТ. – М.: ВГУП ВНИИЖТ. С. 122-130.

[3] Швалов Д.В., Шаповалов В.В. Системы диагностики подвижного состава: Учебник для вузов, техникумов и колледжей ж.-д. транспорта / под ред. Д.В.Швалова. – М.: Маршрут, 2005. – 268 с.

[4] Геометрические параметры для идентификации единиц железнодорожного подвижного состава. М.В. Ромкин, Д.К. Тюмиков // Вестник транспорта поволжья. – 2008. – №1 (13).

[5] Метод автоматической идентификации единиц подвижного состава в оперативном планировании / М.В.Ромкин // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития транспортного комплекса». – Самара: СамГУПС, 2008. – 340 с.

[6] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008615682 от 28.11.2008г. Программный комплекс для идентификации единиц подвижного состава / М.В.Ромкин.

[7] Патент на полезную модель №78159 от 20.11.2008г. Устройство идентификации единиц подвижного состава / М.В.Ромкин. Опубликовано 20.11.2008г. бюллетень № 32.

# АППРОКСИМАЦИОННАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ В ПРОЦЕССАХ УПРАВЛЕНИЯ

**А.Б. Филимонов[1], Н.Б. Филимонов[2]**

[1]Московский государственный университет приборостроения и информатики
107996, Москва, ул. Стромынка, 20, 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, МГУ, Россия
nbfilimonov@mail.ru
тел/факс: +7 (499) 269-55-10

***Ключевые слова:*** *линейные обратные задачи динамики, допустимая погрешность, интегральная квадратичная мера невязки, эталонная модель управляемого выхода, линейно-квадратичная оптимизация управления*

**Abstract**

The inverse problems of dynamics occupy the peculiar position in contemporary control theory. In their conventional statement the faithful realization of the given goal movements is required. But this requirement essentially limits the conditions of solvability of the given type problems. In this connection for theory and practice of automatic systems the considered schemes of formalization and solutions of inverse problems of dynamics depended on receiving the admissible approximations to standard movements are of interest.

Обратная задачах динамики (ОЗД) управляемой системы состоит в нахождении неизвестного закона управления по известному закону движения системы [1]. В настоящей работе предлагается метод решения линейных ОЗД, базирующийся на формализме квадратичной оптимизации процессов управления (АКОР). Эффективность метода обусловлена хорошо изученным аналитическим аппаратом и развитым алгоритмическим инструментарием решения ЛК-задач управления [2].

Положим, динамика объекта описывается уравнениями

(1) $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0(t)\mathbf{x} + \mathbf{B}_0(t)\mathbf{u}(t)$,

(2) $\mathbf{y} = \mathbf{C}_0(t)\mathbf{x}$.

Здесь $t \in \mathbf{T} = [t_0, t_F]$, T - интервал времени протекания процесса управления; $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^r$ - управляющий вход, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ - состояние, $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^m$ - управляемый выход; $\mathbf{A}_0(t)$, $\mathbf{B}_0(t)$, $\mathbf{C}_0(t)$ - функциональные матрицы соответствующих размеров.

Пусть задана желаемая программа изменения выхода: $\mathbf{y}^*(t)$ $(t \in \mathbf{T})$. Необходимо найти управляющее воздействие

(3) $\mathbf{u} = \mathbf{u}^*(t)$,

генерирующее желаемую реакцию выхода:

(4) $\mathbf{y} \approx \mathbf{y}^*(t)$.

Заметим, что для инженерных приложений требование строго соблюдения равенства в соотношении (4) нерационально. Действительно, поскольку априорная модель динамики объекта (1), (2) лишь приближенно описывает его реальные динамические свойства, то неизбежно введение некоторой допустимой погрешности при решении задач управления.

Будем оценивать близость сигналов по $L_2$-норме (интегральной квадратичной метрике). Тогда условие (4) можно уточнить в форме интегрального ограничения

$$(5)\quad \int_0^{t_F} [\|\mathbf{y}(t)-\mathbf{y}^*(t)\|]^2 \le \Delta .$$

Здесь прямые двойные скобки $\|...\|$ обозначают эвклидову норму вектора, а $\Delta>0$ - допустимый порог отклонения фактической реакции выхода от эталонной, оцениваемого по квадрату $L_2$-нормы.

**Примечание**. Возможность сколь угодно точного приближения управляемого выхода системы к любой эталонной функции из пространства $L_2(\mathbf{T})$ характеризует т.н. свойство функциональной управляемости динамических систем [3].

Придадим решаемой задаче управления оптимизационную постановку - необходимо найти управляющее воздействие (3), обеспечивающее выполнение требования (5) с минимальными энергозатратами:

$$(6)\quad \int_0^{t_F} \|\mathbf{u}(t)\|^2\, dt \to \min .$$

Задача условной оптимизации (5), (6) сводится к однокритериальной задаче

$$(7)\quad J=\int_0^{t_F} (\|\mathbf{y}(t)-\mathbf{y}^*(t)\|^2 + R\|\mathbf{u}(t)\|^2)\, dt \to \min$$

при надлежащем выборе весового множителя $R>0$. Такое сведение основывается на методе множителей Лагранжа [4].

Последнюю задачу предлагается рассматривать в контексте более общей оптимизационной задачи управления с эталонной динамической моделью, которая в свою очередь просто сводится к стандартной ЛК-задаче оптимального управления.

**Эталонная динамическая модель**

Функциональная форма желаемой реакции выхода объекта имеет существенный недостаток - она не учитывает возможный разброс в его начальных состояниях. Более гибкий механизм задания желаемой динамики опирается на концепцию эталонной динамической модели.

Желаемую динамику управляемого выхода объекта представим эталонной моделью:

$$(8)\quad \dot{\mathbf{x}}_M = \mathbf{A}_M(t)\mathbf{x}_M ,$$

$$(9)\quad \mathbf{y}_M = \mathbf{C}_M(t)\mathbf{x}_M ,$$

где $t\in\mathbf{T}$, $\mathbf{x}_M\in\mathbf{R}^{n_M}$ - состояние; $\mathbf{y}_M\in\mathbf{R}^m$ - выход модели. Переходные процессы в системе образуют линейным пространство размерности $n_M$, причем конкретная эталонная реакция выхода определяется выбором начального состояния модели $\mathbf{x}_M(0)$.

Нетрудно видеть, что данная динамическая модель охватывает и функциональный вариант задания программы (4):

$$(10)\quad \mathbf{y}^*(t)=\mathbf{y}_M(t).$$

Действительно, этому равенству отвечают следующие параметры модели:

$n_{\mathrm{M}}=1$, $\mathbf{A}_{\mathrm{M}}(t)\equiv 0$, $\mathbf{C}_{\mathrm{M}}(t)=\mathbf{y}^{*}(t)$, $\mathbf{x}_{\mathrm{M}}(0)=1$.

**ЛК-формализация задачи управления**

Динамику состояния объекта и эталонной модели представим совместно расширенной (extended) моделью объекта порядка

$n_{\mathrm{E}}=n_0+n_{\mathrm{M}}$.

Общий вид уравнения состояния расширенной модели:

(11) $\dot{\mathbf{x}}_{\mathrm{E}}=\mathbf{A}(t)\mathbf{x}_{\mathrm{E}}+\mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t)$.

Примем следующую блочную структуру ее вектора состояния [5]:

(12) $\mathbf{x}_{\mathrm{E}}=\begin{bmatrix}\mathbf{x}\\ \hline \mathbf{x}_{\mathrm{M}}\end{bmatrix}$.

Она порождает следующее блочное разбиение коэффициентных матриц в (11):

$$\mathbf{A}(t)=\left[\begin{array}{c|c}\mathbf{A}_0(t) & 0\\ \hline 0 & \mathbf{A}_{\mathrm{M}}(t)\end{array}\right],\quad \mathbf{B}(t)=\left[\begin{array}{c}\mathbf{B}_0(t)\\ \hline 0\end{array}\right].$$

Здесь незаполненным блокам отвечают нулевые подматрицы.

Введем невязку реакций объекта и эталонной модели:

$\Delta\mathbf{y}(t)=\mathbf{y}(t)-\mathbf{y}_{\mathrm{M}}(t)$.

Согласно (2), (9) и (12)

$\Delta\mathbf{y}(t)=\left[\mathbf{C}_0(t)\ \vdots\ -\mathbf{C}_{\mathrm{M}}(t)\right]\mathbf{x}_{\mathrm{E}}(t)$.

В соответствии с (7) и (10) приходим к задаче оптимизации процесса управления в системе (11) по критерию

(13) $J=\int_0^{t_{\mathrm{F}}}[\|\Delta\mathbf{y}(t)\|^2+R\|\mathbf{u}(t)\|^2]\,dt$.

В общей постановке ЛК-задачи управления для класса систем (11) минимизируется квадратичный функционал

(14) $J=\int_0^{t_{\mathrm{F}}}[\langle\mathbf{x}_{\mathrm{E}}(t),\mathbf{Q}(t)\mathbf{x}_{\mathrm{E}}(t)\rangle+\langle\mathbf{u}(t),\mathbf{R}(t)\mathbf{u}(t)\rangle]\,dt+\langle\mathbf{x}_{\mathrm{E}}(t_{\mathrm{F}}),\mathbf{Q}_{\mathrm{F}}\mathbf{x}_{\mathrm{E}}(t_{\mathrm{F}})\rangle$.

где $\mathbf{Q}(t),\mathbf{Q}_{\mathrm{F}}$ - симметрические неотрицательно определенные $n_{\mathrm{E}}\times n_{\mathrm{E}}$-матрицы, а $\mathbf{R}(t)$ - симметрическая положительно определенная $r\times r$-матрица. Угловые скобки $\langle\ldots\rangle$ обозначают скалярное произведение двух векторов.

Из (14) следует критерий (13), если положить

$\mathbf{Q}(t)=\left[\mathbf{C}_0(t)\ \vdots\ -\mathbf{C}_{\mathrm{M}}(t)\right]^{\mathrm{T}}\left[\mathbf{C}_0(t)\ \vdots\ -\mathbf{C}_{\mathrm{M}}(t)\right]$,

$\mathbf{Q}_{\mathrm{F}}=0$, $\mathbf{R}(t)=R\,\mathbf{E}_r$.

Здесь верхний индекс «Т» означает операцию транспонирования матрицы, $\mathbf{E}_r$ - единичная матрица $r$-го порядка.

Как известно, оптимальным в смысле критерия (14) является линейный закон управления:

(15) $\mathbf{u}^{*}=-\mathbf{K}(t)\mathbf{x}_{\mathrm{E}}$,

где

$\mathbf{K}(t)=\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^{\mathrm{T}}(t)\mathbf{P}(t)$,

$\mathbf{P}(t)$ - симметричная $n_{\mathrm{E}} \times n_{\mathrm{E}}$ -матрица, удовлетворяющая матричному уравнению Риккати

(16) $-\dot{\mathbf{P}}(t) = -\mathbf{P}(t)\mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^{\mathrm{T}}(t)\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{A}(t) + \mathbf{A}^{\mathrm{T}}(t)\mathbf{P}(t) + \mathbf{Q}(t)$

с граничным условием

(17) $\mathbf{P}(t_{\mathrm{F}}) = \mathbf{Q}_{\mathrm{F}}$.

Заметим, что решение $\mathbf{P}(t)$ можно найти посредством интегрирования уравнения (16) в обратном времени от момента $t = t_{\mathrm{F}}$ с начальным условием (17).

Разобьем матрицу $\mathbf{K}(t)$ на блоки размеров $r \times n$ и $r \times n_{\mathrm{M}}$:

$$\mathbf{K}(t) = \left[\mathbf{K}_0(t) \,\vdots\, \mathbf{K}_{\mathrm{M}}(t)\right].$$

Согласно (12) и (15) оптимальный закон управления примет вид

(18) $\mathbf{u}^*(t) = -\mathbf{K}_0(t)\mathbf{x}_0(t) - \mathbf{K}_{\mathrm{M}}(t)\mathbf{x}_{\mathrm{M}}(t)$.

Данная формула показывает наличие в структуре управления двух составляющих: одна является обратной связью по состоянию объекта, а другая формируется по состоянию эталонной модели.

Заметим, что обратная связь осуществляет оптимальное управление объектом в случае

$\mathbf{y}^*(t) \equiv 0$,

т.е. по своему действию является стабилизирующей. Более того, она инвариантна к переходным процессам в эталонной модели (8), (9).

Таким образом, закон управления (18) характеризуется следующим важным структурным аспектом: управление разлагается на две составляющие - стабилизирующую и программную. Первая реализуется обратной связью по состоянию объекта, а вторая генерируется с помощью эталонной модели динамики выхода.

**Список литературы**


[1] Крутько П.Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления / Машиностроение. Энциклопедия. Т. 1-4. Автоматическое управление. Теория. Разд. 4 / Е.А. Федосов, А.А. Красовский, Е.П. Попов и др. Под общ. ред. Е.А. Федосова. М.: Машиностроение, 2000. - С. 331-376.

[2] Медведев В.С. Управление линейным объектом по квадратичному критерию качества. - там же. Гл. 1.10. - С. 142-149.

[3] Филимонов Н.Б. Функциональная управляемость и синтез систем управления методом обратных задач динамики // Автоматическое управление объектами с переменными характеристиками: Межвуз. сб. науч. тр. Новосибирск, 1986. С. 58-68.

[4] Сю Д., Мейер А. Современная теория автоматического управления и ее применение. М.: Машиностроение, 1972. - 544 с.

[5] Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-ти тт. Т. 4. Теория оптимизации систем автоматического управления. Т.5.3. Задача АКОР для отслеживания известного задающего воздействия / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004 - С. 704-705.

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА УСРЕДНЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ

**Ю.М. Заболотнов**

Самарский государственный аэрокосмический университет имени ак. С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)
443086, Самара, Московское шоссе, 34, Россия
yumz@yandex.ru
тел: +7 (846) 267-46-73, факс: +7 (846) 335-18-16

***Ключевые слова:*** *метод усреднения, колебательные системы, динамическое программирование, устойчивость, оптимальное управление*

**Abstract**

The construction method approximately optimum controls for oscillatory systems is offered. The method consists in joint application of a principle of dynamic programming of Bellman, the theory of stability of Lyapunov and an averaging method. The basic ratio for constructions of optimum control by oscillatory system with several frequencies are resulted.

## Введение

Предлагается метод оптимального управления колебательными системами. Рассматриваемые динамические системы представляют собой системы с распределенными или с сосредоточенными параметрами. Математическими моделями таких систем являются системы обыкновенных дифференциальных уравнений или в частных производных. Подобные математические модели часто встречаются при исследовании динамики движения механических систем, используемых в авиационно-космической технике. Метод построения оптимальных управлений основывается на совместном применении принципа динамического программирования Беллмана, методов анализа устойчивости динамических систем Ляпунова и метода усреднения. Предлагается общая форма критериев оптимальности, наиболее рациональная для данных систем. Рассматривается применение предлагаемого метода для управления одночастотными и двухчастотными системами. Приводятся соответствующие примеры.

Управление колебательными системами имеет свои особенности, основные из которых следующие: 1) периодический или почти периодический характер изменения переменных состояния; 2) возможность возникновения автоколебательных режимов; 3) возможность возникновения резонансов. Мощным средством анализа автоколебательных и резонансных режимов, возникающих в колебательных системах, является метод усреднения [1,2]. Метод основывается на специальных преобразованиях исходной системы, проведении замен переменных и на принципе разделения решений на невозмущенное и возмущенное с помощью введение в систему малого параметра. Введение в систему малого параметра может быть осуществленного несколькими способами и определяется постановкой конкретной задачи [3]. Вопрос использования метода усреднения для управления колебательными системами затрагивался в монографиях [1,4], где была показана возможность применения метода для построения приближенно оптимальных управлений. Имеются примеры использования метода усреднения в прикладных задачах управления, например, в механике космического полета с малой тягой [5].

Настоящая работа посвящена построению приближенно оптимальных управлений колебательными системами при решении задач стабилизации (задачи демпфирования, гашения колебаний). Предлагаемый метод может быть применен как линейных систем, так и для нелинейных, в которых возможно возникновение автоколебательных режимов движения. Управле-

ние колебательными системами при возникновении в них резонансных режимов не рассматривается.

## 1 Математическая постановка задачи

Рассматриваются колебательные системы, поведение которых описывается следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$(1) \quad A\frac{d^2x}{dt^2} + C\,x = \varepsilon\, Q\left(x, \frac{dx}{dt}\right) + \varepsilon\, m\, u,$$

где $x$ – $n$ мерный вектор переменных состояния системы, $A$ и $C$ – известные квадратные матрицы, $\varepsilon$ – малый параметр задачи, $Q\left(x, \frac{dx}{dt}\right)$ – вектор-функция возмущений, действующих на систему; $m$ – матрица, определяющая структуру управляющего устройства в конкретной задаче; $u$ – $k$ мерный вектор управления.

К системе (1) сводятся многие колебательные системы, как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами. В последнем случае исходная система обычно описывается дифференциальными уравнениями в частных производных, однако, применение к ней численных методов дискретизации при учете конечного числа степеней свободы, позволяет записать ее в форме (1). Предполагается, что для системы (1) выполнены условия управляемости и наблюдаемости.

При $\varepsilon = 0$ получаем невозмущенную систему, описывающую малые колебания относительно положения равновесия. Решения этой системы записываются в известной форме

$$(2) \quad x = \sum_{i=1}^{n} K_i V^{(i)} \cos(\phi_i),$$

где $K_i$ и $\varphi_i$ – амплитуды и фазы колебаний, $V^{(i)}$ – собственные вектора невозмущенной системы, $\varphi_i = \omega_i t + \alpha_i$, $\omega_i$ – частоты невозмущенной системы. Для невозмущенного решения (2) параметры $K_i$ и $\alpha_i$ являются произвольными постоянными.

Существование решения невозмущенной системы в форме (2) для конкретных задач управления обеспечивается положительной определенностью матриц $A$ и $C$. В том случае частоты невозмущенной системы определяются из равенства нулю определителя $\mathbf{det}\left(C - \omega^2 A\right) = 0$ (частотное уравнение).

При $u = 0$ получаем систему без управления. В этом случае колебательная система может быть динамически устойчивой или неустойчивой в зависимости от свойств возмущающих функций $Q\left(x, \frac{dx}{dt}\right)$. Динамическая устойчивость или неустойчивость определяется в этом случае медленным изменением амплитуд колебаний системы. Если хотя бы одна амплитуда колебаний увеличивается, то система называется динамически неустойчивой. Кроме того, наличие нелинейных возмущающих функций $Q\left(x, \frac{dx}{dt}\right)$ может приводить к возникновению автоколебательных режимов в неуправляемой колебательной системе.

Ставится задача об оптимальном демпфировании колебаний в системе (1), то есть целью управления является перевод системы в начало координат. Причем оптимальность управления $u$ понимается в смысле минимума функционала

(3) $J = \varepsilon \int_0^{t_k} \left( K^T a K + u^T c u \right) dt,$

где $a$ и $c$ – положительно определенные матрицы весовых коэффициентов критерия оптимальности, $K$ – вектор амплитуд колебаний, $\left( {}^T \right)$ – знак транспонирования.

В простейшем случае матрицы $a$ и $c$ можно задать диагональными. Тогда, фиксируя одну из этих матриц, например, $a$, изменяя диагональные компоненты матрицы $c$ и решая ряд задач оптимального управления, можно выбрать подходящее управление с точки зрения уровня возникающих ошибок управления, которые характеризуются первым слагаемым в интеграле (3) и затратами на управление, которые характеризуются вторым слагаемым в интеграле (3).

## 2 Преобразование исходной системы к переменным «амплитуды – фазы»

Применение метода усреднения к системе (1) предполагает замену переменных в этой системе вида $\left( x, \frac{dx}{dt} \right) \Rightarrow \left( K, \varphi \right)$, $\varphi$ – вектор фаз колебаний. Причем замена переменных осуществляется в соответствии с формулами

(4) $x = \sum_{i=1}^{n} K_i V^{(i)} \cos\left( \varphi_i \right), \quad \frac{dx}{dt} = -\sum_{i=1}^{n} K_i \omega_i V^{(i)} \sin\left( \varphi_i \right),$

которые соответствуют виду невозмущенного решения (2).

Переходя к переменным «амплитуды – фазы», получим для новых переменных

(5) $\frac{dK_i}{dt} = \varepsilon X_i \left( K, \varphi \right) + \varepsilon \left( D u \right)_i \sin \varphi_i, \quad \frac{d\varphi_i}{dt} = \omega_i + \varepsilon ...,$

где $X\left( K, \varphi \right)$ и $D$ – известные вектор-функция и матрица размерностью $n \times k$, $i = 1, ...n$.

## 3 Определение оптимального управления

Для определения оптимального управления используется принцип динамического программирования Беллмана [6,7]. В соответствии с этим принципом оптимальное управление находится из условия

(6) $\min_u \left[ \varepsilon K^T a K + \varepsilon u^T c u + \varepsilon \frac{\partial W}{\partial K} \cdot \left( X\left( K, \phi \right) + \left( D u \right) \cdot \sin \varphi \right) + \frac{\partial W}{\partial \varphi} \cdot \left( \omega + \varepsilon ... \right) \right] = 0.$

где $W(K, \varphi)$ – производящая функция, $\sin \varphi = \left( \sin \varphi_1, ... \sin \varphi_n \right)^T$, $\omega = \left( \omega_1, ... \omega_n \right)^T$, а точка означает скалярное произведение векторов.

Функция, стоящая под знаком минимума в соотношении (6), является квадратичной функцией управления. Поэтому не составляет трудности найти ее минимум по $u$. Для этого надо взять производную от этой функции по вектору $u$ и приравнять эту производную к нулю (необходимые условия экстремума). В итоге получим следующее оптимальное управление

(7) $u^0 = -\frac{1}{2} c^{-1} D^T \left( \frac{\partial W}{\partial K} \sin \varphi \right) + ...,$

где $\frac{\partial W}{\partial K} \sin \varphi = \left( \frac{\partial W}{\partial K_1} \sin \varphi_1, ... \frac{\partial W}{\partial K_n} \sin \varphi_n \right)^T$.

Оптимальное управление (7) найдено с точностью до производящей функции $W(K,\varphi)$. Причем в соотношениях (6) и (7) не записаны некоторые слагаемые, равные нулю с точки зрения применяемого далее для определения функции $W(K,\varphi)$ метода усреднения.

Подставляя оптимальное управление (7) в условие (6) получим уравнение в частных производных для определения функции $W(K,\varphi)$

$$(8)\quad \varepsilon K^T a K + \varepsilon \frac{\partial W}{\partial K}\cdot X(K,\varphi) + \ldots - \frac{\varepsilon}{4}\left[c^{-1}D^T\left(\frac{\partial W}{\partial K}\sin\varphi\right)\right]^T\left[D^T\left(\frac{\partial W}{\partial K}\sin\varphi\right)\right] = 0.$$

## 4 Применение метода усреднения для определения приближенно оптимального управления

При решении уравнения в частных производных (8) применяется метод усреднения, который заключается в поиске решения в виде асимптотических рядов

$$(9)\quad W\left(K^0,\varphi^0\right) = W_0\left(K^0\right) + \varepsilon W_0\left(K^0,\varphi^0\right) + \varepsilon^2 + \ldots$$

$$(10)\quad K = K^0 + \varepsilon u_1\left(K^0,\varphi^0\right) + \varepsilon^2\ldots, \quad \varphi = \varphi^0 + \varepsilon v_1\left(K^0,\varphi^0\right) + \varepsilon^2\ldots,$$

Асимптотические ряды (9), (10) можно интерпретировать как формулы перехода к новым переменным $K^0,\varphi^0$, причем эти переменные удовлетворяют дифференциальным уравнениям, правые части которых не содержат фазы $\varphi^0$

$$(11)\quad \frac{dK^0}{dt} = \varepsilon A_1\left(K^0\right) + \varepsilon^2\ldots, \quad \frac{d\varphi^0}{dt} = \omega + \varepsilon B_1\left(K^0\right) + \varepsilon^2\ldots$$

Функции $u_1\left(K^0,\varphi^0\right)$, $v_1\left(K^0,\varphi^0\right)$, $A_1\left(K^0\right)$, $B_1\left(K^0\right)$ определяются по известной методике метода усреднения [1,2]. Причем функции $u_1\left(K^0,\varphi^0\right)$, $v_1\left(K^0,\varphi^0\right)$ периодичны по каждой из фаз с периодом $2\pi$ и имеют нулевое среднее.

Подставляя ряды (9), (10) и соотношения (11) в уравнение (8), усредняя это уравнение по фазам $\varphi_i^0$ и удерживая слагаемые только порядка $\varepsilon$, получим

$$(12)\quad (K^0)^T a K^0 + \frac{\partial W_0}{\partial K^0}\cdot\left\langle X\left(K^0,\varphi^0\right)\right\rangle - \frac{1}{4}\left\langle\left[c^{-1}D^T\left(\frac{\partial W_0}{\partial K^0}\sin\varphi^0\right)\right]^T\left[D^T\left(\frac{\partial W_0}{\partial K^0}\sin\varphi^0\right)\right]\right\rangle = 0.$$

где оператор $\langle\ldots\rangle$ есть стандартный оператор усреднения.

Уравнение (12) существенно проще исходного уравнения (8), так как слагаемые в него входящие зависят только от амплитуд и не зависят от фаз, причем то же самое справедливо и для производящей функции $W_0\left(K^0\right)$.

Для обеспечения динамической устойчивости точки равновесия колебательной системы $x = 0$ функция $W_0\left(K^0\right)$, удовлетворяющая уравнению (12), должна быть положительно определенной. В этом случае функцию $W_0\left(K^0\right)$ можно рассматривать как функцию Ляпунова, обеспечивающую устойчивость решения $K^0 = 0$ для усредненной системы.

Здесь надо отметить, что при усреднении возмущений $\left\langle X\left(K^0,\phi^0\right)\right\rangle$ в уравнении (12) можно учитывать только линейную часть функции $Q\left(x,\frac{dx}{dt}\right)$, входящей в исходную систему (1), что гарантирует устойчивость решения $K^0=0$ в некоторой окрестности начала координат. В этом случае функция $W_0\left(K^0\right)$ ищется в наиболее простом виде: в виде положительно определенной квадратичной формы $W_0\left(K^0\right)=\left(K^0\right)^T PK^0$, где $P$ – положительно определенная матрица. Подставив решение это решение в уравнение (12), получим алгебраическое уравнение для матрицы $P$, решение которого не представляет трудности.

Окончательно приближенно оптимальное управление (7) примет вид

(13) $u^0=-\frac{1}{2}c^{-1}D^T\left(\frac{\partial W_0}{\partial K^0}\sin\varphi^0\right).$

Подставляя управление (13) в систему (5) и проводя усреднение можно выявить все особенности колебательной системы с управлением, определив ее особые точки, наличие устойчивых или неустойчивых автоколебательных режимов и т п.

## 5 Примеры применения метода

Примеры применения данной методики при построении оптимального управления приводятся в [3].

Рассмотрим одночастотную систему вида

(14) $\frac{d^2x}{dt^2}+\omega^2x=\varepsilon\mu\frac{dx}{dt}+\varepsilon mu,$

где $\varepsilon$, $\mu$, $m$ – заданные положительные константы.

Критерий оптимальности для одночастной системы примет вид

(15) $J=\varepsilon\int_0^{t_k}\left(aK^2+cu^2\right)dt,$

где $a,c>0$.

Фазовые траектории, соответствующие приближенно оптимальному (сплошная линия) и оптимальному (пунктирная линия) управлениям, показаны на рисунке 1 ($a=c=m=\mu=\omega=1,\varepsilon=0.3$). Значения критериев оптимальности при $t_k=50$ *с.* соответственно равны $J=3.046$ и $J=2.802$.

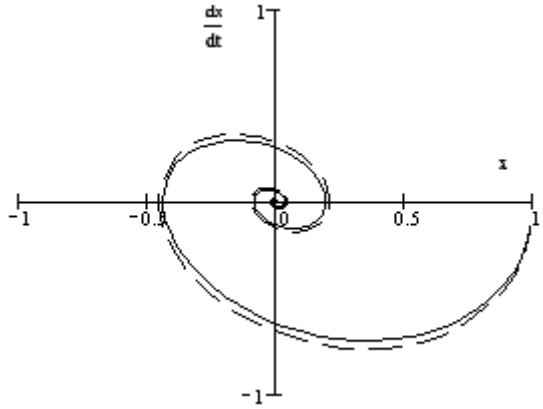



Рисунок 1 – Сравнение оптимального и приближенно оптимального управлений для системы (14)

**Заключение**

Несколько примеров применения данной методики для двухчастотных систем приводятся в [3]. Предлагаемый метод позволяет, по крайней мере, вдвое снизить размерность системы, при определении оптимальных управлений, так как при усреднении из рассмотрения исключаются фазы и решение уравнения Беллмана (8) существенно упрощается. Кроме того, снижение размерности системы позволяет для двухчастотных колебательных систем применить метод фазовой плоскости, что повышает наглядность метода, позволяет целенаправленно изменять весовые коэффициенты критерия оптимальности (3), добиваясь желаемого вида фазового портрета системы.

**Список литературы**

[1] Моисеев Н.Н. Асимптотические методы нелинейной механики. – М.: Наука, 1981.
[2] Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. – М.: Наука, 1974.
[3] Заболотнов Ю.М. Оптимальное управление непрерывными динамическими системами. – Самара: СГАУ, 2006.
[4] Черноусько Ф.Л., Акуленко Л.Д., Соколов Б.Н. Управление колебаниями. – М.: Наука, 1980.
[5] Салмин В.В., Ишков С.А., Старинова О.Л. Методы решения вариационных задач механики космического полета с малой тягой. – Самара: СНЦ РАН, 2006.
[6] Беллман Р. Динамическое программирование. – М.: ИЛ, 1960.
[7] Летов А.М. Динамика полета и управление. – М.: Наука, 1969.

**Biography**

*Zabolotnov Yuriy M.,* a Dr.Sci.Tech., the professor of chair of program systems of the Samara state aerospace university. Directions of scientific researches: mechanics of space flight, dynamics and mission control of space tether systems, dynamics of an input of space vehicles in atmosphere, control, asymptotic methods of mechanics.

# ЭФФЕКТИВНЫЙ ВЫБОР ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ БАЙЕСОВСКОЙ ОЦЕНКИ В ЗАДАЧЕ О СЛЕЖЕНИИ ПО АЗИМУТУ

**Д.Г. Арсеньев, Н.А. Берковский**

Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Россия
berkovsk@mail.ru
тел: +7 (812) 534-10-01, +7 (904) 514-09-10

***Ключевые слова:*** *метод Монте-Карло, слежение по азимуту, байесовская оценка, выборка по важности*

**Abstract**

The paper are devoted the modification of the important sampling devised by the authors as applied to bearing-only problem in 2D-space. The method is compared with the classic important sampling method and the bootstrap filter, that are usually used for this problem solving.

## Введение

Задача о слежении по азимуту возникает в случаях, когда измерение расстояний от наблюдателя до объекта по каким-либо причинам невозможно или нежелательно. Последнее время этой задаче посвящено значительное число работ [1,2,3] в которых она, как правило, решается при помощи частичных фильтров (particle filters), в частности, различными модификациями схемы bootstrap filter [1]. Отметим, что задача является нелинейной задачей оптимального оценивания. [4,5] поэтому широко распространенный фильтр Калмана малоэффективен для ее решения. В настоящей работе применяется непосредственное интегрирование и предлагается новый, более эффективный метод выбора плотности распределения точек при вычислении интегралов в сравнении со стандартной схемой выборки по важности (important sampling) [1] в байесовском оценивании. Примером реальной ситуации, в которой возникает эта задача, может быть слежение за подводной лодкой без дальномера. Тогда требуется определить курс лодки только по данным пеленга с учетом зашумленности измерений.

## 1 Постановка задачи

Пусть наблюдаемый объект с координатами $(x, y)$ движется по плоскости в соответствии с дискретной моделью [2] вида $\mathbf{x}_k = \Phi \mathbf{x}_{k-1} + \Gamma \mathbf{w}_k$, $k \in \mathrm{N}$, где $\mathbf{x}_k = (x, \dot{x}, y, \dot{y})_k^T$, $\mathbf{w}_k = (w_x, w_y)_k^T$, $\mathbf{\Phi} = \begin{pmatrix} 1 & t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, $\mathbf{\Gamma} = \begin{pmatrix} 0.5t & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0.5t \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, $t$ −шаг по времени. Системный шум $(w_x, w_y)$ гауссовский белый шум со средним значением $(0,0)$ и матрицей ковариации $qE$, где $q > 0$, $E$ −двумерная единичная матрица. Пусть наблюдатель находится в начале координат и совершает измерения $z_k$, которые определяются формулой

(1) $z_k = \mathbf{tan}^{-1}\left( y_k \middle/ x_k \right) + v_k$, $k \in \mathrm{N}$,

где шум $v-$ гауссовский шум с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением $r$. Кроме того, известно априорное распределение вектора состояния, здесь это нормальное распределение со средним $\left(x^0, y^0\right)$ и ковариационной матрицей $\sigma E$ для начального положения и равномерное распределение в квадрате $S=\left[a_x, b_x\right]\times\left[a_y, b_y\right]\in R^2$ для начальных компонент скорости. Требуется, располагая рядом измерений $\mathbf{z}_{1:k}=\left\{z_1, z_2, \ldots z_k\right\}$ в $k$-ый момент времени найти апостериорное среднее значение $E_{p(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{z}_{1:k})}\left[\mathbf{x}_{0:k}\right]$ случайного процесса $\mathbf{x}_{0:k}=(x, \dot{x}, y, \dot{y})_{0:k}^T$, где $\mathbf{x}_{0:k}=\left\{\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_1 \ldots, \mathbf{x}_k\right\}$, а $p\left(\mathbf{x}_{0:k} \mid \mathbf{z}_{1:k}\right)-$ апостериорная плотность.

В момент времени $k$ имеем байесовскую оценку для средней траектории в виде [1,5]

$$(2)\quad E_{p(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{z}_{1:k})}\left[\mathbf{x}_{0:k}\right]=\frac{\int \mathbf{x}_{0:k}\, p\left(\mathbf{z}_{1:k} \mid \mathbf{x}_{0:k}\right) p\left(\mathbf{x}_{0:k}\right) d\mathbf{x}_{0:k}}{\int p\left(\mathbf{z}_{1:k} \mid \mathbf{x}_{0:k}\right) p\left(\mathbf{x}_{0:k}\right) d\mathbf{x}_{0:k}}$$

где $p\left(\mathbf{x}_{0:k}\right)-$априорное распределение траекторий.

## 2 Выбор плотности распределения для скоростей

Вначале исследуется вспомогательная задача без системного шума с известной начальной точкой, т.е модель вида $\mathbf{x}_k=\Phi\mathbf{x}_{k-1}$, $\mathbf{x_0}=\left(x^0, \dot{x}, y^0, \dot{y}\right)$, где $\left(x^0, y^0\right)-$фиксированная начальная точка, а вектор $(\dot{x}, \dot{y})$ равномерно распределен в квадрате $S$. В этом случае интегралы в (2) будут двукратными, а знаменатель будет равен:

$$(3)\quad \int p\left(\mathbf{z}_{1:k} \mid \mathbf{x}_{0:k}\right) p\left(\mathbf{x}_{0:k}\right) d\mathbf{x}_{0:k}=\int_S |S|^{-1} \prod_{i=1}^{k}\left(2\pi r^2\right)^{-0.5} \exp\left[-\left(z_i-\tan^{-1}\left(\frac{y^0+\dot{y}it}{x^0+\dot{x}it}\right)\right)\cdot\left(2r^2\right)^{-0.5}\right] d\dot{x}d\dot{y}$$

График функции (3) напоминает нормальное распределение, но в общем случае она асимметрична и имеет ненулевой эксцесс. Предположим, что мы приближенно вычисляем числитель и знаменатель в (2) методом Монте-Карло и используем дельта-метод [6,7] для оценки частного. Действуя классическим методом important sampling, для генерации случайной сетки следовало бы использовать равномерное распределение в квадрате. Однако, численные эксперименты и теоретические соображения показывают, что для уменьшения количества итераций очень хорошим выбором является распределение, пропорциональное всей подынтегральной функции в (3). К сожалению, оно, по всей видимости, недоступно для эффективного моделирования, например, в методе отбора затруднительно найти более или менее точную мажоранту, и подавляющее большинство генерируемых точек не проходит отбор, соответственно, время счета сильно увеличивается. Классический же метод important sampling дает большое время из-за большой дисперсии числителя и знаменателя при вычислениях. Следовательно, целесообразно найти некоторый промежуточный вариант, при котором дисперсия существенно меньше, чем при равномерной генерации, но существует достаточно эффективный метод моделирования случайной сетки. В данной статье этим вариантом является двумерное нормальное распределение со средним значением и ковариационной матрицей, способ нахождения которых описан ниже.

Решаем систему неравенств относительно координат точки $(\dot{x}, \dot{y})\in S$:

$$(4)\quad \begin{cases}\left(2\pi r^2\right)^{-0.5}\exp\left[-\left(z_i-\tan^{-1}\left(\frac{y^0+\dot{y}it}{x^0+\dot{x}it}\right)\right)\cdot\left(2r^2\right)^{-0.5}\right]\geq c, \quad i=1,2\ldots k\\ (\dot{x}, \dot{y})\in S\end{cases}$$

Если предположить, что $\dot{x} \geq -x^0(it)^{-1}$, $i = 1,2\ldots k$, то из (4) можно прийти к системе неравенств

$$(5) \quad \begin{cases} a_i\dot{x} + \dfrac{a_i x^0}{it} - y^0 \leq \dot{y} \leq b_i\dot{x} + \dfrac{b_i x^0}{it} - y^0 \quad i = 1,2\ldots k \\ (\dot{x},\dot{y}) \in S \end{cases}$$

где $a_i = \mathbf{tan}\left(z_i - r\sqrt{2\ln\left(c\left(2\pi r^2\right)^{0.5}\right)^{-1}}\right)$ и $b_i = \mathbf{tan}\left(z_i + r\sqrt{2\ln\left(c\left(2\pi r^2\right)^{0.5}\right)^{-1}}\right)$. Легко найти координаты достаточного числа точек, удовлетворяющих системе неравенств (5) Располагая этим «облаком точек», мы можем найти выборочное среднее $\bar{\dot{\mathbf{x}}} = (\bar{\dot{x}}, \bar{\dot{y}})$, а также ковариационную матрицу $\Sigma_{\dot{\mathbf{x}}}$ для этого облака. Далее в качестве плотности для генерации случайной сетки при вычислении методом Монте-Карло интегралов из (2) возьмем распределение вида

$$(6) \quad p_{\dot{\mathbf{x}}}(\dot{\mathbf{x}}) = \mathbf{N}\left(\dot{\mathbf{x}}, \bar{\dot{\mathbf{x}}}, h\cdot\Sigma_{\dot{\mathbf{x}}}\right)\cdot\chi_S,$$

где $\dot{\mathbf{x}} = (\dot{x},\dot{y})$, $\chi_S$ −характеристическая функция квадрата, $h > 0$ −параметр, а $\mathbf{N}\left(\dot{\mathbf{x}}, \bar{\dot{\mathbf{x}}}, \Sigma_{\dot{\mathbf{x}}}\right)$ здесь и далее обозначает функцию плотности нормального распределения с аргументом $\dot{\mathbf{x}}$, средним $\bar{\dot{\mathbf{x}}}$ и ковариационной матрицей $\Sigma_{\dot{\mathbf{x}}}$. В отличие от распределения, пропорционального выражению $\prod_{i=1}^{k}\mathbf{exp}\left[-\left(z_i - \mathbf{tan}^{-1}\left(\dfrac{y^0 + \dot{y}it}{x^0 + \dot{x}it}\right)\right)\cdot\left(2r^2\right)^{-0.5}\right]$ из (3), это распределение моделируется эффективно. В то же время оно сгущает случайную сетку в районе точки максимума апостериорной плотности.

Решим задачу (2) при условии отсутствия системных шумов. В этом случае интегралы в (2) становятся четырехкратными, а знаменатель имеет вид:

$$\int p(\mathbf{z}_{1:k} \mid \mathbf{x}_{0:k})p(\mathbf{x}_{0:k})d\mathbf{x}_{0:k} =$$
$$= \int_S |S|^{-1}\prod_{i=1}^{k}\left(2\pi r^2\right)^{-0.5}\mathbf{exp}\left[-\left(z_i - \mathbf{tan}^{-1}\left(\frac{y + \dot{y}it}{x + \dot{x}it}\right)\right)\cdot\left(2r^2\right)^{-0.5}\right]\mathbf{N}(\vec{\mathbf{x}}, \vec{\mathbf{x}}^0, \Sigma_{\vec{\mathbf{x}}})d\dot{x}d\dot{y}d\vec{\mathbf{x}},$$

где $\vec{\mathbf{x}} = (x,y)$, $\vec{\mathbf{x}}^0 = \left(x^0, y^0\right)$ и $p_{\vec{\mathbf{x}}}(\vec{\mathbf{x}})$ −априорная плотность распределения вектора координат объекта. Принимая во внимание изложенные выше соображения, в качестве плотности для генерации случайных точек рационально взять плотность

$$(7) \quad p_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) = \mathbf{N}(\vec{\mathbf{x}}, \vec{\mathbf{x}}^0, \Sigma_{\vec{\mathbf{x}}})p_{\dot{\mathbf{x}}}(\dot{\mathbf{x}})$$

где $p_{\dot{\mathbf{x}}}(\dot{\mathbf{x}})$ определена равенством (6) Заметим, что в случае классической схемы important sampling [5] соответствующая плотность имеет вид

$$(8) \quad p_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) = \mathbf{N}(\vec{\mathbf{x}}, \vec{\mathbf{x}}^0, \Sigma_{\vec{\mathbf{x}}})|S|^{-1}$$

Далее, экстраполируем эти же соображения на общую задачу с системным шумом. Для этого отметим, что для того чтобы оценить траекторию объекта. достаточно оценить начальное положение, начальную скорость, а также процесс системного шума $\mathbf{w}_{1:k} = \{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2 \ldots \mathbf{w}_k\}$. Введем вектор $\mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0 = \left(x^0, \dot{x}^0, y^0, \dot{y}^0, \mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2 \ldots \mathbf{w}_k\right)$, подразумевая, что каждое вхождение $\mathbf{w}_i$ обозначает две компоненты соответствующего системного шума. Дополнительно, введем вектор $\mathbf{l}_i = (i - 0.5, i - 1.5, \ldots, 0.5)^T$ и обозначим, как $\mathbf{w}_x^i$ и $\mathbf{w}_y^i$ векторы, состоящие из первых и

вторых компонент векторов $\mathbf{w}_j$, где $j$ меняется от 1 до $i$, а $i$ − от 1 до $k$. Требуется вычислить байесовскую оценку вектора $\mathbf{x}_\mathbf{w}^0$ по формуле

$$E_{p\left(\mathbf{x}_\mathbf{w}^0 | \mathbf{z}_{1:k}\right)}\left[\mathbf{x}_\mathbf{w}^0\right] = \frac{\int \mathbf{x}_\mathbf{w}^0 p\left(\mathbf{z}_{1:k} \mid \mathbf{x}_\mathbf{w}^0\right) p\left(\mathbf{x}_\mathbf{w}^0\right) d\mathbf{x}_\mathbf{w}^0}{\int p\left(\mathbf{z}_{1:k} \mid \mathbf{x}_\mathbf{w}^0\right) p\left(\mathbf{x}_\mathbf{w}^0\right) d\mathbf{x}_\mathbf{w}^0},$$ причем

$$p\left(\mathbf{z}_{1:k} \mid \mathbf{x}_\mathbf{w}^0\right) = \prod_{i=1}^{k} \left(2\pi r^2\right)^{-0.5} \mathbf{exp}\left[ -\left( z_i - \mathbf{tan}^{-1}\left( \frac{y + \dot{y}it + t\mathbf{w}_y^i \mathbf{l}_i}{x + \dot{x}it + t\mathbf{w}_x^i \mathbf{l}_i} \right) \right) \cdot \left(2r^2\right)^{-0.5} \right].$$

Априорная плотность $p\left(\mathbf{x}_\mathbf{w}^0\right)$ является произведением равномерной плотности для начальных скоростей, нормальных плотностей для начальных координат и $2k$ шумов. Таким образом, требуется вычислить $2k+4$ интеграла размерности $2k+4$. Действуя по классической схеме important sampling, в качестве плотности для генерации случайной сетки следует взять функцию

$$(9) \quad p_{\mathbf{x}_\mathbf{w}^0}(\mathbf{x}_\mathbf{w}^0) = \mathbf{N}(\vec{\mathbf{x}}, \vec{\mathbf{x}}^0, \Sigma_{\vec{\mathbf{x}}}) |S|^{-1} \prod_{i=1}^{k} \mathbf{N}(\mathbf{w}_i, (0,0), qE).$$

Вычисляя же интеграл предлагаемым методом, для генерации случайной сетки берем плотность

$$(10) \quad p_{\mathbf{x}_\mathbf{w}^0}(\mathbf{x}_\mathbf{w}^0) = \mathbf{N}(\vec{\mathbf{x}}, \vec{\mathbf{x}}^0, \Sigma_{\vec{\mathbf{x}}}) |S|^{-1} \prod_{i=1}^{k} \mathbf{N}(\mathbf{w}_i, (0,0), qE).$$

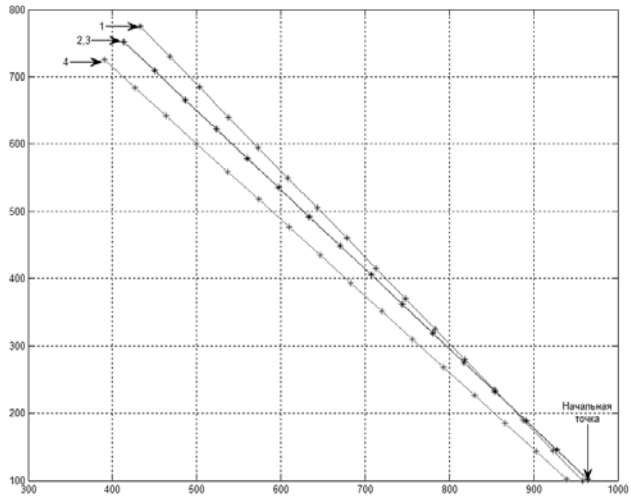
Таким образом, (9) и (10) различаются только способом генерации случайных сеток для начальных скоростей, однако, как показано ниже в разделе численных экспериментов, при малых системных шумах это отличие имеет решающее значение.

### 3 Результаты численного эксперимента

Первый численный пример − это задача о слежении по азимуту при условии нулевого системного шума. Параметры модели равны: $r = 1^\circ$, $\sigma = 10м.$, $t = 5с.$, $h = 1$. Количество измерений равно 15. Начальные скорости, измеряемые в $м./с.$, равномерно распределены в квадрате $S = [-10,10] \times [-10,10] \in R^2$. Байесовская оценка моделируемых траекторий вычислялась тремя методами: классическим методом important sampling для байесовского оценивания с плотностью случайной сетки, определяемой формулой (8), предлагаемым методом с плотностью, определенной по (7), и методом bootstrap filter [1], использующим 20000 частиц. Расчет проводился на доверительном уровне 95% с точностью $1м.$ для координат начального положения и $0.1м/с.$ для начальных скоростей. Результаты моделирования показаны на рисунке 1 и в таблице 1. Из рисунка 1 и таблицы 1 видим, что средние траектории, полученные предложенным методом и методом important sampling, совпадают, как и следовало ожидать. Кроме того, они ближе к истинной траектории, чем траектория, оцененная методом bootstrap filter. Из таблицы 1 видим, что предложенный метод значительнее эффективнее двух других, как в отношении времени работы, так и в отношении количества итераций при сравнении с important sampling.

Таблица 1 – Результаты по задаче с нулевым системным шумом

| Метод | Предлагаемый | Important sampling | Bootstrap filter |
|---|---|---|---|
| Число итераций | 10000 | 380000 | -------- |
| Время, сек. | 4 | 95 | 368 |




1−траектория объекта, 2−оценка классическим important sampling,
3−оценка предложенным методом, 4−оценка методом bootstrap filter.

Рисунок 1 – Задача без системного шума

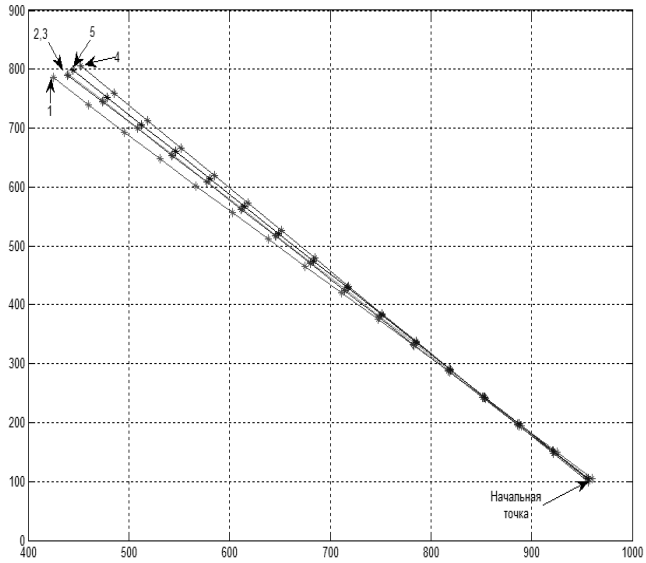
Второй задачей была задача о слежении по азимуту с малым системным шумом. Значения параметров те же, что и в предыдущей задаче, кроме $h = 8$, это оказался оптимальный вариант. Для системного шума $q = 0.1м/с$. Расчет проводился на доверительном уровне 95% с точностью $2м.$ для координат начального положения, $0.1м/с.$ для начальных скоростей и $0.01м/с.$ для системных шумов на каждом шаге. Для оценки точности частного интегралов использовался дельта-метод.[7] Подчеркнем, оценки точности относятся только к предложенному методу и методу important sampling, так как в методе bootstrap filter из-за фиксированного числа частиц отсутствует возможность счета до заранее определенного значения погрешности. Кроме того, осуществлен расчет предлагаемым методом, с пренебрежением системного шума, для выяснения, насколько байесовские оценки будут различаться. Результаты моделирования показаны на рисунке 2 и в таблице 2

Таблица 2 – Результаты по задаче с малым системным шумом

| Метод | Предлагаемый с нулевым системным шумом. | Предлагаемый | Important sampling | Bootstrap filter |
|---|---|---|---|---|
| Число итераций | 10000 | 620000 | 6770000 | -------- |
| Время, сек. | 6 | 758 | 6970 | 5601 |

Как видно из рисунка 2 и таблицы 2 траектории оцененные предлагаемым методом и методом important sampling, снова совпадают, менее точно повторяет истинную траекторию оценка, полученная предлагаемым методом без учета системного шума, и наиболее неточен метод bootstrap filter. Можно выдвинуть тезис о целесообразности пренебрежения малыми

системными шумами, так как выигрыш по времени в этом случае будет очень большой (см. таблицу 2), а проигрыш в точности невелик (рисунок 2).




1−траектория объекта, 2−оценка классическим important sampling, 3−оценка предложенным методом, 4−оценка методом bootstrap filter, 5−решение предложенным методом с нулевым системным шумом.

Рисунок 2 – Задача с малым системным шумом

**Заключение**

Предложен новый метод выбора плотности распределения для вычисления байесовской оценки для задачи о слежении по азимуту. В условии малости системных шумов предлагаемая схема расчета значительно выигрывает в сравнении с двумя признанными стандартными методами байесовского оценивания.

**Список литературы**


[1] Doucet.A., Freitas N., Gordon N Sequentiual Monte-Carlo methods in practice− N.Y. ,Shpringer-Verlag, 2001.−581p.

[2] N.J.Gordon, D.J.Salmond Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation //Proceedings-F, Vol 140, No.2, April 1993. С. 107−113.

[3] Kostas E. Bekris, Max Glick., L.E. Kavraki.. Evaluation of Algorithms for Bearing-Only SLAM 2006 (www.cse.unr.edu/~bekris/papers/bearing_only_slam.pdf)

[4] Stepanov O. A., Toropov A.B. Investigation of Linear Optimal Estimator .// Proceeding of 17-th World Congress, Seoul, July 6-11. С. 2750−2755

[5] Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания.− СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009

[6] Арсеньев, Д.Г., Иванов В.М., Берковский Н.А. Навигация по расстояниям до точечных ориентиров адаптивным методом существенной выборки. // Научно -технические ведомости СПбГТУ. – 2011.− № 1 (115).− С. 81−86

[7] Geweke J. Bayesian inference in econometric models using Monte-Carlo integration..//Econometrica, Vol. 57, No. 6 (November, 1989), pp.1317-1339

# АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ РЕГУЛЯТОРОВ ПО ВЫХОДУ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ

**Н.И. Сельвесюк**

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
125167, Москва, ул. Планетная, 3, Россия
selvesuk@mail.ru
тел: +7 (499) 759-00-69

***Ключевые слова:*** *стабилизирующий регулятор, управление по выходу, подавление возмущений, матричное неравенство, многосвязная система*

**Abstract**

In article described the methodic for output stabilizing regulator synthesis to MIMO linear control systems. It provided given demands of control parameters accuracy. The mentioned demands formulated through diagonal elements of special Lyapunov matrix of closed-loop system. For definition the feasible matrix used numerical algorithm which based on decision a system of linear matrix inequalities. The methodical numerical example is presented.

## Введение

В статье рассматривается решение важной в теории управления задачи синтеза стабилизирующего управления в классе линейных многосвязных динамических систем. Предлагаемый подход имеет ряд отличительных особенностей.

Одновременно со стабилизацией осуществляется подавление (субоптимальное или с заданным уровнем) действующих на систему внешних возмущений различных классов. При этом требования к точности управления формализуются через диагональные элементы матриц, представляющих собой решения соответствующих уравнений Ляпунова для замкнутой устойчивой системы и описывающих множество достижимости системы при действии возмущений [1]. Такой подход позволяет обеспечить заданное значение каждой из регулируемых величин в отдельности, что затруднительно осуществить с помощью оптимизационных методов синтеза.

Осуществляется строгое *аналитическое* описание всего множества стабилизирующих регуляторов по располагаемому выходу системы, эквивалентного для заданной постановки задачи. Аналитическое решение задачи базируется на результатах технологии вложения систем и канонизации матриц [2]. Наличие эквивалентного множества решений задачи синтеза позволяет удовлетворить дополнительные требования к качеству управления и облегчает физическую реализацию алгоритмов управления.

Условия разрешимости задачи синтеза сформулированы в виде системы линейных матричных неравенств и сводятся к нахождению взаимообратных матриц, удовлетворяющих данной системе. Это позволяет для проверки условий разрешимости использовать эффективные численные процедуры, реализованные в системе Matlab [3], а также итерационные процедуры поиска взаимообратных матриц, имеющих гарантированную сходимость [4].

## 1 Постановка задачи

Модель линейной стохастической многомерной системы в пространстве состояний описывается уравнениями

(1) $\dot{x}(t) = \mathbf{A}_x x(t) + \mathbf{B}_x u(t) + \mathbf{G}_x w(t)$, $x(t_0) = x_0$, $y(t) = \mathbf{C}_x x(t)$, $z(t) = \mathbf{D}_x x(t)$,

где $x \in \Re^{n_x}$ – вектор состояния объекта с начальным состоянием $x_0$; $u \in \Re^{n_u}$ – вектор управления; $w \in \Re^{n_w}$ – вектор возмущений; $y \in \Re^{n_y}$ – измеряемый выход; $z \in \Re^{n_z}$ – регулируемый выход; $\mathbf{A}_x$, $\mathbf{B}_x$, $\mathbf{G}_x$, $\mathbf{C}_x$, $\mathbf{D}_x$ – вещественные числовые матрицы соответствующих размеров. Пара матриц $(\mathbf{A}_x, \mathbf{G}_x)$ является полностью управляемой, пара $(\mathbf{A}_x, \mathbf{B}_x)$ – стабилизируемой, пара $(\mathbf{A}_x, \mathbf{C}_x)$ – полностью наблюдаемой.

В обратной связи используется динамический регулятор по измеряемому выходу с моделью в пространстве состояний

(2) $\dot{v}(t) = \mathbf{A}_v v(t) + \mathbf{B}_v y(t)$, $u(t) = \mathbf{C}_v v(t) + \mathbf{D}_v y(t)$, $v(t_0) = v_0$,

где $v \in \Re^{n_v}$ – вектор состояния регулятора с начальным состоянием $v_0$; $\mathbf{A}_v$, $\mathbf{B}_v$, $\mathbf{C}_v$, $\mathbf{D}_v$ – вещественные числовые матрицы.

Модель замкнутой системы (1) с регулятором (2) в обратной связи для объединенных векторов состояния $x_\Sigma(t) = [x(t) \quad v(t)]^{\mathrm{T}}$ и возмущений $w_\Sigma(t) = [w(t) \quad w(t)]^{\mathrm{T}}$ представляется в блочном виде

(3) $\dot{x}_\Sigma(t) = \mathbf{A}_c x_\Sigma(t) + \mathbf{G} w_\Sigma(t)$,

где $\mathbf{A}_c = \mathbf{A} + \mathbf{BKC}$ – матрица динамики замкнутой системы, числовые блочные матрицы имеют значения

(4) $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_x & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_x & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_{n_v} \end{bmatrix}$, $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_x & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_{n_v} \end{bmatrix}$, $\mathbf{G} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{G}_x & 0 \\ \hline \mathbf{E}_{n_v \times 2n_w} & \end{array}\right]$, $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_x & 0 \end{bmatrix}$,

(5) $\mathbf{K} = -\begin{bmatrix} \mathbf{D}_v & \mathbf{C}_v \\ \mathbf{B}_v & \mathbf{A}_v \end{bmatrix}$,

$\mathbf{E}$ – матрица размерности, формализующая множество стабилизирующих регуляторов, $\mathbf{rank}\,\mathbf{E} = n_v^E$ [5].

Представление замкнутой системы (1), (2) в форме блочной модели (3) – (5) позволяет унифицировать алгоритмы синтеза управления и в общем случае свести задачу синтеза динамических регуляторов низкого порядка к задаче синтеза стационарных регуляторов по измеряемому выходу.

Для оценки степени влияния возмущений $w(t)$ на регулируемые параметры $z(t)$ удобно использовать инвариантные эллипсоиды вида

(6) $\Im_z = \{z \in \Re^{n_z} : z^{\mathrm{T}} (\mathbf{DPD}^{\mathrm{T}})^{-1} z \le 1\}$, $\mathbf{P} > 0$,

которые аппроксимируют множества достижимости замкнутой системы (3) при действии возмущений $w(t)$. Матрица $\mathbf{P}$ называется матрицей эллипсоида $\Im_z$. Способ определения матрицы $\mathbf{P}$ зависит от класса возмущения. В статье рассматривается три класса возмущений, для которых возможно определение матрицы $\mathbf{P}$ путем решения алгебраических уравнений Ляпунова.

Если вектор возмущений $w_1(t)$ представляет собой стационарный гауссовский случайный процесс с нулевым средним и матрицей интенсивности $\mathbf{Q}$, то множество достижимости для системы (3) в точности совпадает с инвариантным эллипсоидом, а матрица $\mathbf{P}$ представляет собой дисперсионную матрицу системы и определяется из уравнения Ляпунова вида

(7) $\mathbf{A}_c \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_c^{\mathrm{T}} + \mathbf{GQG}^{\mathrm{T}} = 0$, $\mathbf{P} > 0$.

При действии на систему (3) ограниченных в $L_2$-норме возмущений $\|w_2\|_2^2 = \int_0^\infty w_2^{\mathrm{T}}(t) w_2(t) dt \le 1$, множество достижимости также совпадает с эллипсоидом достижимости. Матрица **P** представляет собой грамиан управляемости системы и определяется из уравнения Ляпунова, симметричного уравнению (7)

(8) $\mathbf{P}\mathbf{A}_{\mathrm{c}} + \mathbf{A}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\mathbf{P} + \mathbf{G}\mathbf{Q}\mathbf{G}^{\mathrm{T}} = 0, \ \mathbf{P} > 0.$

При действии на систему (3) произвольных ограниченных в $L_\infty$-норме возмущений $\|w_3(t)\| \le 1, \ \forall t \ge 0$, эллипсоид (6) является некоторым «консервативным» приближением множества достижимости. Матрица эллипсоида $\mathbf{P} = \mathbf{P}(\alpha)$ при $x(0) = 0$ также удовлетворяет уравнению Ляпунова

(9) $\mathbf{A}_{\mathrm{c}}\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}} + \alpha\mathbf{P} + \alpha^{-1}\mathbf{G}\mathbf{G}^{\mathrm{T}} = 0, \ \mathbf{P} > 0,$

при значении $0 < \alpha < -2\,\mathbf{max\ Re}\,\lambda_i(\mathbf{A})$, где $\lambda_i(\mathbf{A})$ – собственные значения матрицы **A**.

Для отдельного элемента регулируемого выхода $z_i = d_i x$, $i = \overline{1, n_z}$, где $d_i$ – *i*-я строка матрицы **D**, инвариантный эллипсоид (6) вырождается в отрезок

(10) $|z_i| \le \left(d_i \mathbf{P} d_i^{\mathrm{T}}\right)^{1/2}$.

Выражение (10) позволяет сформулировать понятные инженерные требования к точности управления:

при действии стационарных гауссовских случайных возмущений $w_1(t)$ – ограничения на величину СКО $\sigma_z$;

при действии ограниченных в $L_2$-норме возмущений $w_2(t)$ – ограничения на величину установившейся ошибки $e_z$;

при действии ограниченных в $L_\infty$-норме возмущений $w_3(t)$ – ограничения на максимальные значения (с определенной степенью консерватизма) регулируемых параметров $\mathbf{max}_{t \ge 0} \mathbf{max}_{\|w\| \le 1} |z_i(t)|$.

*Задача синтеза* заключается в аналитическом описании множества структурных матриц передачи **K** динамического регулятора (5), который стабилизирует замкнутую систему (3) и обеспечивает заданную точность управления по элементам вектора $z \in \Re^{n_z}$. Другими словами, замкнутая система (3) должна удовлетворять одному из уравнений Ляпунова (7)-(9) в зависимости от класса действующего возмущения с матрицей **P**, соответствующие диагональные элементы которой определяются заданными ограничениями (10).

В статье методика синтеза рассмотрена на примере возмущения $w_1(t)$.

## 2 Синтез стабилизирующих регуляторов заданной точности

Аналитическое решение задачи синтеза при использовании регуляторов по выходу приведено в работе [6] и сформулировано ниже двумя леммами.

*Лемма* 1. Заданная матрица инвариантного эллипсоида $\mathbf{P} > 0$ замкнутой системы (3) является достижимой с помощью динамического регулятора порядка $n_v \le n_v^E$ по измеряемому выходу в обратной связи, если и только если выполняются условия

(11) $\overline{\mathbf{B}}^{\mathrm{L}}(\mathbf{A}\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}^{\mathrm{T}} + \mathbf{G}\mathbf{Q}\mathbf{G}^{\mathrm{T}})(\overline{\mathbf{B}}^{\mathrm{L}})^{\mathrm{T}} = 0;$

(12) $(\overline{\mathbf{C}}^{\mathrm{R}})^{\mathrm{T}}(\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}+\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}^{-1}+\mathbf{P}^{-1}\mathbf{G}\mathbf{Q}\mathbf{G}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}^{-1})\overline{\mathbf{C}}^{\mathbf{R}}=0$.

*Лемма* 2. Все множество структурных матриц **K** стабилизирующих динамических регуляторов по измеряемому выходу, обеспечивающих заданное значение достижимой матрицы инвариантного эллипсоида $\mathbf{P}>0$, определяется формулой

(13) $\{\mathbf{K}\}_{\eta,\varphi,\rho}=\widetilde{\mathbf{B}}\mathbf{P}(\mathbf{H}+\eta)\widetilde{\mathbf{C}}+\overline{\mathbf{B}}^{\mathrm{R}}\varphi+\rho\overline{\mathbf{C}}^{\mathrm{L}}$,

где $\mathbf{H}=\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}+\frac{1}{2}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{G}\mathbf{Q}\mathbf{G}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}^{-1}$; $\eta$ – любая из множества кососимметрических матриц

$$\{\eta\}_{\kappa}=\widetilde{\mathbf{R}}\mathbf{N}-\mathbf{N}^{\mathrm{T}}(\widetilde{\mathbf{R}})^{\mathrm{T}}+\widetilde{\mathbf{R}}\mathbf{R}\,\mathbf{N}^{\mathrm{T}}(\widetilde{\mathbf{R}})^{\mathrm{T}}+\overline{\mathbf{R}}^{\mathrm{R}}\kappa(\overline{\mathbf{R}}^{\mathrm{R}})^{\mathrm{T}},\ \mathbf{R}=\begin{bmatrix}\overline{\mathbf{B}}^{\mathrm{L}}\mathbf{P}\\(\overline{\mathbf{C}}^{\mathrm{R}})^{\mathrm{T}}\end{bmatrix},\ \mathbf{N}=\begin{bmatrix}-\overline{\mathbf{B}}^{\mathrm{L}}\mathbf{P}\mathbf{H}\\(\overline{\mathbf{C}}^{\mathrm{R}})^{\mathrm{T}}\mathbf{H}^{\mathrm{T}}\end{bmatrix};$$

$\varphi$, $\rho$ – произвольные матрицы подходящих размеров; $\kappa=-\kappa^{\mathrm{T}}$ – произвольная кососимметрическая матрица подходящего размера.

Здесь и далее обозначения $\overline{\mathbf{M}}^{\mathrm{L}}$, $\overline{\mathbf{M}}^{\mathrm{R}}$, $\widetilde{\mathbf{M}}=\widetilde{\mathbf{M}}^{\mathrm{R}}\widetilde{\mathbf{M}}^{\mathrm{L}}$ означают левый и правый делители нуля и сводный канонизатор матрицы $\mathbf{M}_{n\times m}$ соответственно и удовлетворяют тождеству [2]

$$\begin{bmatrix}\widetilde{\mathbf{M}}^{\mathrm{L}}\\ \overline{\mathbf{M}}^{\mathrm{L}}\end{bmatrix}\mathbf{M}\begin{bmatrix}\widetilde{\mathbf{M}}^{\mathrm{R}} & \overline{\mathbf{M}}^{\mathrm{R}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{I}_r & 0_{r\times(n-r)}\\ 0_{(m-r)\times r} & 0_{(m-r)\times(n-r)}\end{bmatrix},$$

где $r=\mathbf{rank}(\mathbf{M})$, $n=n_x+n_v$, $m=n_u+n_v$, $\mathbf{I}_r$ – единичная матрица.

### 3 Решение задачи достижимости

Условие достижимости (11) является линейной функцией матрицы **P**, поэтому его проверка не составляет труда, например, с использованием численных методов выпуклой оптимизации.

В тождестве (12) произведем замену $\mathbf{S}=\mathbf{P}^{-1}$, что представим в виде уравнения

(14) $\mathbf{P}\mathbf{S}=\mathbf{I}$.

С учетом замены из уравнения (12) получим нелинейное уравнение

(15) $(\overline{\mathbf{C}}^{\mathrm{R}})^{\mathrm{T}}(\mathbf{S}\mathbf{A}+\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{S}+\mathbf{S}\mathbf{G}\mathbf{Q}\mathbf{G}^{\mathrm{T}}\mathbf{S})\overline{\mathbf{C}}^{\mathrm{R}}=0$

с квадратичной составляющей относительно искомой матрицы $\mathbf{S}=\mathbf{S}^{\mathrm{T}}>0$.

Таким образом, задача достижимости представляет собой решение системы матричных уравнений (11), (14)-(15). Каждое из них в отдельности имеет свои численные методы решения, что затрудняет решение системы в целом. Кроме того, решение уравнения (15) требует применения нелинейных методов оптимизации либо, учитывая квадратичный характер функции, методов полуопределенного программирования. Известными недостатками этих методов являются отсутствие гарантированной сходимости и зависимость результата от выбора начальной точки оптимизации.

Для построения единого численного алгоритма решения задачи достижимости предлагается использовать аппарат линейных матричных неравенств (LMI). При этом решение матричного уравнения вида $\mathrm{F}(\mathbf{X})=0$, $\mathbf{X}=\mathbf{X}^{\mathrm{T}}$ заменяется решением линейных матричных неравенств вида $\mathrm{F}(\mathbf{X})<0$ при заданных из требований точности ограничениях на диагональные элементы искомой симметричной невырожденной матрицы.

Для составления матричных неравенств и преобразования квадратичной формы в линейную используется лемма Шура [7], согласно которой симметричное неравенство в блочной форме с квадратными диагональными блоками

$$\begin{bmatrix}\mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{12}\\ \mathbf{M}_{12}^{\mathrm{T}} & \mathbf{M}_{22}\end{bmatrix}>0$$

выполняется тогда и только тогда, когда $\mathbf{M}_{22} > 0$, $\mathbf{M}_{11} - \mathbf{M}_{12}\mathbf{M}_{22}^{-1}\mathbf{M}_{12}^{\mathrm{T}} > 0$.

Тогда уравнению (11) с учетом блочной структуры матриц (4) соответствуют линейные матричные неравенства

$$(16)\quad \mathrm{F}_1(\mathbf{P}) := \left[\overline{\mathbf{B}}_x^{\mathrm{L}} \quad 0\right] \begin{bmatrix} \mathbf{P} & 0 \\ 0 & \mathbf{AP} + \mathbf{PA}^{\mathrm{T}} + \mathbf{GQG}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\overline{\mathbf{B}}_x^{\mathrm{L}})^{\mathrm{T}} \\ 0 \end{bmatrix} > 0,\ \mathbf{P} > \varepsilon\mathbf{I},$$

где $\varepsilon > 0$ – малый скаляр, который используется в численном алгоритме для получения нетривиального решения задачи достижимости.

Для учета ограничений на диагональные элементы матрицы $\mathbf{P}$ (10), формализующих требования к точности управления, вводится дополнительная система матричных неравенств вида

$$(17)\quad [\mathbf{DPD}]_{ii} \le \gamma_i,\ i = \overline{1, n_z}.$$

Тогда множество достижимости, соответствующее условию (11), имеет вид

$$(18)\quad \Phi(\mathbf{P}) := \{\mathbf{P} : \mathrm{F}_1(\mathbf{P}) > 0,\ \mathbf{P} = \mathbf{P}^{\mathrm{T}} > \varepsilon\mathbf{I},\ [\mathbf{DPD}]_{ii} \le \gamma_i,\ i = \overline{1, n_z}\}.$$

Нелинейному уравнению (15) соответствуют линейные матричные неравенства

$$(19)\quad \mathrm{F}_2(\mathbf{S}) := \left[(\overline{\mathbf{C}}_x^{\mathrm{R}})^{\mathrm{T}} \quad 0\right] \begin{bmatrix} \mathbf{SA} + \mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{S} & \mathbf{SG} \\ \mathbf{G}^{\mathrm{T}}\mathbf{S} & -\mathbf{Q}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\mathbf{C}}_x^{\mathrm{R}} \\ 0 \end{bmatrix} < 0;\ \ \mathbf{S} > \varepsilon\mathbf{I}.$$

Соответствующее множество достижимости описывается следующим образом:

$$(20)\quad \Gamma(\mathbf{S}) := \{\mathbf{S} : \mathrm{F}_2(\mathbf{S}) < 0,\ \mathbf{S} = \mathbf{S}^{\mathrm{T}} > \varepsilon\mathbf{I}\}.$$

Для численной реализации тождества (14) его можно заменить неравенством $\mathbf{P} \ge \mathbf{S}^{-1} > 0$, или в блочной форме –

$$(21)\quad \mathrm{F}_3(\mathbf{P}, \mathbf{S}) := \begin{bmatrix} \mathbf{P} & \mathbf{I} \\ \mathbf{I} & \mathbf{S} \end{bmatrix} \ge 0.$$

Соответствующее множество имеет вид

$$(22)\quad \mathrm{E}(\mathbf{P}, \mathbf{S}) := \{(\mathbf{P}, \mathbf{S}) : \mathrm{F}_3(\mathbf{P}, \mathbf{S}) \ge 0\}.$$

Теперь общую задачу достижимости, сформулированную леммой 1, можно записать следующим образом. Необходимо найти две взаимообратные матрицы $\mathbf{P}$ и $\mathbf{S}$ размера $(n_x + n_v) \times (n_x + n_v)$, которые принадлежат выпуклому множеству

$$(23)\quad \Omega(\mathbf{P}, \mathbf{S}) := \{(\mathbf{P}, \mathbf{S}) : \mathbf{P} \in \Phi(\mathbf{P}),\ \mathbf{S} \in \Gamma(\mathbf{S}),\ (\mathbf{P}, \mathbf{S}) \in \mathrm{E}(\mathbf{P}, \mathbf{S})\}.$$

Решение каждой задачи достижимости (18), (20) и (22) в отдельности может быть эффективно осуществлено численными методами, например, с использованием пакета cvx [3] системы Matlab. Однако для строгого выполнения условия (14) необходимо определить граничные точки множества $\Omega(\mathbf{P}, \mathbf{S})$. Решение данной задачи возможно с использованием минимаксного подхода. Соответствующая задача минимизации имеет вид

$$(24)\quad \lambda^* = \mathbf{min}\{\lambda_{max}(\mathbf{PS}) : (\mathbf{P}, \mathbf{S}) \in \Omega\},$$

где $\lambda(\mathbf{PS})$ – собственные числа произведения матриц $\mathbf{PS}$.

Очевидно, что задача достижимости, сформулированная леммой 1, будет разрешима тогда и только тогда, когда $\lambda^* = 1$.

Трудность решения задачи (24) обусловлена тем, что она является невыпуклой по отношению к целевой функции $\lambda_{max}(\mathbf{PS})$. Данная задача известна в теории управления как Dual

LMI Problem. В настоящее время для ее решения предложен ряд эффективных численных алгоритмов [4], [7]. Все вычисления в данных алгоритмах без труда осуществляются с использованием стандартных функций системы Matlab.

## 4 Пример

Рассмотрим объект (1), представляющий собой последовательное соединение трех интеграторов, со следующими значениями матричных коэффициентов:

$$(25)\quad \mathbf{A}_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},\ \mathbf{B}_x = \mathbf{G}_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},\ \mathbf{C}_x = \begin{bmatrix} 1 & 9/5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},\ \mathbf{D}_x = \mathbf{I}_3 .$$

Матрица интенсивности возмущений $\mathbf{Q} = \mathbf{I}_2$.

Рассчитаем динамический регулятор для объекта с параметрами (25). Размерная матрица регулятора максимально возможного по построению порядка $n_v = 3$ в этом случае может принимать значение

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

откуда следует, что максимально возможный порядок стабилизирующего регулятора заданной точности равен двум ( $\mathbf{rank}\,\mathbf{E} = 2$ ).

Пусть необходимо синтезировать динамический регулятор первого порядка. Тогда блочные матрицы коэффициентов объединенной системы (3) принимают значения

$$\mathbf{A} = \left[\begin{array}{ccc:c} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hdashline 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}\right],\ \mathbf{B} = \left[\begin{array}{cc:c} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \hdashline 0 & 0 & 1 \end{array}\right],\ \mathbf{G} = \left[\begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hdashline 1 & 0 & -1 & 0 \end{array}\right],\ \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 9/5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Проверка условия достижимости (11) в общем виде приводит к ограничению $2p_{12} = 0$ . С учетом этого зададим значения всех диагональных элементов ковариационной матрицы объединенной системы $\gamma = \begin{bmatrix} 3 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$.

Использование пакета cvx для решения задачи достижимости (23) на втором шаге алгоритма дает начальные значения матриц (при $\varepsilon = 10^{-4}$, округленные до второго знака)

$$\widehat{\mathbf{P}} = \left[\begin{array}{ccc:c} 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hdashline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right],\ \widehat{\mathbf{S}} = \left[\begin{array}{ccc:c} 2 & 2{,}05 & 0 & 0{,}23 \\ 2{,}05 & 6 & 0 & -0{,}43 \\ 0 & 0 & 22 & 0 \\ \hdashline 0{,}23 & -0{,}43 & 0 & 4 \end{array}\right].$$

В результате работы алгоритма были получены следующие взаимообратные матрицы:

$$\mathbf{P} = \left[\begin{array}{ccc:c} 3 & 0 & 1 & 0{,}5 \\ 0 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0{,}5 \\ \hdashline 0{,}5 & 0 & 0{,}5 & 1 \end{array}\right],\ \mathbf{S} = \left[\begin{array}{ccc:c} 2 & 3 & -6 & 2 \\ 3 & 6 & -11 & 4 \\ -6 & -11 & 22 & -8 \\ \hdashline 2 & 4 & -8 & 4 \end{array}\right],$$

которые удовлетворяют заданным ограничениям.

С использованием леммы 2 получено все множество матриц передачи соответствующих регуляторов по выходу

$$(26)\quad \{\mathbf{K}\}_{\kappa} = \left[\begin{array}{cc:c} 13{,}5+\kappa & -47{,}1-3{,}6\kappa & 19{,}2+1{,}2\kappa \\ 2{,}5 & -8{,}3+0{,}2\kappa & 3{,}6-0{,}4\kappa \\ \hdashline 3{,}5-1{,}5\kappa & -13{,}5+5{,}5\kappa & 6-2\kappa \end{array}\right],$$

где $\kappa$ – произвольное действительное число.

Множеству регуляторов (26) соответствует следующее множество матриц динамики замкнутой системы $\mathbf{A}_c = \mathbf{A} - \mathbf{BKC}$:

$$\{\mathbf{A}_c\}_{\kappa} = \left[\begin{array}{ccc:c} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -13{,}5-\kappa & -24{,}3-1{,}8\kappa & 48{,}1+3{,}6\kappa & -19{,}2-1{,}2\kappa \\ -2{,}5 & -4{,}5 & 8{,}3-0{,}2\kappa & -3{,}6+0{,}4\kappa \\ \hdashline -3{,}5+1{,}5\kappa & -6{,}3+2{,}7\kappa & 13{,}5-5{,}5\kappa & -6+2\kappa \end{array}\right],$$

которое является устойчивым при любых значениях параметра $\kappa$ и которому соответствует заданное значение матрицы $\mathbf{P} > 0$.

### Заключение

Предложенный в работе единый подход позволяет получить аналитическое описание всего множества стабилизирующих регуляторов по выходу в обратной связи, одновременно обеспечивающих заданную точность управления при действии возмущений различных классов. Наличие варьируемых параметров множества дает возможность удовлетворить дополнительные требования синтеза или выбрать структуру регулятора. Условия разрешимости задачи синтеза представлены в виде линейных матричных неравенств. Это позволяет использовать хорошо проработанные численные методы на базе системы MATLAB для расчета реализуемой матрицы инвариантного эллипсоида.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ № МД-1248.2011.8.

### Список литературы

[1] Сельвесюк Н.И. Синтез точного управления линейными системами с внешними возмущениями с использованием уравнений Ляпунова // Фундаментальные и прикладные вопросы механики и процессов управления. Всероссийская науч. конф., посвящ. 75-летиюсо дня рожд. Академика В.П. Мясникова (11-17 сентября 2011 г., Владивосток): сб. докл. [Электронный ресурс]. – Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2011 г. – С. 466 – 470.

[2] Буков В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. – Калуга: Изд-во научной литературы Н.Ф. Бочкаревой, 2006.

[3] Grant M., Boyd S. CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 1.21. http://cvxr.com/cvx, April 2011.

[4] Iwasaki I., Skelton R.E. The XY-Centering Algorithm for the Dual LMI Problem: A New Approach to Fixed Order Control Design // International Journal of Control, 1995, Vol. 62, No. 6, pp. 1257 – 1272.

[5] Сельвесюк Н.И. Синтез множества стабилизирующих динамических регуляторов заданной точности с использованием матрицы размерности // Материалы 4-й международной конференции по проблемам управления (МКПУ-IV). Москва, январь 2009 г. – М.: ИПУ РАН, 2009.

[6] Сельвесюк Н.И. Синтез ковариационных регуляторов на основе технологии вложения систем // АиТ, 2005, № 6, с. 126 – 137.

[7] Баландин Д.В., Коган М.М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. М.: Физматлит, 2007.

# АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЦИФРОВЫХ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

**Б.Г. Ильясов, Г.А. Саитова, И.И. Сабитов**

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Республика Башкортостан, Уфа, ул. К. Маркса, 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:*** *анализ устойчивости, цифровые системы, многосвязные системы, частотные методы*

**Abstract**
Frequency criterion of stability of digital multivariable control system was proposed. It is based on system description of dynamic properties on the level of subsystems and connection features.

## 1 Актуальность

В различных областях техники широко распространены многосвязные системы автоматического управления (МСАУ). К тому же, в связи с массовым переходом техники управления на цифровую базу появляется возможность реализовать сложные алгоритмы управления, основанные на достижениях современной теории управления. Поэтому исследование устойчивости многосвязных цифровых систем управления является актуальной.

## 2 Постановка задачи

Рассмотрим непрерывную многосвязную систему (рисунок 1), которая описывается уравнением:

$$(1)\quad \begin{array}{l} Y(s) = U(s)W_{об}(s) \\ U(s) = R(s)[X(s) - Y(s)] \end{array},$$

где $U(s)$, $X(s)$, $Y(s)$ – соответственно векторы управляющих, задающих и управляемых координат, $R(s) = diag\{R_1(s), R_2(s), ..., R_n(s)\}$ – регулятор, $W_{об}(s)$ – ($n$ x $n$)-матричная передаточная функция объекта управления.

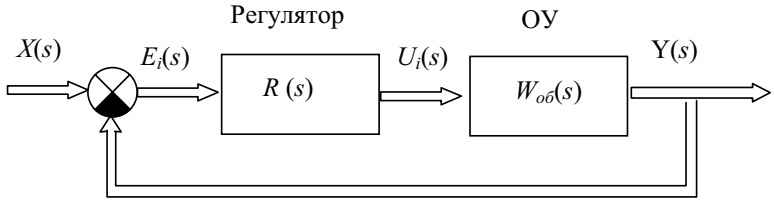



Рисунок 1 – Структурная схема МСАУ

Считаем, что подсистемы в МСАУ однотипные, т.е. все индивидуальные характеристики (ИХ) подсистем равны друг другу.

$$(2)\quad \Phi_1(s) = \Phi_2(s) = ... = \Phi_n(s), \quad \Phi_i(s) = \frac{y_i(s)}{x_i(s)} = \frac{R_i(s)W_{ii}(s)}{1 + R_i(s)W_{ii}(s)}.$$

Характеристическое уравнение системы с голономными связями, т.е. $H_m(s) = h_m$, имеет вид:

(3) $D(h, s) = 1 + h_2\Phi^2(s) + h_3\Phi^3(s) + \ldots + h_n\Phi^n(s) = 0$,

Характеристика элемента многомерной связи (ХС) $H_{l_1 \ldots l_k}(s)$, $l_1,\ldots,l_k \in [1,n]$ отражает реально существующие взаимоотношения между подсистемами. Характеристика многомерной связи между $k$ подсистемами $l_1, l_2, \ldots, l_k$ в полной МСАУ, состоящей из $n$ подсистем, имеет вид:

$$H_m(s) = \sum_{\underbrace{i,j,\ldots,k}_{m}=1}^{\binom{n}{m}} H_{\underbrace{ij\ldots k}_{m}}(s), \quad H_{l_1\ldots l_k}(s) = \frac{\det\left[W_{ij}(s)\gamma_{ij}\right]_{k\times k}}{\det\left[W_{ij}(s)\delta_{ij}\right]_{k\times k}}, \quad k = \overline{2,n}, \quad \gamma_{ij} = \begin{cases} 1, i \neq j; \\ 0, i = j; \end{cases}, \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, i = j, \\ 0, i \neq j, \end{cases} \quad i, j = \overline{1,n}.$$

Вводится понятие уравнения связи

(4) $D(x) = 1 + h_2x^2 + h_3x^3 + \ldots + h_nx^n = 0$

относительно переменной $x$, которое получается из (3) подстановкой $\Phi(s) = x$.

Критерий устойчивости, предложенный в работе [1] позволяет графически исследовать устойчивость непрерывной многосвязной систем с однотипными подсистемами.

Для устойчивости линейных однотипной МСАУ необходимо и достаточно, чтобы годограф амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) $\Phi(j\omega)$, $\omega \in (0,+\infty)$, построенный на плоскости корней уравнения связи (4), не охватывал ни один из его корней.

Требуется проанализировать возможность использования частотного критерия устойчивости МСАУ [2] для анализа устойчивости цифровых и гибридных, содержащих непрерывный объект управления и дискретный по времени регулятор, МСАУ.

### 3 Оценки устойчивости цифровой МСАУ

Пусть непрерывная система описывается уравнением (1), тогда соответствующая ей цифровая система (рис. 2) с периодом квантования $T_0$ имеет вид

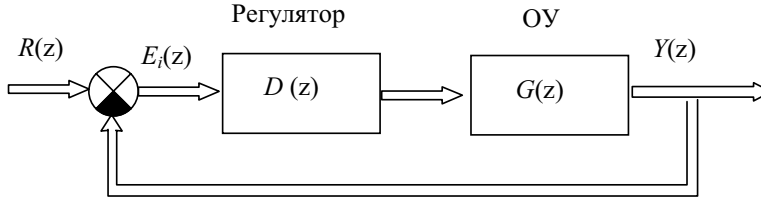



Рисунок 2 – Структурная схема цифровой МСАУ

(5) $C_i(z) = \dfrac{Y(z)}{R(z)} = \dfrac{G(z)D(z)}{1 + G(z)D(z)}$.

Характеристическое уравнение системы с голономными связями, т.е. $H_m(s) = h_m$, имеет вид

(6) $A(h, z) = 1 + h_2C^2(z) + h_3C^3(z) + \ldots + h_nC^n(z) = 0$.

Уравнения связи относительно переменной $x$ для цифровой системы запишется

(7) $A(x) = 1 + h_2x^2 + h_3x^3 + \ldots + h_nx^n = 0$

и получается из (6) подстановкой $C(z) = x$.

Оценим справедливость предложенного в [2] критерия для оценки устойчивости цифровых многосвязных систем управления.

Опишем процедуру его применения.

1) Построим амплитудно - фазовую характеристику (АФХ) для сепаратных подсистем $C(z)$ представленных в форме z-описания. АФХ можно получить отображением z-плоскости на $s$-плоскость с помощью выражения $z = e^{sT_0}$ [2].

При построении частотных характеристик непрерывных систем в выражении для передаточной функции производится подстановка $s = j\omega$. Для цифровых систем управления соответствующий анализ в частотной области связан с заменой

$$z = e^{j\omega T_0} = e^{j\overline{\omega}} = \mathbf{cos}\ (\overline{\omega}\, k) + j\ \mathbf{sin}\ (\overline{\omega}\, k), \quad \overline{\omega} = \omega T_0, \quad (-\pi < \overline{\omega} < \pi).$$

2) Находим корни характеристического уравнения связи $x_i$ (7) и располагаем их на той же комплексной плоскости;

3) Для устойчивости цифровых МСАУ необходимо и достаточно, чтобы годограф амплитудно-фазовой характеристики подсистем $C(e^{j\overline{\omega}})$, $\overline{\omega} \in (0,+\pi)$, построенный на плоскости корней уравнения связи (7), не охватывал ни один из его корней $x_i$.

**Пример.** Рассмотрим в качестве примера трехсвязную систему управления, которая описывается уравнением (1), где

$$R(s)W_{об}(s) = \frac{1}{s(s+1)} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0.02 & 1 & 1 \\ -0.04 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ передаточная функция подсистем } \Phi_i(s) = \frac{1}{s^2 + s + 1}.$$

Переходные процессы непрерывной системы представлены на рисунке 3.

Передаточная функция подсистем той же оцифрованной системы с периодом квантования $T_0$=0.025 с. имеет вид

$$(8) \quad C_i(z) = \frac{0.3679\ z + 0.2642}{z^2 - z + 0.6321}.$$

Соответствующие цифровой системе переходные процессы представлены на рисунке 4, как видим, система устойчива.

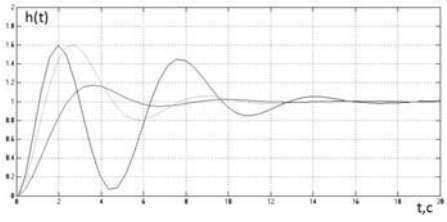



Рисунок 3 – Переходные процессы в непрерывной системе

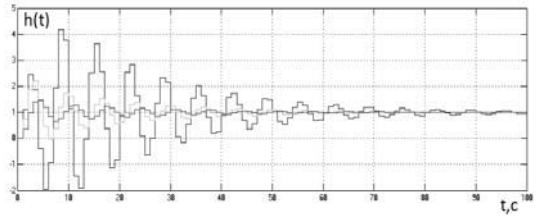



Рисунок 4 – Переходные процессы в цифровой системе с периодом квантования $T_0$= 0.025 с.

Передаточная функция подсистем непрерывной системы (1) оцифрованной с периодом квантования $T_0$=1 с.

$$(9) \quad C_i(z) = \frac{1.135\ z + 0.594}{z^2 + 0.7293}.$$

Переходные процессы соответствуют неустойчивой системе (рис.5).

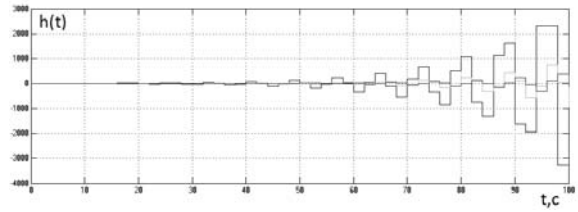



Рисунок 5 – Переходные процессы в цифровой системе с периодом квантования $T_0$= 1 с.

1) Построим амплитудно - фазовую характеристику для сепаратных подсистем $C(z)$ с помощью выражения $z = e^{j\omega T_0} = e^{j\overline{\omega}}$, $(-\pi < \overline{\omega} < \pi)$, на $s$-плоскости.
2) Найдем корни $x_i$ характеристического уравнения связи
$A(x) = 1 + 0.04x^2 - 0.08x^3 = 0$.

Корни равны $x_{1,2} = -1.0 \pm j2.0$, $x_3$=2.5, располагаем их на той же комплексной плоскости.

3) Все годографы представлены на рисунке 6. Видим, что на устойчивость систем влияет период дискретизации $T_0$. Годографы непрерывной системе и цифровой с $T_0$=0.025 соответствуют устойчивым системам, что подтверждают и переходные процессы.

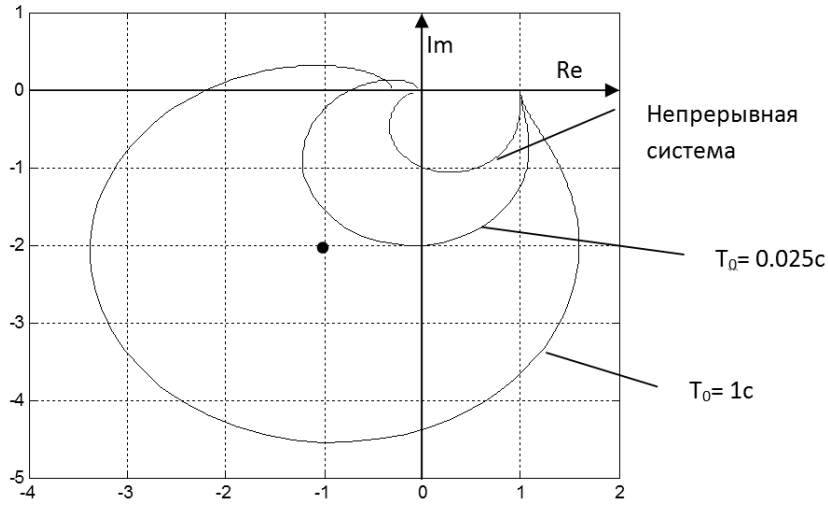
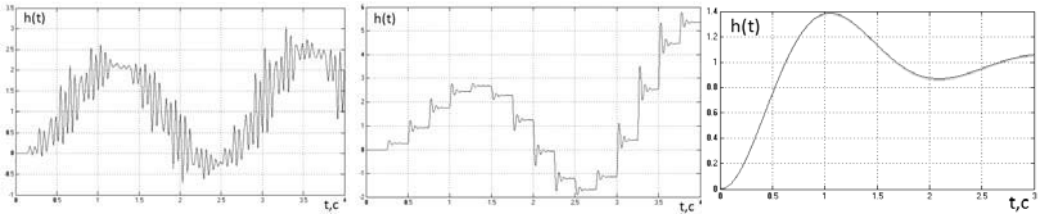



Рисунок 6 – Годографы непрерывной системы и
цифровых систем с периодом квантования 1 с. и 0.025 с.

## 4 Оценка устойчивости гибридной МСАУ

Рассмотрим устойчивость гибридных систем. В процессе исследования выявлено, что для устойчивости гибридных многосвязных систем необходимо и достаточно, чтобы годографы устойчивых замкнутых подсистем не охватывал корни уравнения связи. Для устойчивости подсистем необходимо, чтобы каждый цифровой элемент в подсистеме был устойчивым, и частота дискретизации каждого цифрового элемента была не больше граничного значения частоты дискретизации всей системы. Данное условие для цифровой системы, состоящей из двух цифровых элементов, отображено на рисунке 7.




а) б) в)

Рисунок 7 – а) оба элемента неустойчивы; б) один из элементов устойчивый; в) оба элемента устойчивы

Годографы сепаратной подсистемы в зависимости от $T_0$ отображены на рисунке 8.

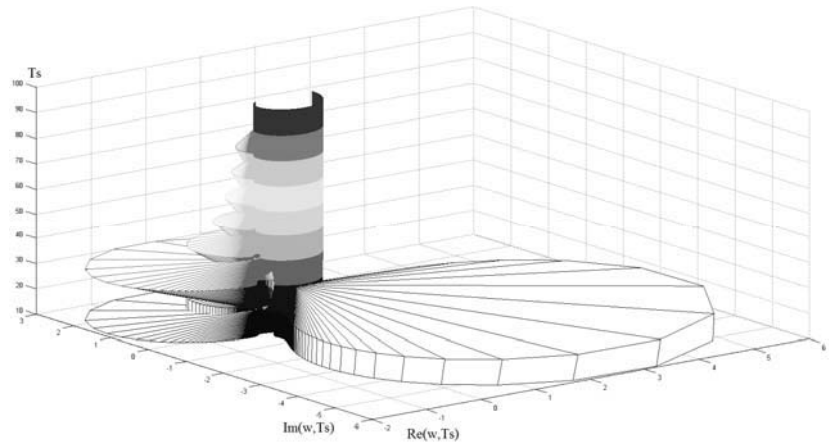



Рисунок 8 – Годограф АФЧХ для сепаратной подсистемы в зависимости от T0

Процесс оценки устойчивой гибридной МСАУ можно описать следующим алгоритмом:

1) Построим АФХ сепаратных подсистем $C(z,s)$ на $s$-плоскости с помощью выражения $z = e^{sT_0}$ . При построении частотных характеристик непрерывной части в выражении для передаточной функции производится подстановка $s = j\omega$, $(0 \le \omega \le \infty)$. Для цифровой части соответствующий анализ в частотной области связан с заменой $z = e^{j\omega T_0}$ .
2) Находим корни характеристического уравнения связи $x_i$ (7) и располагаем их на той же комплексной плоскости;
3) Анализируем устойчивость системы, используя критерий. Для устойчивости гибридной МСАУ необходимо и достаточно, чтобы годограф амплитудно-фазовой характеристики подсистем $C(e^{j\omega T_0}, s)$, $\omega \in (0, \pi/T_0)$, построенный на плоскости корней уравнения связи (7), не охватывал ни один из его корней $x_i$.

**Пример**. Рассмотрим в качестве примера трехсвязную систему управления, которая описывается уравнением (1), где

$$R(s)W_{об}(s) = \frac{0.00966s + 0.024}{s} \quad \frac{10601.77}{-0.005s^2 + s1.012445s + 2.489} \begin{bmatrix} 3 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 3 \end{bmatrix}.$$

1) Найдем корни $x_i$ характеристического уравнения связи

$A(x) = 1 - 0.3333x^2 + 0.0741x^3 = 0$ .

Корни равны $x_{1,2}$=3, $x_3$= -1.5, располагаем их на комплексной плоскости.

2) Рассмотрим три возможные ситуации: система непрерывная, гибридная и цифровая.

- система непрерывная

$$(10)\quad R(j\omega)W_{об}(j\omega) = \frac{0.00966\,j\omega + 0.024}{j\omega} \quad \frac{10601.77}{-0.005\omega^2 + j1.012445\omega + 2.489} \begin{bmatrix} 3 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 3 \end{bmatrix}.$$

- система гибридная

$$(11)\quad R(e^{j\omega T_0})W_{об}(j\omega) = \frac{0.00966\,e^{j0.0036\,\omega} - 0.009574}{e^{j0.0036\,\omega} - 1} \quad \frac{10601.77}{-0.005\omega^2 + j1.012445\,\omega + 2.489} \begin{bmatrix} 3 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 3 \end{bmatrix},$$

где период квантования цифрового регулятора 0.0036 с.

- система устойчивая цифровая

$$(12)\quad R(e^{j\omega T_0})W_{об}(e^{j\omega T_0}) = \frac{0.00966e^{j0.004\omega} - 0.009564}{e^{j0.004\omega} - 1} \quad \frac{13.17e^{j0.004\omega} + 10.07}{e^{j0.008\omega} - 1.439e^{j0.004\omega} + 0.4449} \begin{bmatrix} 3 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 3 \end{bmatrix},$$

где период квантования цифрового регулятора и объекта управления 0.004 с.

- система неустойчивая цифровая

Годографы устойчивых подсистем охватывают корни уравнения связи.

$$(13)\quad R(e^{j\omega T_0})W_{об}(e^{j\omega T_0}) = \frac{0.00966e^{j0.005\omega} - 0.00954}{e^{j0.005\omega} - 1} \quad \frac{19.41e^{j0.005\omega} + 13.89}{e^{j0.01\omega} - 1.356e^{j0.005\omega} + 0.3633} \begin{bmatrix} 3 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 3 \end{bmatrix},$$

где частота дискретизации цифрового регулятора и объекта управления 0.005 с.

На рисунке 9 отображены переходные процессы в трехсвязной системе, а на рисунке 10 годографы сепаратных подсистем.

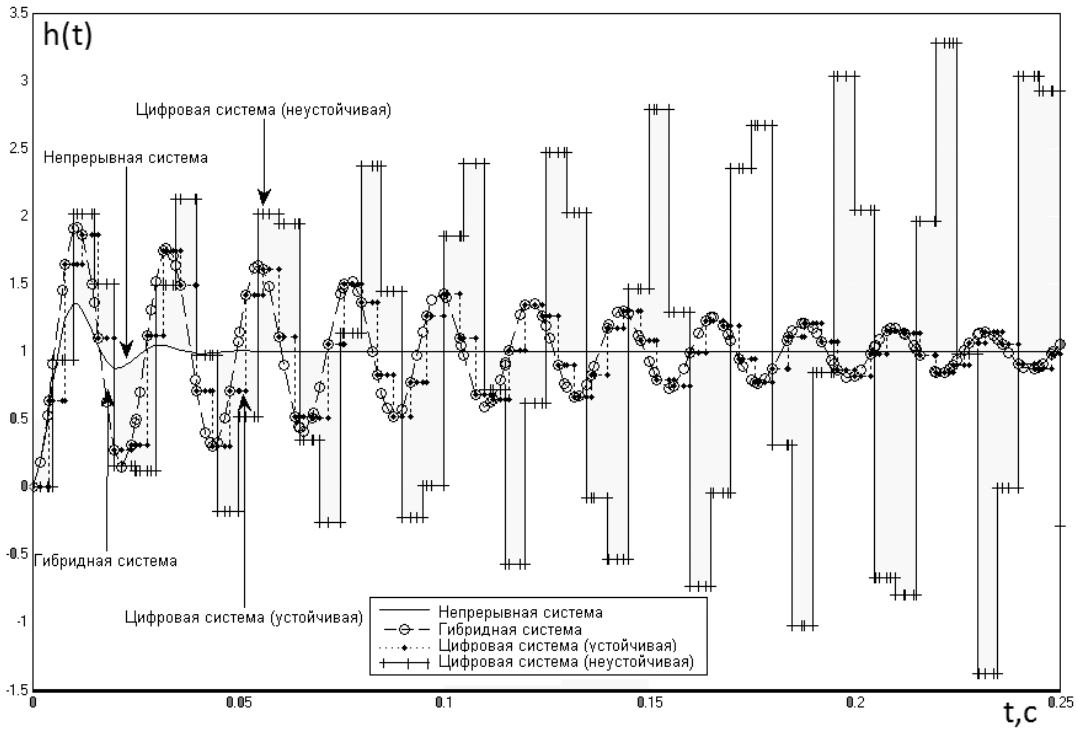



Рисунок 9 – Переходные процессы трехсвязных систем: непрерывной, гибридной, цифровой – устойчивой и неустойчивой

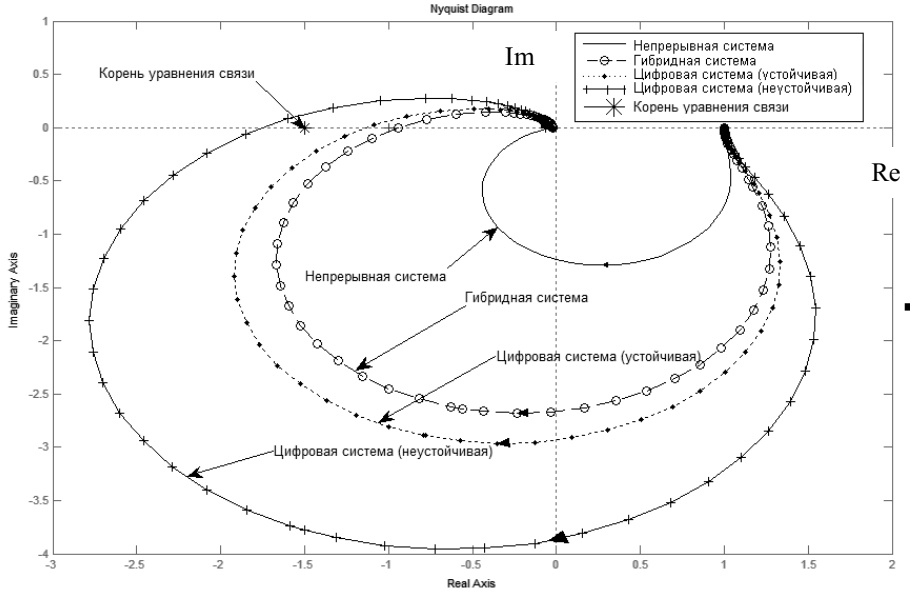



Рисунок 10 – Годографы сепаратных подсистем: непрерывной, гибридной, цифровой – устойчивой и неустойчивой

**Заключение**

При определении устойчивости цифровых и гибридных МСАУ можно использовать критерий устойчивости, предложенный в работе [1]. Устойчивость цифровой и гибридной МСАУ зависит от периода дискретизации и от того, охватываются ли корни уравнения связи годографом сепаратной подсистемы.

**Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 11-08-97063-р_поволжье_а, № 11-08-00871-а, № 12-08-01014-а)

**Список литературы**

[1] 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.

[2] Бесекерский В.А., Попов Е.П., Теория систем автоматического регулирования: учебное пособие для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп.- СПб. : Профессия, 2007 г.

# СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ ДЛЯ МНОГОСВЯЗНОГО ОБЪЕКТА С ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ ПО СОСТОЯНИЮ

**А.З. Асанов, В.С. Каримов**

Казанский (Приволжский) федеральный университет
423812, Набережные Челны, пр-т Сююмбике, 10А, Россия
kvs-chelny@mail.ru
тел: +7 (8552) 38-34-05, факс: +7 (8552) 58-88-94

***Ключевые слова:*** *адаптивная система автоматического управления, многосвязный объект, запаздывания по состоянию, эталонная модель, технология вложения систем*

**Abstract**

It was proposed an analytical solution to the problem of design of adaptive automatic control system with a reference model for multivariable controlled plant with time delays on the state vector on basis of system embedding technology. Design was carried out for three cases: the free, forced, free and forced components of mismatch of a closed-loop dynamical system. Were calculated the algebraically expressions which to determine solution set of problem design and existence conditions this solution.

## Введение

Для многих реальных объектов управления характерно наличие разнообразных факторов, затрудняющих реализацию закона управления при синтезе систем. К таким факторам, прежде всего, можно отнести неполноту информации о параметрах объекта управления и наличие в нем разного рода нелинейностей. Одним из способов управления объектами с неполной информацией является применение адаптивных систем с эталонной моделью [1, 2]. Недостающая исходная информация в этих системах определяется в процессе их работы на основании текущих данных, поступающих от объекта. Затем на основании этих данных формируется сигнал в контуре обратной связи.

Другим фактором, негативно влияющим на синтез систем управления, являются такого рода нелинейности как запаздывания. Явление запаздывания отрицательно сказывается на поведении систем автоматического управления. Запаздывания, сосредоточенные в многосвязных объектах управления, могут привести к возникновению автоколебательности, ухудшению качества процессов управления, потери устойчивости системы [3]. Следовательно, при управлении объектами с запаздываниями необходимо учитывать их негативное влияние.

В данной работе предлагается аналитическое решение задачи синтеза адаптивной системы автоматического управления (САУ) с эталонной моделью для многосвязного объекта с запаздываниями по состоянию на основе технологии вложения систем [4, 5]. С помощью технологии вложения систем будут определяться матричные передаточные функции (МПФ) регуляторов и предкомпенсаторов, а также условия их определяющие, при которых поведение системы управления будет описываться желаемыми МПФ. Синтез будет проводится для трех случаев: по свободной, вынужденной, свободной и вынужденной составляющим рассогласования замкнутой динамической системы.

## 1 Постановка задачи синтеза

Пусть поведение динамического объекта с сосредоточенными запаздываниями по состоянию может быть представлено в виде дифференциально-разностных уравнений:

(1) $$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= \sum_{i=0}^{l} A_i x(t-\tau_i) + Bu(t),\\ y(t) &= Cx(t),\end{aligned}$$

где $\tau_0 = 0,\quad 0 < \tau_1, \tau_2, ..., \tau_l$ – постоянные времена запаздываний, $i = 0,1,...,l$, $u(t) \in R^s$ – вектор входных переменных, $y(t) \in R^m$ – вектор выходных переменных, $x(t) \in R^n$ – фазовый вектор объекта управления. В нашем случае матрицы $A_i$ имеют размер $n \times n$, $B$ – $n \times s$, $C$ – $m \times n$. Слагаемые $A_i x(t-\tau_i)$ описывают запаздывания сигналов на время $\tau_i$ во внутренних каналах объекта управления (ОУ).

Начальные условия зададим с учетом запаздывания сигналов в объекте управления – формально будем рассматривать отрицательные моменты времени $t<0$, предполагая, что в объекте происходили динамические процессы до начального момента времени:
$x(t) = \varphi_x(t)$, $t_0 - \tau \le t \le t_0$,
где $\tau$ – наибольшее время запаздывания.

Целью управления будет являться эталонная модель поведения синтезируемой системы управления, которая описывается в пространстве состояний следующими уравнениями:

(2) $$\begin{aligned}\dot{x}_M(t) &= A_M x_M(t) + B_M g(t),\\ y_M(t) &= C_M x_M(t),\end{aligned}$$

где $y_M(t) \in R^m$ – вектор выходных переменных модели объекта, $x_M(t) \in R^n$ – вектор состояния модели объекта, $A_M$, $B_M$, $C_M$ – матрицы пространства состояний эталонной модели, $g(t) \in R^m$ – вектор управления на входе системы.

Пусть закон управления в общем случае описывается матричным уравнением:

(3) $$u = G(p)g - z = G(p)g - K(p)(x - x_M),$$

где $K(p)$ – МПФ регулятора размера $n \times s$, $G(p)$ – МПФ предкомпенсатора размера $s \times s$, $z \in R^s$.

Требования к синтезируемой системе управления задаются на основе сигнала рассогласования $\Delta y = y - y_M$ матричными передаточными функциями $E^g_{\Delta y}(p)$ и $E^{\varphi}_{\Delta y}(p)$:

$$E^g_{\Delta y}(p) = E^g_y(p) - E^g_{y_M}(p),$$
$$E^{\varphi}_{\Delta y}(p) = E^{\varphi}_y(p) - E^{\varphi}_{y_M}(p),$$

где $E^g_y(p)$ – МПФ от управляющих воздействий к выходу объекта, $E^g_{y_M}(p)$ – МПФ от управляющих воздействий к выходу модели объекта, $E^{\varphi}_y(p)$ – МПФ от начальных условий к выходу объекта, $E^{\varphi}_{y_M}(p)$ – МПФ от начальных условий к выходу модели объекта, $E^g_{\Delta y}(p)$ – МПФ от управляющих воздействий к рассогласованию модели и объекта, $E^{\varphi}_{\Delta y}(p)$ – МПФ от начальных условий к рассогласованию модели и объекта.

*Задача управления*: для ОУ (1), цели управления (2) и закона управления (3) необходимо найти МПФ регулятора $K(p)$ и предкомпенсатора $G(p)$ или условия их определяющие, при которых поведение САУ (рисунок 1) будет описываться желаемой МПФ $E^{\varphi}_{\Delta y}(p)$ и/или $E^g_{\Delta y}(p)$.

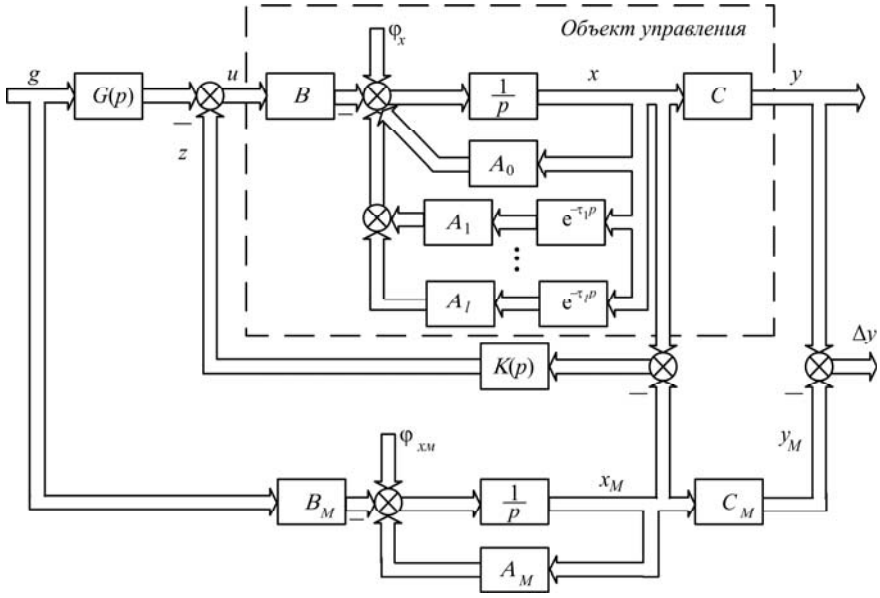



Рисунок 1 – Адаптивная система управления с запаздываниями по состоянию

## 2 Синтез адаптивной САУ с запаздываниями по состоянию

При синтезе системы управления будем использовать технологию вложения систем [4, 5]. С учетом уравнений (1), (2), (3) и выполнения процедур метода вложения систем проблемная матрица (проматрица) рассматриваемой задачи будет иметь вид:

$$\Omega(p)=\begin{bmatrix} (pI_n-\sum_{i=0}^{l}A_i e^{-\tau_i p}) & 0 & 0 & 0 & -B & 0 \\ 0 & (pI_n-A_M) & 0 & 0 & 0 & -B_M \\ -C & 0 & I_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C_m & 0 & I_m & 0 & 0 \\ K(p) & -K(p) & 0 & 0 & I_s & -G(p) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_s \end{bmatrix}.$$

Репроматрица системы в обобщенном виде представляется следующим образом

$$\Omega^{-1}(p)=\begin{bmatrix} E_x^{\phi}(p) & * & * & * & * & E_x^{g}(p) \\ E_{x_M}^{\phi}(p) & * & * & * & * & E_{x_M}^{g}(p) \\ E_y^{\phi}(p) & * & * & * & * & E_y^{g}(p) \\ E_{y_M}^{\phi}(p) & * & * & * & * & E_{y_M}^{g}(p) \\ E_u^{\phi}(p) & * & * & * & * & E_u^{g}(p) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_s \end{bmatrix}.$$

Здесь $E_j^i(p)$ – МПФ от параметра $i$ к параметру $j$. Блоки, не представляющие особого интереса, отмечены звездочками.

Матрицы вложения $\alpha$ и $\beta$, используемые при вложении систем, имеют вид:

$\alpha = \begin{bmatrix} I_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$, $\beta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & I_m & -I_m & 0 & 0 \end{bmatrix}$ при $\omega = E^{\varphi}_{\Delta y}(p)$;

$\alpha = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_s \end{bmatrix}^T$, $\beta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & I_m & -I_m & 0 & 0 \end{bmatrix}$ при $\omega = E^{g}_{\Delta y}(p)$;

$\alpha = \begin{bmatrix} I_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_s \end{bmatrix}^T$, $\beta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & I_m & -I_m & 0 & 0 \end{bmatrix}$ при $\omega = \begin{bmatrix} E^{g}_{\Delta y}(p) & E^{\varphi}_{\Delta y}(p) \end{bmatrix}$,

где ω – образ синтезируемой системы – желаемая передаточная функция системы.

После выполнения процедур технологии вложения – последовательной факторизации матриц $\Omega = \Sigma\Xi$, $\alpha = \Sigma\delta$, $\beta = \pi\Xi$, $\omega = \pi\delta$ ($\pi$, $\delta$, $\Xi$, $\Sigma$ – вспомогательные матрицы), можно получить уравнения, которым должна удовлетворять МПФ регулятора $K(p)$ и предкомпенсатора $G(p)$ при синтезе по вынужденной составляющей $E^{g}_{\Delta y}(p)$, свободной составляющей $E^{\varphi}_{\Delta y}(p)$, свободной $E^{\varphi}_{\Delta y}(p)$ и вынужденной составляющей $E^{g}_{\Delta y}(p)$ рассогласования $\Delta y$ замкнутой динамической системы.

Для решения матричных уравнений, которые получаются в результате применения процедур вложения, возможно применение аппарата канонизации матриц [6].

Применение технологии вложения при синтезе по свободной составляющей рассогласования $\Delta y$ дает следующее уравнение относительно искомой передаточной матрицы $K(p)$:

$$(4)\quad E^{\varphi}_{\Delta y}(p)BK(p) = C - E^{\varphi}_{\Delta y}(p)(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p}).$$

Используя результаты [3, 4] множество регуляторов в этом случае можно описать формулами:

$$(5)\quad \{K\}_{\mu} = (E^{\varphi}_{\Delta y}(p)B)^{\sim}(C - E^{\varphi}_{\Delta y}(p)(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p})) + \overline{E^{\varphi}_{\Delta y}(p)B}^{R}\mu(p),$$

где $\mu(p)$ – произвольная дробно-полиномиальная матрица соответствующих размеров. Условия разрешимости уравнения (4), а значит и существования множества решений (5) имеют вид:

$$(6)\quad \overline{E^{\varphi}_{\Delta y}(p)B}^{L}(C - E^{\varphi}_{\Delta y}(p)(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p})) = 0$$

или

$$(7)\quad (C - E^{\varphi}_{\Delta y}(p)(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p})) = E^{\varphi}_{\Delta y}(p)B(E^{\varphi}_{\Delta y}(p)B)^{\sim R}\eta(p),$$

где $\eta(p)$ – произвольная дробно-полиномиальная матрица соответствующих размеров.

При синтезе по вынужденной составляющей рассогласования $\Delta y$ получаются следующие уравнения относительно искомых передаточных матриц $K(p)$ и $G(p)$:

$$(8)\quad \begin{aligned} &\pi_x BK = C - \pi_x(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p}), \\ &\pi_x BG = E^{g}_{\Delta y} - (C - C_M - \pi_x(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p}))(pI_n - A_M)^{-1}B_M, \end{aligned}$$

где $\pi_x$ – вспомогательная дробно-полиномиальная матрица. Множество регуляторов $K(p)$ и предкомпенсаторов $G(p)$ в этом случае можно описать формулами:

$$
(9)\quad
\begin{aligned}
&\{K(p)\}_{\mu} = (\pi_x B)^{\sim}(C - \pi_x(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p})) + \overline{\pi_x B}^{R}\mu(p),\\
&\{G(p)\}_{\eta} = (\pi_x B)^{\sim}(E_{\Delta y}^{g} - (C - C_M - \pi_x(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p}))(pI_n - A_M)^{-1}B_M) + \overline{\pi_x B}^{R}\eta(p),
\end{aligned}
$$

Условия разрешимости уравнений (8), а значит и существования множества решений (9) имеют вид:

$$
(10)\quad
\begin{aligned}
&\overline{\pi_x B}^{L}(C - \pi_x(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p})) = 0,\\
&\overline{\pi_x B}^{L}(E_{\Delta y}^{g} - (C - C_M - \pi_x(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p}))(pI_n - A_M)^{-1}B_M)
\end{aligned}
$$

или

$$
(11)\quad
\begin{aligned}
&C - \pi_x(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p}) = \pi_x B(\pi_x B)^{\sim R}\xi(p),\\
&E_{\Delta y}^{g} - (C - C_M - \pi_x(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p}))(pI_n - A_M)^{-1}B_M = \pi_x B(\pi_x B)^{\sim R}\chi(p),
\end{aligned}
$$

где $\xi(p)$, $\chi(p)$ – произвольные дробно-полиномиальные матрицы соответствующих размеров.

При синтезе по свободной и вынужденной составляющей рассогласования $\Delta y$ получаются следующие уравнения относительно искомых передаточных матриц $K(p)$ и $G(p)$:

$$
(12)\quad
\begin{aligned}
&E_{\Delta y}^{\varphi}(p)BK = C - E_{\Delta y}^{\varphi}(p)(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p}),\\
&E_{\Delta y}^{\varphi}(p)BG = E_{\Delta y}^{g} - (C - C_M - E_{\Delta y}^{\varphi}(p)(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p}))(pI_n - A_M)^{-1}B_M.
\end{aligned}
$$

Множество регуляторов $K(p)$ и предкомпенсаторов $G(p)$ в этом случае можно описать формулами:

$$
(13)\quad
\begin{aligned}
&\{K(p)\}_{\mu} = (E_{\Delta y}^{\varphi}(p)B)^{\sim}(C - E_{\Delta y}^{\varphi}(p)(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p})) + \overline{E_{\Delta y}^{\varphi}(p)B}^{R}\mu(p),\\
&\{G(p)\}_{\eta} = (E_{\Delta y}^{\varphi}(p)B)^{\sim}(E_{\Delta y}^{g} - (C - C_M - E_{\Delta y}^{\varphi}(p)(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p}))(pI_n - A_M)^{-1}B_M) +\\
&+\overline{E_{\Delta y}^{\varphi}(p)B}^{R}\eta(p),
\end{aligned}
$$

где $\mu(p)$ и $\eta(p)$ – произвольные дробно-полиномиальные матрицы соответствующих размеров.

Условия разрешимости уравнений (12), а значит и существования множества решений (13) имеют вид:

$$
(14)\quad
\begin{aligned}
&\overline{E_{\Delta y}^{\varphi}(p)B}^{L}(C - E_{\Delta y}^{\varphi}(p)(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p})) = 0,\\
&\overline{E_{\Delta y}^{\varphi}(p)B}^{L}(E_{\Delta y}^{g} - (C - C_M - E_{\Delta y}^{\varphi}(p)(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p}))(pI_n - A_M)^{-1}B_M)
\end{aligned}
$$

или

$$
(15)\quad
\begin{aligned}
&C - E_{\Delta y}^{\varphi}(p)(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p}) = E_{\Delta y}^{\varphi}(p)B(E_{\Delta y}^{\varphi}(p)B)^{\sim R}\xi(p),\\
&E_{\Delta y}^{g} - (C - C_M - E_{\Delta y}^{\varphi}(p)(pI_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_i p}))(pI_n - A_M)^{-1}B_M = E_{\Delta y}^{\varphi}(p)B(E_{\Delta y}^{\varphi}(p)B)^{\sim R}\chi(p),
\end{aligned}
$$

где $\xi(p)$, $\chi(p)$ – произвольные дробно-полиномиальные матрицы соответствующих размеров.

Таким образом, было получено соотношение (5) с условиями существования этого решения (6) или (7) при синтезе по свободной составляющей рассогласования $\Delta y$, соотношения (9) с условиями существования этого решения (10) или (11) при синтезе по вынужденной составляющей рассогласования $\Delta y$, соотношения (13) с условиями существования этого решения (14) или (15) при синтезе по свободной и вынужденной составляющим рассогласования $\Delta y$ замкнутой динамической системы, которые позволяют найти множество регуляторов, удовлетворяющих закону управления (3).

## Заключение

Был проведен синтез адаптивной системы автоматического управления с эталонной моделью для многосвязного объекта с запаздываниями по состоянию. Найдено множество решений задачи синтеза и условия разрешимости задачи с помощью применения технологии вложения систем.


## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-08-00311).


## Список литературы


[1] Асанов А.З. Аналитическое конструирование систем управления нестационарными технологическими объектами. –Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2003. –296 с.

[2] Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах. –М.: Наука, 1990. – 292 с.

[3] Филимонов А.Б. Спектральная декомпозиция систем с запаздываниями. Компенсация запаздываний. М.: Издательство Физико-математической литературы, 2002. – 288 с.

[4] Асанов А.З. Технология вложения систем и ее приложения: учебное пособие / А.З. Асанов; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т – Уфа: УГАТУ, 2007 –227 с.

[5] Буков В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем.– Калуга: Издательство научной литературы Н.Ф. Бочкаревой, 2006. – 720 с.

[6] Буков В. Н., Рябченко В. Н., Косьянчук В. В., Зябин Е. Ю. Решение линейных матричных уравнений методом канонизации // Вестник Киевского университета. Серия: Физико-математические науки.– Вып.1.–2002.– С.19–28.

# АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ КВАЗИАДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСВЯЗНЫМ ОБЪЕКТОМ С ЗАДАНИЕМ СПЕКТРА СИСТЕМНЫХ НУЛЕЙ

**А.З. Асанов, Д.Н. Демьянов**

Казанский (Приволжский) федеральный университет
423812, Набережные Челны, пр-т Сююмбике, 10А, Россия
demyanovdn@mail.ru
тел: +7 (8552) 38-34-05, факс: +7 (8552) 58-88-94

***Ключевые слова:*** *многосвязный динамический объект, квазиадаптивное управление, эталонная модель, системный нуль, робастность, технология вложения*

**Abstract**

In this work the procedure of analytical synthesis of the quasiadaptive control system with explicit reference model using system embedding technology is considered. It is shown that the absence of the right system zeros of the control object is the necessary condition of robustness of the derivable solution. The algorithm for control system synthesis with the stage of correction of the system zeros spectrum is offered.

## Введение

Неуклонное повышение требований к качеству процессов управления технологическими объектами является одной из основных особенностей развития промышленности на современном этапе. Проектирование качественных систем управления является, как правило, достаточно трудной задачей: приходится учитывать как нелинейность, нестационарность и многосвязность самого объекта управления, так и изменяющиеся условия внешней среды. При этом многие известные классические методы перестают давать приемлемые результаты, либо же в принципе неприменимы для решения подобных задач. Таким образом, чрезвычайную актуальность имеет разработка методов синтеза систем управления многосвязными динамическими объектами, позволяющих учитывать изменяющиеся условия их функционирования.

В настоящее время известны различные подходы к построению систем управления, способных эффективно функционировать при изменении внешних условий [1]. Одним из наиболее распространённых на практике подходов является использование адаптивных и квазиадаптивных (эквивалентных при определённых условиях адаптивным) систем управления. При этом в условиях машиностроительного производства наиболее эффективным и экономически обоснованным является применение квазиадаптивных и беспоисковых адаптивных систем с эталонными моделями и сигнальной и/или параметрической настройкой [2]. Такие системы сочетают относительную простоту реализации с высоким быстродействием, хотя и обеспечивают желаемое поведение только в относительно узком диапазоне значений параметров.

Основные этапы процедуры синтеза квазиадаптивной системы управления с эталонной моделью в основном совпадают с соответствующими этапами синтеза линейной системы управления и заключаются в нахождении передаточных матриц предкомпенсатора и регулятора. Отличия заключаются в том, что при построении квазадаптивной системы для целей управления используется рассогласование объекта и эталонной модели, а при создании линейной системы – переменные, характеризующие сам объект. При этом сама процедура расчёта матриц предкомпенсатора и регулятора может быть формализована и представлена в виде чёткой последовательности операций путём использования технологии вложения систем [3].

Технология вложения систем представляет собой универсальную совокупность методов решения задач теории систем, сводящуюся к определению условий, при которых некоторая

сложная система ведёт себя аналогично заданной более простой системе. Основные достоинства технологии вложения заключаются в аналитичности получаемых решений, в возможности получения множества эквивалентных решений и дальнейшем выборе конкретного экземпляра с требуемыми характеристиками, в наличии чётких условий разрешимости задачи синтеза. Примеры использования технологии вложения для синтеза адаптивных и квазиадаптивных систем управления представлены в работах [4, 5].

Однако, практический опыт создания систем управления технологическим оборудованием выявил определённое несовершенство разработанных методик и алгоритмов. В ряде случаев полученное с их помощью решение, являясь формально истинным, не могло быть использовано на практике, так как не обладало свойством робастности (внутренней устойчивости). Таким образом, насущной задачей стало дополнение и совершенствование существующих алгоритмов аналитического синтеза квазиадаптивных систем управления по технологии вложения, с целью обеспечения робастности получаемых решений.

В представленной работе приведён алгоритм синтеза квазиадаптивных систем управления по технологии вложения систем. Проведён анализ структуры множества эквивалентных регуляторов и предкомпенсаторов, выявлены условия, при которых решение задачи не будет обладать свойством робастности. Даны рекомендации, позволяющие на начальном этапе обеспечить получение робастного решения задачи синтеза. Предложена модификация алгоритма аналитического синтеза системы управления, обеспечивающая желаемые характеристики получаемого решения, на основе применения аппарата системных нулей [6].

## 1 Формальная постановка задачи

Пусть рассматривается динамический объект, описываемый в пространстве состояний системой уравнений:

$$(1)\quad \begin{cases} \dot{x}_o = A_o x_o + B_o u; \\ y_o = C_o x_o. \end{cases}$$

Здесь $x_o \in R^n, u \in R^s, y_o \in R^m$ – векторы состояния, управления и выхода, $A_o, B_o, C_o$ – числовые матрицы соответствующих размеров. Предполагается, что $m = s$ (число входов равно числу выходов), матрицы $B_o, C_o$ полного ранга, передаточная матрица динамического объекта $W_o(p)$ обратима (отсутствует линейная зависимость между каналами передачи сигнала).

Для динамического объекта (1) строится квазиадаптивная система управления с эталонной моделью, структурная схема которой представлена на рисунке 1.

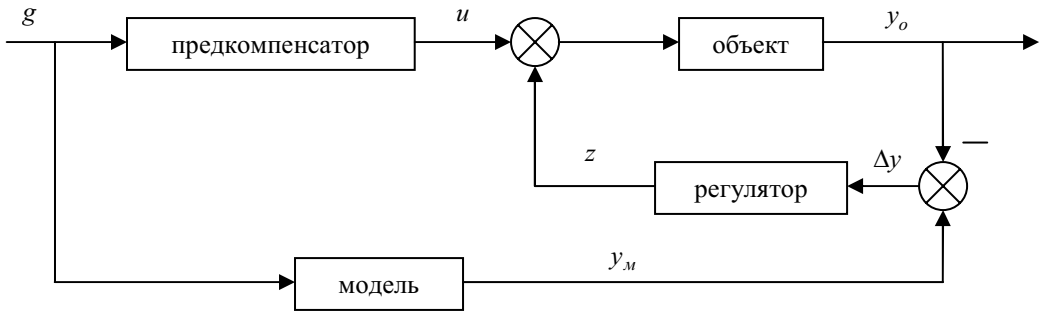



Рисунок 1 – Структурная схема квазиадаптивной системы управления с эталонной моделью

Представленная система управления включает в себя предкомпенсатор с передаточной матрицей $G(p)$, регулятор в цепи обратной связи с передаточной матрицей $K(p)$ и эталонную

модель, которая формализует желаемое поведение системы и описывается уравнениями в пространстве состояний:

$$(2)\quad \begin{cases} \dot{x}_м = A_м x_м + B_м g; \\ y_м = C_м x_м . \end{cases}$$

Здесь $x_м \in R^n, g \in R^m, y_м \in R^m$ – векторы состояния, управления и выхода, $A_м, B_м, C_м$ – числовые матрицы соответствующих размеров.

Предполагается, что матрица $G(p)$ квадратная обратимая, т. е. используется регулярный закон управления.

Качество управления определяется по вектору рассогласования $\Delta y$ и задаётся передаточной матрицей от вектора начального состояния объекта к рассогласованию выходных векторов объекта и модели $E^0_{\Delta y}(p)$ и передаточной матрицей от вектора внешних управляющих воздействий к рассогласованию выходных векторов объекта и модели $E^g_{\Delta y}(p)$.

Необходимо для заданного динамического объекта (1) и эталонной модели (2) найти передаточные матрицы $K(p)$ и $G(p)$ или условия, их определяющие, при которых передаточные матрицы $E^0_{\Delta y}(p)$ и/или $E^g_{\Delta y}(p)$ имеют требуемый вид. Кроме того, необходимо выявить условия робастности (внутренней устойчивости) синтезированной системы управления и сформулировать способы его обеспечения.

## 2 Разработка алгоритма аналитического синтеза

Синтез квазиадаптивной системы управления может осуществляться по различным составляющим рассогласования выходных векторов объекта и эталонной модели (по свободной, по вынужденной, по свободной и вынужденной) [2].

Поэтапное выполнение процедур, предусмотренных технологией вложения [3] применительно к рассматриваемой нами системе даёт следующие результаты.

Синтез по свободной составляющей рассогласования выходных векторов в конечном итоге сводится к решению системы матричных уравнений:

$$(3)\quad \begin{cases} E^0_{\Delta y} B_o K C_o = C_o - E^0_{\Delta y}(pI - A_o); \\ \pi_x(pI - A_м) - E^0_{\Delta y} B_o K C_м = -C_м . \end{cases}$$

Синтез по вынужденной составляющей рассогласования выходных векторов в конечном итоге сводится к решению системы матричных уравнений:

$$(4)\quad \begin{cases} \pi_x B_o G + \pi_{\bar{x}} B_м = E^g_{\Delta y}; \\ \pi_x(pI - A_o) + \pi_x B_o K C_o = C_o ; \\ \pi_{\bar{x}}(pI - A_м) - \pi_x B_o K C_м = -C_м . \end{cases}$$

Синтез по свободной и вынужденной составляющим рассогласования выходных векторов в конечном итоге сводится к решению системы матричных уравнений:

$$(5)\quad \begin{cases} E^0_{\Delta y} B_o G + \pi_{\bar{x}} B_м = E^g_{\Delta y}; \\ E^0_{\Delta y} B_o K C_o = C_o - E^0_{\Delta y}(pI - A_o); \\ \pi_{\bar{x}}(pI - A_м) - E^0_{\Delta y} B_o K C_м = -C_м . \end{cases}$$

В системах (3) – (5) символами $\pi_x$ и $\pi_{\bar{x}}$ обозначены вспомогательные полиномиальные матрицы соответствующих размерностей.

При синтезе по свободной, по свободной и вынужденной составляющим рассогласования выходных векторов из (3) и (5) после соответствующих преобразований можно получить класс решений для передаточной матрицы регулятора:

$$(6)\quad \langle K(p)\rangle_{\mu,\eta} = \widetilde{E}\left[C_o - E^0_{\Delta y}(pI - A_o)\right]\ \widetilde{C}_o + \mu(p)\overline{C}_o^{\,L} + \overline{E}^{\,R}\eta(p).$$

Здесь $E = E^0_{\Delta y}B_o$, а $\mu(p),\eta(p)$ – произвольные матрицы подходящего размера.

Условием существования решения (6) является выполнение соотношений:

$$(7)\quad \begin{cases} \overline{E}^{\,L}\left[C_o - E^0_{\Delta y}(pI - A_o)\right] = 0; \\ \left[C_o - E^0_{\Delta y}(pI - A_o)\right]\overline{C}_o^{\,R} = 0. \end{cases}$$

После преобразования систему (7) можно представить в следующем виде:

$$(8)\quad \begin{cases} \overline{\overline{E}^{\,L}}^{\,R}\xi(p) = \psi(p)\overline{\overline{C}_o^{\,R}}^{\,L}; \\ E^0_{\Delta y} = \left[C_o - \psi(p)\overline{\overline{C}_o^{\,R}}^{\,L}\right](pI - A_o)^{-1}. \end{cases}$$

Здесь $\xi(p),\psi(p)$ – произвольные матрицы подходящего размера.

Учитывая свойства делителей нуля, запишем систему (8) в следующем виде:

$$(9)\quad \begin{cases} E\xi_1(p) = \psi_1(p)C_o; \\ E^0_{\Delta y} = \psi_2(p)C_o(pI - A_o)^{-1}. \end{cases}$$

Здесь $\xi_1(p) = \widetilde{E}^{\,R}\xi(p)$, $\psi_1(p) = \psi(p)\widetilde{C}_o^{\,L}$, $\psi_2(p) = \left[I - \psi(p)\widetilde{C}_o^{\,L}\right]$.

Подставив полученные условия разрешимости в формулу (6), получим:

$$(10)\quad \begin{cases} \langle K(p)\rangle_{\mu,\eta} = \widetilde{E}\psi_1(p)\widetilde{C}_o + \mu(p)\overline{C}_o^{\,L} + \overline{E}^{\,R}\eta(p); \\ E = \psi_2(p)C_o(pI - A_o)^{-1}B_o. \end{cases}$$

Из второго уравнения системы (10) следует, что $E = \psi_2(p)W_o(p)$, откуда, с учётом обратимости передаточной матрицы объекта управления, получим окончательно:

$$(11)\quad \langle K(p)\rangle_{\mu,\eta} = W_o^{-1}\widetilde{\psi}_2\psi_1\,\widetilde{C}_o + \mu\,\overline{C}_o^{\,L} + W_o^{-1}\overline{\psi}_2^{\,R}\,\eta.$$

Класс решений для передаточной матрицы предкомпенсатора определяется выражением:

$$(12)\quad \langle G(p)\rangle_{\varphi} = W_o^{-1}\widetilde{\psi}_2\left[E^g_{\Delta y} - (\psi_2 W_o K - I)W_м\right] + W_o^{-1}\overline{\psi}_2^{\,R}\varphi(p).$$

Условием существования решения (12) является выполнение соотношения:

$$(13)\quad \overline{\psi}_2^{\,L}\left[E^g_{\Delta y} - (\psi_2 W_o K - I)W_м\right] = 0.$$

Анализ соотношений (11) – (12) показывает, что в выражения для передаточных матриц регулятора и предкомпенсатора входит передаточная матрица объекта управления и обратная к ней матрица. Следовательно, в общем случае множество полюсов регулятора будет включать в себя те значения комплексной переменной, при которых определитель $W_o$ обращается в нуль, т. е. системные нули [6] исходного объекта управления. Множество полюсов предкомпенсатора в общем случае будет включать в себя множество полюсов и системных нулей исходного объекта управления.

Следовательно, при синтезе рассматриваемой системы по свободной, по свободной и вынужденной составляющим рассогласования выходных векторов на начальном этапе следует определить полюса и системные нули объекта управления. В случае, когда исходный объект является неустойчивым, следует ввести внутренний контур стабилизирующей обратной связи, а затем уже осуществлять синтез с помощью известных алгоритмов [2]. В случае, когда исходный объект имеет неминимально-фазовые системные нули, следует на начальном этапе провести коррекцию его входной или выходной матрицы одним из известных способов [7, 8], а затем осуществлять синтез с помощью известных алгоритмов.

При синтезе по вынужденной составляющей рассогласования выходных векторов из (4) после преобразований можно получить класс решений для передаточной матрицы регулятора:

$$(14)\quad \langle K(p)\rangle_{\mu,\eta} = \widetilde{E}\left[C_o - \pi_x(pI - A_o)\right]\ \widetilde{C}_o + \mu(p)\overline{C}_o^{\,L} + \overline{E}^{\,R}\eta(p).$$

Здесь $E = \pi_x B_o$, а $\mu(p), \eta(p), \pi_x(p)$ – произвольные матрицы подходящего размера.

Условием существования решения (14) является выполнение соотношений:

$$(15)\quad \begin{cases} \overline{E}^{\,L}\left[C_o - \pi_x(pI - A_o)\right] = 0; \\ \left[C_o - \pi_x(pI - A_o)\right]\ \overline{C}_o^{\,R} = 0. \end{cases}$$

Проведя преобразования, аналогичные (8) – (10), и учитывая обратимость передаточной матрицы объекта управления, получим:

$$(16)\quad \langle K(p)\rangle_{\mu,\eta} = W_o^{-1}\widetilde{\gamma}_2\gamma_1\,\widetilde{C}_o + \mu\,\overline{C}_o^{\,L} + W_o^{-1}\overline{\psi}_2^{\,R}\,\eta.$$

Здесь $\gamma_1(p) = \gamma(p)\widetilde{C}_o^{\,L}$, $\gamma_2(p) = \left[I - \gamma(p)\widetilde{C}_o^{\,L}\right]$, а $\gamma(p)$ – произвольная матрица подходящего размера.

Класс решений для передаточной матрицы предкомпенсатора определяется выражением:

$$(17)\quad \langle G(p)\rangle_{\varphi} = W_o^{-1}\widetilde{\gamma}_2\left[E_{\Delta y}^{g} - (\gamma_2 W_o K - I)\,W_м\right] + W_o^{-1}\overline{\gamma}_2^{\,R}\varphi(p).$$

Условием существования решения (17) является выполнение соотношения:

$$(18)\quad \overline{\gamma}_2^{\,L}\left[E_{\Delta y}^{g} - (\gamma_2 W_o K - I)\,W_м\right] = 0.$$

Сравнение между собой соотношений (11) – (12) и (16) – (17) показывает, что структура решения в обоих случаях будет одинаковой, отличие заключается лишь в используемых вспомогательных матрицах. Следовательно, сделанные ранее выводы об ограничениях существующих алгоритмов синтеза остаются справедливыми, равно как и рекомендации по их совершенствованию.

Сформулируем модифицированный алгоритм аналитического синтеза квазиадаптивной системы управления с эталонной моделью по технологии вложения с обеспечение робастности получаемого решения.

1) Задаётся эталонная модель вида (2), определяющая желаемое поведение проектируемой системы.
2) Задаются передаточные матрицы $E_{\Delta y}^{0}(p)$ и/или $E_{\Delta y}^{g}(p)$, определяющие качество процессов управления.
3) Вычисляются системные нули объекта управления. Если среди них имеются неминимально-фазовые, то проводится коррекция спектра системных нулей одним из известных методов.
4) Вычисляются полюса объекта управления. Если среди них имеются неустойчивые, то строится внутренний контур обратной связи, стабилизирующий объект управления.

5) По формулам (11) – (12) или (16) – (17) определяется передаточные матрицы регулятора и предкомпенсатора.
6) Исходя из дополнительных требований к проектируемой системе управления, задаются матрицы $\mu,\eta,\psi$ или $\mu,\eta,\gamma$, обеспечивающие выполнение условий разрешимости (13) или (18).

Поставленная задача решена.

Разработанный алгоритм аналитического синтеза может быть использован при проектировании качественных систем управления технологическим оборудованием в различных отраслях промышленности.

**Заключение**

В работе рассмотрены основные этапы синтеза квазиадаптивной системы управления с эталонной моделью по технологии вложения по различным составляющим рассогласования выходных векторов (по свободной, по вынужденной, по свободной и вынужденной). Показаны аналитические соотношения, определяющие эквивалентные множества передаточных матриц регулятора и предкомпенсатора. Сформулированы условия отсутствия внутренней неустойчивости проектируемой системы: минимально-фазовость и устойчивость объекта управления. Предложена модификация известного алгоритма аналитического синтеза, позволяющая учесть сформулированные условия и построить систему управления, обладающую свойством робастности (внутренней устойчивости).

**Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-08-00311).

**Список литературы**

[1] Методы робастного, нейро-нечёткого и адаптивного управления / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002. – 744 с.
[2] Асанов А.З. Аналитическое конструирование систем управления нестационарными технологическими объектами. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та. 2003. – 296 с.
[3] Буков В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем – Калуга: изд.научной лит. Н.Ф. Бочкаревой. 2006. – 720 с.
[4] Асанов А.З. Аналитическое конструирование адаптивной системы с эталонной моделью // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2003. – № 3. – С. 7-12.
[5] Асанов А.З. Синтез многотемповой системы управления, эквивалентной адаптивной, по технологии вложения // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 8 – С. 2–8.
[6] Смагина Е.М. Вопросы анализа линейных многомерных объектов с использованием понятия нуля системы. – Томск: Изд-во Том. ун-та. 1990. – 160 с.
[7] Синтез вход/выходных матриц многосвязной динамической системы по заданным передаточным нулям / Асанов А.З., Демьянов Д.Н. // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2008. – № 6. – С. 5-18.
[8] Конструирование входных/выходных матриц модели многосвязной динамической системы с заданием некоторых инвариантов / Асанов А.З., Демьянов Д.Н. // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'09: Труды VIII Международной конференции. – Москва: ИПУ РАН, 2009. – С. 1390-1421.

# МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОДНОВИТКОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ И ЛОПАТОК. СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ

**М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов**

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
kuteynikova@iccs.ru
тел. +7 (846) 333-26-77, факс +7 (846) 333-27-70

***Ключевые слова:*** *модель электромагнитного взаимодействия, метод конечных элементов, закон Био-Савара, чувствительный элемент*

**Abstract**
We consider the principle of construction of models of the electromagnetic interaction of single-coil eddy current sensors to the ends of the blades. It also provides descriptions of the developed models and prospects for development.

## Введение

Применение одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) для задач измерения радиальных зазоров (РЗ) в проточной части ГТД (в общем случае координатных перемещений торца лопатки) сопряжено с рядом факторов, оказывающих негативное влияние на характеристики преобразования. Прежде всего, следует отметить, что, во-первых, чувствительный элемент (ЧЭ) датчика находится в газо-воздушной среде работающего двигателя с изменяющейся температурой, достигающей 1000÷1200°С. Во-вторых, в измерительном процессе участвует элемент конструкции двигателя – рабочая лопатка, электрофизические свойства и геометрическая форма торцевой части которой далеки от оптимальных для обеспечения необходимых метрологических показателей. Так, в связи с низкой электропроводностью материала лопатки изменение индуктивности датчика на диапазон измеряемого параметра составляет 2÷3%. В тоже время, изменение индуктивности датчика, связанное с изменением геометрических размеров элементов конструкции, их электропроводности, а также электропроводности материала лопатки составляет 1÷2% при изменении температуры в газовоздушном тракте на 100°С и сравнимы с изменением индуктивности датчика от измеряемого параметра.

Для обеспечения заданной точности измерений в этих условиях необходим комплекс исследований с целью анализа влияний конструктивных и электрофизических параметров элементов датчика, а также лопатки, на характеристики преобразования. Указанный комплекс исследований может быть проведен лишь с использованием модели электромагнитного взаимодействия ЧЭ датчика с лопаткой. Важнейшим требованием к модели является идентичность режимов работы датчика в измерительной цепи и в модели.

## 1 Особенности измерительной цепи с вихретоковым датчиком

Работа измерительной цепи (рисунок 1) основана на так называемом «методе первой производной» [1].

Метод предусматривает создание тестового переходного процесса в цепи с индуктивным датчиком путем подключения его к источнику постоянного напряжения Е, дифференцирование тока $i(t)$ измерительной цепи и определение величины информационного параметра датчика $L(x,y,z)$ по величине производной тока в начальной области переходного процесса ($t \to 0$):

(1) $$i'_{t\to 0} = \frac{E}{L(x, y, z)}$$

Индуктивность вихретокового датчика в этом случае при постоянном значении *x,y,z* изменяется во времени *L* (*x,y,z,t*), так как зависит от «вносимой» индуктивности, связанной с изменяющейся интенсивностью вихревых токов в материале объекта. Это накладывает дополнительные ограничения на применение метода преобразования, связанные с необходимостью выбора момента времени, при котором значение индуктивности будет использовано в качестве информационного параметра.

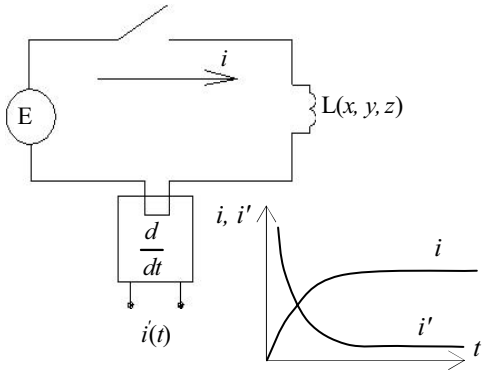


Рисунок 1 – Измерительная цепь и зависимости тока, проходящего через датчик и его производной от времени

В модели, отражающей работу вихретокового датчика в измерительной цепи, присутствуют процессы, протекающие в двух различных «средах» - во-первых, в электрической цепи и, во-вторых, в электромагнитном поле чувствительного элемента датчика и объекта. Для описания указанных процессов используются различные математические аппараты, что затрудняет совместное описание этих процессов.

## 2 Обобщенная модель взаимодействия ОВТД и лопатки

В рассматриваемом подходе общее математическое описание процессов сведено к системе дифференциальных уравнений с использованием математического аппарата теории электрических цепей [2]. В качестве основы для построения модели использованы метод конечного элемента, закон электромагнитной индукции Фарадея, законы Кирхгофа, закон Био-Савара [3].

*Функции модели:*

- вычисление зависимостей токов модели от времени;
- вычисление зависимости индуктивности датчика от времени;
- вычисление зависимостей индуктивности датчика в заданный момент времени от координатных перемещений торца лопатки относительно ЧЭ.

*Модель должна учитывать:*

- режим работы датчика в измерительной цепи;
- форму и электрофизические свойства ЧЭ;
- количество и топологию размещения ЧЭ в кластерном датчике;
- форму и электрофизические свойства лопатки;
- многомерное перемещение торца лопатки относительно датчика в декартовой системе координат по осям X,Y,Z и угловое смещение торца лопатки $\varphi$.

На рисунке 2 представлен упрощенный вариант конструкции датчика с одним ЧЭ [1]. В качестве основных элементов конструкции выделены ЧЭ, контур ЧЭ, тоководы, объемный виток, обмотка согласующего трансформатора с сердечником. Несмотря на то, что объемный виток и тоководы являются симметричными конструктивными элементами, линии тока по этим элементам будут иметь сложную траекторию и сходится в точках соединения с ЧЭ (точки B и D на рисунке 2). Пространственное положение линий тока в материале объемного витка и токовода, а также их изменение в течение переходного процесса в измерительной цепи могут быть выявлены только с помощью моделирования.

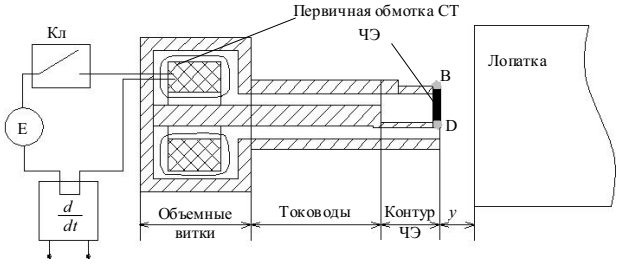



Рисунок 2 – Упрощенная конструкция ОВТД

На рисунке 3 показан принцип выделения конечных элементов на примере лопатки. Разбиение на конечные элементы достигается делением с заданным шагом объема материала элемента по направлениям осей координат [4]. В пределах границ конечного элемента принимаются постоянными электрофизические свойства материала, а также параметры электромагнитного поля в фиксированный момент времени.

В предлагаемом подходе конечные элементы заменяются «геометрическими эквивалентами», представляющими фигуру из бесконечно тонких проводящих нитей, проходящих по ребрам конечного элемента. В результате реальный элемент конструкции датчика и лопатка заменяются «геометрическим аналогом» в виде объемной сетки. В контурах сетки под воздействием электромагнитного поля, возбуждаемого током ЧЭ, возникают ЭДС индукции и соответствующие контурные (вихревые) токи. Нити между узлами сетки являются элементами тока $\overline{\lambda}$, и в окружающем пространстве каждый из них создает дополнительное электромагнитное поле, взаимодействующее с контуром ЧЭ и со всеми контурами конечных элементов.

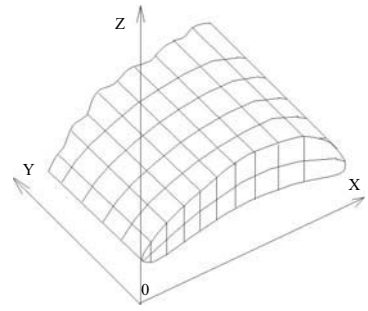



Рисунок 3 – Разбиение лопатки на конечные элементы

Такой поход позволяет заменить сетку из проводящих нитей на электрическую схему, в которой сохраняются контуры сетки, а в ветвях между узлами устанавливаются эквивалентные сопротивления, величина которых связана с электропроводностью материала и размерами конечного элемента. Это и позволяет описать процессы в модели системой уравнений с использованием закона Кирхгофа для контуров электрической цепи [3]. Число уравнений будет определяться общим количеством контуров в модели. В таблице 1 приведен состав системы уравнений для датчика с одним ЧЭ.

Таблица 1

| № | Принадлежность контуров | Обозначение | Количество контуров | Уравнение контуров |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | Цепь источника питания | $К_{ИП}$ | 1 | $Iип * R_{ИП}= E+\varepsilon_{ИП}$ |
| 2 | Контур ЧЭ | $К_{ЧЭ}$ | 1 | $I_{ЧЭ} * R_{ЧЭ}= E_{ЧЭ}+\varepsilon_{ЧЭ}$ |
| 3 | Контуры объема проводника ЧЭ | $К_{\alpha}$ | М | $I_{\alpha 1} * R_{\alpha 1} = \varepsilon_{\alpha 1}$ … $I_{\alpha m} * R_{\alpha m} = \varepsilon_{\alpha m}$ … |

Продолжение таблицы 1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| 5 | Контуры объемного витка | $K_\gamma$ | P | $I_{\gamma 1} * R_{\gamma 1} = \varepsilon_{\gamma 1}$ … $I_{\gamma p} * R_{\gamma p} = \varepsilon_{\gamma p}$ … |
| 6 | Контуры тоководов | $K_\xi$ | K | $I_{\xi 1} * R_{\xi 1} = \varepsilon_{\xi 1}$ … $I_{\xi k} * R_{\xi k} = \varepsilon_{\xi k1}$ … |
| 7 | Общее число контуров | Q | 3+M+N+P+K | |

В уравнениях полное сопротивление контура R, равное сумме сопротивлений ветвей, а электродвижущая сила индукции ε контура определится известным выражением (2)

$$(2) \quad \varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \cdot (\overline{S} \cdot \overline{B}),$$

где $\overline{S}$ – вектор площади контура,

$\overline{B}$ – вектор индукции в центре площадки контура.

В общем случае вектор индукции равен сумме индукций, создаваемых всеми элементами тока $\overline{\lambda}$ (ветвей) модели. Индукция от тока ветви в точке A(*x,y,z*) определится по закону Био-Савара [2]:

$$(3) \quad d\overline{B_A} = \frac{\mu_0}{4\pi \cdot r^3} [\overline{\lambda} \cdot \overline{r}] \cdot i,$$

где $\overline{r}$ – радиус-вектор, направленный от центра элемента тока $\overline{\lambda}$ к центру площади контура, $\mu_0$ –магнитная проницаемость вакуума.

После замены токов ветвей на токи контуров число неизвестных токов будет равно числу уравнений в системе. Это позволяет решить систему уравнений и найти зависимость контурных токов модели от времени. Структура уравнений для контуров идентична и, например, для контура ЧЭ будет иметь следующий вид:

$$(4) \quad \begin{aligned} i_\alpha R_\alpha = E_\alpha - \frac{d}{dt} \cdot (&C_{ИП-S\alpha} \cdot i_{ИП} + C_{ЧЭ\text{-}S\alpha} \cdot i_{ЧЭ} + \sum_1^M (C_{\alpha m - S\alpha} \cdot i_{\alpha m}) + \\ &+ \sum_1^N (C_{\beta n - S\alpha} \cdot i_{\beta n}) + \sum_1^P (C_{\gamma p - S\alpha} \cdot i_{\gamma p}) + \sum_1^K (C_{\xi k - S\alpha} \cdot i_{\xi k})) \end{aligned}$$

Токи модели позволяют определить индукцию в центре площадки $S_k$ любого из контуров, найти магнитный поток контура $\Phi_k(t)$ и индуктивность контура $L_k(t)$, включая индуктивность датчика и чувствительного элемента:

$$(5) \quad \Phi_k(t) = \overline{S}_k \cdot \overline{B}_k(t),$$

$$(6) \quad L_k(t) = \frac{\Phi_k(t)}{i_k(t)}$$

Фиксируя значение индуктивности в заданное время $t = t_з$ для различных значений параметров модели, например, перемещений по координатным осям, получим функцию преобразования датчика $L(x,y,z)$.

## 3 Разработанные модели

Задача построения универсальной модели, учитывающей все элементы конструкции датчика, многочисленные варианты лопаток компрессоров и турбин ГТД, их электрофизические свойства, а также параметры внешней среды, является весьма сложной. Модель должна содержать сотни уравнений, в каждом из которых количество слагаемых определяется числом контуров модели.

Обычно, задачи исследований формулируются в «узких» направлениях, для которых в модели подробно представлен лишь исследуемый элемент, а в отношении других элементов приняты существенные упрощения.

В настоящее время для решения конкретных задач разработан ряд «частных» моделей, вытекающих из таблицы 1 путем сохранения компонентов, оказывающих существенное влияние на исследуемый процесс.

**Модель для исследования семейства градуировочных характеристик датчика при взаимодействии с лопаткой компрессора высокого давления**

Лопатка компрессора высокого давления практически плоская, близка к прямоугольной форме и имеет малую толщину. Модель содержит контур чувствительного элемента, и имитатор лопатки в виде прямоугольной тонкой электропроводной пластины, представленной конечными элементами. Система уравнений содержит уравнение контура ЧЭ (строка 2, таблицы 1) и уравнения имитатора лопатки (строка 4, таблицы 1). Модель позволяет оценить влияние геометрических размеров ЧЭ, контура ЧЭ и имитатора лопатки, а также их электропроводности, на градуировочные характеристики и, в частности, на чувствительность к перемещениям по осям $X$, $Y$, $Z$ [5].

**Модель для исследования семейства градуировочных характеристик датчика при взаимодействии с лопаткой турбины**

Турбинная лопатка имеет «серповидную» форму торца и U-образную форму сечения пера. Модель содержит контур чувствительного элемента и контуры конечных элементов, размещенных на боковой поверхности лопатки. Система уравнений содержит уравнение контура ЧЭ (строка 2, таблицы 1) и уравнения имитатора лопатки (строка 4, таблицы 1). В ходе исследований на модели, выявлены несколько экстремумов на зависимости $L_{ЧЭ}(z)$ в связи с влиянием U-образного сечения торца лопатки. Найден оптимальный угол $\varphi$ смещения ЧЭ относительно хорды лопатки, при котором $L_{ЧЭ}(z)$ имеет один экстремум. Для оптимального угла $\varphi$ исследованы градуировочные характеристики датчика.

**Модель для исследования влияния формы сечения ЧЭ на характеристики датчика**

Модель содержит контур источника питания ЧЭ, контуры конечных элементов объемного проводника чувствительного элемента и имитатор лопатки, представленный одиночным контуром. Система уравнений содержит уравнение контура ЧЭ (строка 2, таблицы 1), уравнения конечных элементов проводника ЧЭ (строка 3, таблицы 1) и уравнение имитатора лопатки, аналогичное строке 2, таблицы 1. Выявлено, что вихревые токи в материале чувствительного элемента, вызванные изменяющимся собственным током, в начальной области переходного процесса увеличивают эквивалентную индуктивность контура ЧЭ. Лучшую чувствительность к перемещению имеют ЧЭ в виде пластины, обращенной плоскостью к торцу лопатки. С уменьшением площади сечения проводника ЧЭ, чувствительность возрастает.

**Модель для исследования характеристик кластерного датчика**

Модель содержит три ЧЭ с гальванически не связанными контурами и контуры конечных элементов имитатора лопатки в виде прямоугольной пластины из электропроводного материала. Система уравнений содержит три уравнения контуров ЧЭ, аналогичные строке 2, таблицы 1 и уравнения конечных элементов имитатора лопатки (строка 4, таблицы 1). Исследовано влияние согласного и встречного включения источников питания ЧЭ на градуировочные характеристики чувствительных элементов $L_{ЧЭ1}(x,y,z)$, $L_{ЧЭ2}(x,y,z)$, $L_{ЧЭ3}(x,y,z)$ для различного размещения ЧЭ в датчике [4,6].

## Заключение

Предложенный подход моделирования процессов в измерительной цепи с учетом процессов в электромагнитном поле чувствительного элемента вихретокового датчика позволил создать ряд частных моделей, с помощью которых выполнены исследования влияния на градуировочные характеристики конструктивных и физических параметров датчика и лопатки. Для завершения исследований элементов конструкции датчика необходимо разработать частные модели для объемного витка и тоководов, в систему уравнений которых войдут строки 5 и 6 таблицы 1.

Для комплексной оценки функционирования измерительной цепи и всех элементов конструкции ОВТД необходима обобщенная модель с полной системой уравнений таблицы 1.

## Список литературы


[1] Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Секисова Ю.Н., Скобелева О.П. – Самара, Самарский НЦ РАН ,2001. – 188с.

[2] Теория линейных электрических цепей / Афанасьев Б.П., Гольдин О.Е. и др. – М., «Высшая школа», 1973 – 592с.

[3] Курс общей физики, Книга 2 «Электромагнетизм, оптика, квантовая физика» / Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спирин Г.Г. – М., Высшая школа, 2003, 438с.

[4] Боровик С.Ю., Маринина Ю.В., Секисов Ю.Н. Модель кластерного одновиткового вихретокового датчика на основе метода конечных элементов.// Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки», 2007. №1(19) – с.76-83

[5] Секисов Ю.Н. Методы и средства измерений многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок // Автореферат дисс. докт. наук, - Самара, 1999. – 32 с.

[6] Боровик С.Ю. Кластерные методы и системы измерения деформаций статора и координат смещения торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях // Дисс. докт. наук, - Самара, 2011. – 306 с.

# КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОДНОВИТКОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ

**М.М. Кутейникова, Б.К. Райков, О.П. Скобелев**

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
raikov@iccs.ru
тел. +7 (846) 333-26-77, факс +7 (846) 333-27-70

***Ключевые слова:*** *высокотемпературные одновитковые вихретоковые датчики, конструктивные разновидности, согласующие трансформаторы с ферритовым и бесферритовым сердечником, семейства градуировочных характеристик, оценка чувствительности*

**Abstract**

The article considers the new design of high temperature eddy-current turbine-oriented sensors. Their sensitive elements are located in gas-air path and their matching transformers – outside the stator case in heightened temperature conditions. In the article presents calibration characteristics of sensors' models and evaluation of sensitivity to changes in the radial and axial displacements of blades' faces.

## Введение

Существующие на сегодняшний день конструкции одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) включают три основных функциональных элемента: чувствительный элемент (ЧЭ) в виде отрезка проводника, согласующий трансформатор (СТ) и тоководы (ТВ) [1,2], которые соединяют ЧЭ с вторичной обмоткой СТ, выполненной в виде объемного витка (ОВ), тесно связанного с первичной обмоткой. Первичная обмотка СТ включается в измерительную цепь, где и осуществляется последующее преобразование индуктивности ЧЭ. Обмотки СТ размещаются на сердечнике из высокочастотного феррита с большой магнитной проницаемостью, что способствует минимизации размеров датчика. Геометрические и электрические параметры функциональных элементов ОВТД при проектировании выбирают исходя из задачи измерений (формы и размеров объекта контроля, параметров окружающей среды, места для размещения датчиков и его элементов).

При установке ОВТД на статоре турбины в зоне наиболее тяжелых температурных условий рабочей среды в газовоздушном тракте находится ЧЭ и ТВ, с помощью которых СТ выносится из этой зоны. При этом наиболее зависимым от температуры поведением отличается ферритовый сердечник СТ, относительная магнитная проницаемость которого в точке Кюри становится равной единице. Такие условия работы СТ (при повышенной температуре) возможны вне статорной оболочки турбины, где СТ приходится размещать не на открытом воздухе, а под кожухом, в замкнутом пространстве.

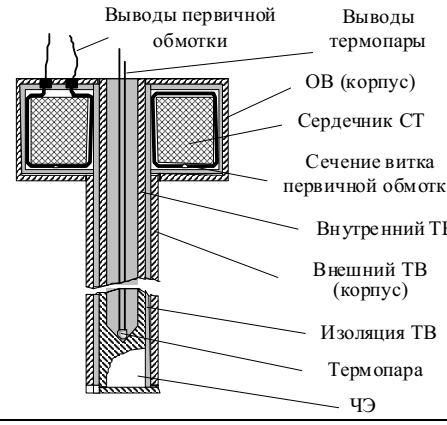
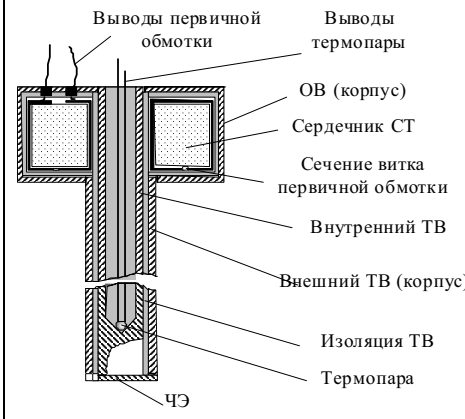
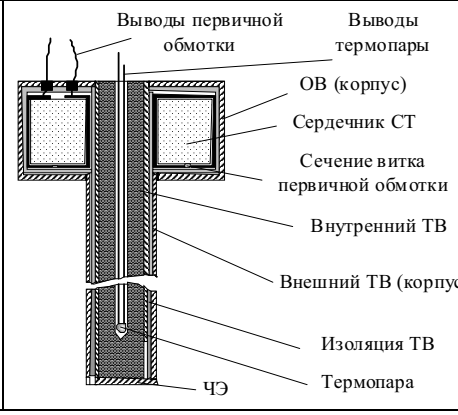
Если температура в зоне СТ существующих конструкций ОВТД выше точки Кюри материала сердечника, то они теряют работоспособность.

В настоящей статье рассматриваются новые разновидности высокотемпературных ОВТД, СТ которых способны функционировать в условиях повышенных температур вне статорной оболочки турбины. Приводятся также семейства градуировочных характеристик (ГХ) действующих макетов ОВТД и результаты сравнительной оценки чувствительности к изменениям радиальных и осевых смещений торцов лопаток.

## 1 Новые конструктивные разновидности ОВТД

Новые конструктивные разновидности высокотемпературных ОВТД представлены в Таблице 1 и отличаются применяемыми материалами и способами изготовления функциональных элементов датчиков.

Таблица 1 – Высокотемпературные ОВТД

| № п/п | Основные отличительные особенности | Конструкция | Примечания |
|---|---|---|---|
| 1 | Ферритовый сердечник СТ (из феррита с высоким значением точки Кюри). |  | Первичная обмотка СТ выполнена из провода с высокотемпературной изоляцией |
| 2 | Бесферритовый (воздушный) СТ |  | |
| 3 | ЧЭ, ТВ, ОВ и первичная обмотка СТ выполнены в виде электропроводных покрытий на керамической основе |  | ТВ на керамической основе: чередование напыленных слоев металла и изоляции |

В строке 1 Таблицы 1 представлена конструкция ОВТД, элементы которой (ЧЭ, ТВ, СТ) аналогичны соответствующим элементам в существующих датчиках, применяемых в экспериментальных исследованиях ГТД [1, 2]. Вместе с тем, его основным отличительным признаком является использование ферритового сердечника с высоким значением точки Кюри (до 450°С), что сопровождается потерей чувствительности из-за сниженной магнитной проницаемости, характерной для таких ферритов (μ порядка 50-80). Компенсация этих потерь связана с увеличением габаритов СТ и датчика.

Дальнейшего повышения допустимой температуры в зоне размещения СТ можно добиться, отказавшись от использования ферритового сердечника в СТ (т.е. используя воздушный трансформатор). При этом каркас под первичную обмотку СТ выполняется из жаропрочного диэлектрического материала, например, керамики (Таблица 1, строка 2). Первичная обмотка СТ в обоих вариантах конструкции (рисунок 1, а) выполняется проводом с высокотемпературной изоляцией (например, ПОЖ), а ОВ – из металла в виде пустотелого тора с нанесенным на внутреннюю поверхность слоем жаропрочного изоляционного материала. ОВ плотно охватывает катушку первичной обмотки и на нем выполняется прорезь, края которой электрически соединяются с внешним и внутренним ТВ.

Отличительные особенности конструкции ОВТД (строка 3, таблица 1) связаны с применением более современных и перспективных технологий изготовления ЧЭ, ТВ, ОВ и бесферритового (воздушного) СТ. При этом все поверхности керамического каркаса СТ кольцевой формы тем или иным способом металлизируются, а затем в слое металла удаляются межвитковые дорожки (например, электроэрозионным способом). Оставшееся покрытие в форме винтовой линии выполняет функцию первичной обмотки (рисунок 1, б).

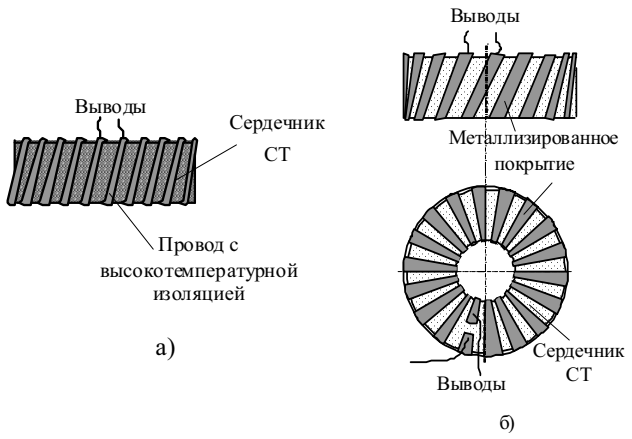



Рисунок 1 – Первичные обмотки и сердечники СТ: сердечник кольцевидной формы с первичной обмоткой в виде провода с высокотемпературной изоляцией (а) и в виде металлизированного покрытия (б)

Основной недостаток вариантов ОВТД с бесферритовым сердечником СТ заключается в том, что индуктивность ОВ становится при этом соизмеримой с индуктивностью ЧЭ, что приводит к уменьшению чувствительности.

## 2 Семейства градуировочных характеристик и оценка чувствительности макетов датчиков

Приведенные в Таблице 1 конструктивные разновидности ОВТД (строки 1 и 2) были реализованы в виде трех действующих макетов. Два из них (строка 1) с СТ на ферритовых сердечниках (ФС) с точкой Кюри до 450°С практически идентичны по основным габаритам между собой и с традиционными ОВТД. [1] Вместе с тем, первый макет (М1) (СТ на ФС) изготовлен в производственных условиях из жаропрочной нержавеющей стали с применением современных дорогостоящих технологий и способен функционировать в тяжелых температурных условиях газовоздушного тракта турбины (до 1200°С) и вне статора (до 450°С). Второй макет (М2) (также с СТ на ФС) – это конструктивный аналог М1, но в отличие от М1 изготовлен на лабораторном оборудовании, причем основные функциональные элементы М2 выполнены из латуни, которая легко обрабатывается и поддается другим технологическим операциям, связан-

ным с изготовлением макета. Основная задача макета М2 – это сравнение его основных характеристик и параметров с третьим макетом (М3), который отличается от макетов М1 и М2 наличием СТ с бесферритовым сердечником (БС). При этом макет М3, как и макет М2, изготовлен в лабораторных условиях, и его основные функциональные элементы (ЧЭ, ТВ, ОВ) также выполнены из латуни, а ЧЭ и ТВ имеют сравнимые габариты не только с макетом М2, но и с М1.

Результаты сравнения основных характеристик и параметров М2 и М3, полученных экспериментально, а также макетов М2 и М1 позволят дать прогноз на характеристики и параметры ОВТД из нержавеющей стали с СТ на БС, не прибегая к изготовлению его макета и соответствующим экспериментам.

В работе [3] приводится описание метода измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток с повышенной кривизной поверхности и U-образным профилем сечения пера лопатки плоскостью, параллельной его оси. Предполагается использование распределенного кластера (РК) [2] из двух ОВТД, а реализуемость метода показана на традиционных ОВТД, изготовленных из латуни с СТ на ФС с высокой магнитной проницаемостью (μ=700) и низкой точкой Кюри (180°С). С помощью преобразователей сигналов ОВТД [3] и АЦП платы фирмы L-Card обеспечивался ввод и обработка полученных данных на ПЭВМ в соответствии с предлагаемым методом.

Для получения градуировочных характеристик (ГХ) в виде зависимости кода АЦП от координат смещений в радиальном и осевом направлении использовалось специальное градуировочное устройство, описание которого приведено там же.[3]

Это устройство, дополненное измерителем параметров RLC (прибором Е7-12), использовалось и для получения семейств ГХ – изменений индуктивности ОВТД от координат смещений $x$ и $y$, где $x$ – это смещение в осевом, а $y$ – в радиальном направлении ($L=f(x,y)$).

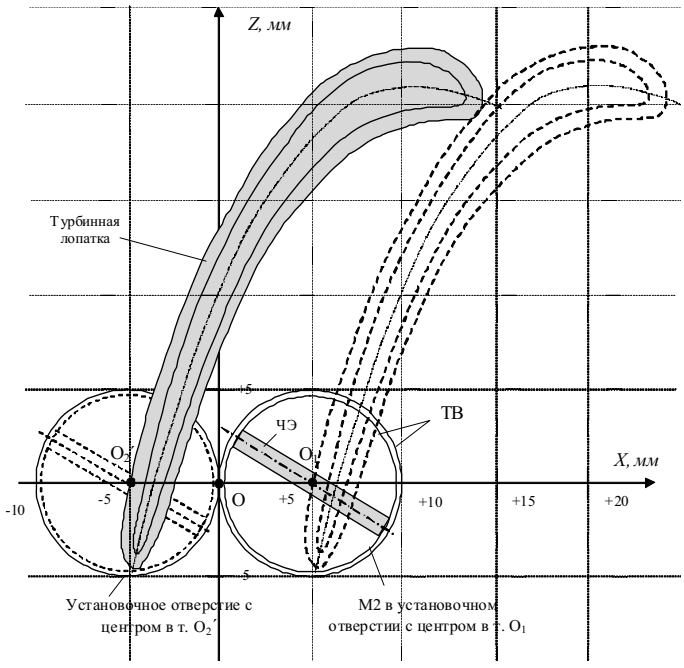



Рисунок 2 – Схематические изображения торцевых частей пера реальной турбинной лопатки и датчика в установочном отверстии в процессе градуировки

На рисунке 2 показаны два установочных отверстия на платформе градуировочного устройства [3], в одном из которых (с центром $O_1$) расположен макет М2 (видна его торцевая часть с ЧЭ и ТВ). При этом второе установочное отверстие (с центром в точке $O_2$) – свободно (пунктирными линиями обозначена возможность размещения датчика – его ТВ и ЧЭ). Начало системы отсчета находится в точке О. В плоскости рисунка обозначены ось X и ось Z (направление вращения лопаточного колеса). Ось Y направлена перпендикулярно к плоскости рисунка и совпадает с точкой О (начало отсчета). ЧЭ ОВТД повернут на 60° относительно оси Z.

Предполагается также, что в РК из двух ОВТД расстояние между прямыми, проходящими через центры ЧЭ и параллель-

ными оси Z, равно отрезку $O_1O_2'$ между центрами установочных отверстий и диаметру внешнего ТВ (10 мм).

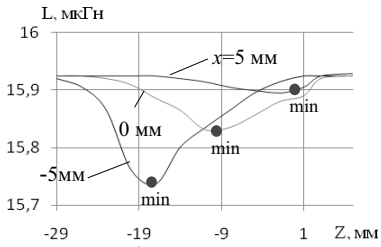



Рисунок 3 – Поиск минимальных значений индуктивности датчика в процессе получения семейства ГХ при y=0,25мм

Смещение лопатки происходит вдоль оси X. Профиль торцевой части пера лопатки (на рисунке тонирован) изображен в начальном состоянии (координата $x$=-5 мм). Крайнее правое положение (координата $x$=+5 мм) показано пунктиром. Перемещение лопатки вдоль оси X в диапазоне от -5 до +5 производится для фиксированных координат $y$=0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2 мм. При этом для каждой пары заданных координат $x$ и $y$ предусмотрена процедура поиска минимального значения функции индуктивности $L$ датчика от координаты $z$ ($L(z)$). Найденный минимум индуктивности ($L_{min}$) является одной из точек искомого семейства ГХ ($L_1=f_1(x,y)$). Поиск $L_{min}$ иллюстрирует рисунок 3, где в качестве примера функции $L(z)$ (в том числе их минимальных (min) значений) представлены изменения индуктивности для $x$=-5;0;+5 при фиксированной координате $y$=0,25 мм. На рисунке 4 представлены полученные таким образом семейства ГХ макета М2 в установочном отверстии с центром $O_1$.

В соответствии с тем же методом [3] для вычисления координат смещения $x$ и $y$ необходимо получить второе семейство ГХ для другого датчика в составе РК (для него предусмотрено второе установочное отверстие с центром $O_2$ (Рисунок 2)).

Однако в качестве «другого» датчика в проведенных экспериментах использовался тот же самый макет М2. Следует подчеркнуть, что применение М2 совсем не означало получение идентичного семейства ГХ. (Рисунок 5). Напротив, при внешнем подобии в характере измене-

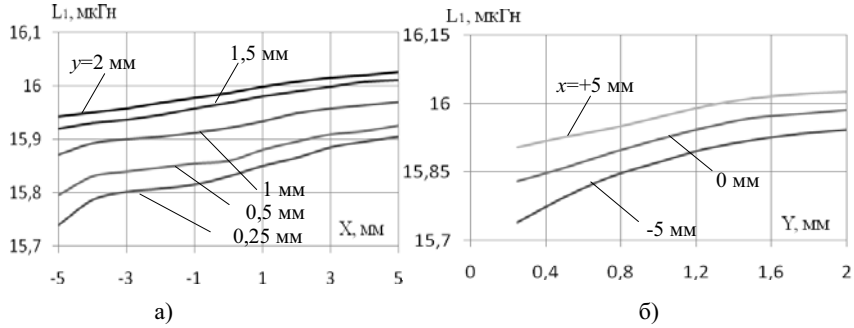



Рисунок 4 – Семейства ГХ макета М2 в установочном отверстии с центром О1: L1(x) при y=const (а), L1(y) при x=const (б)

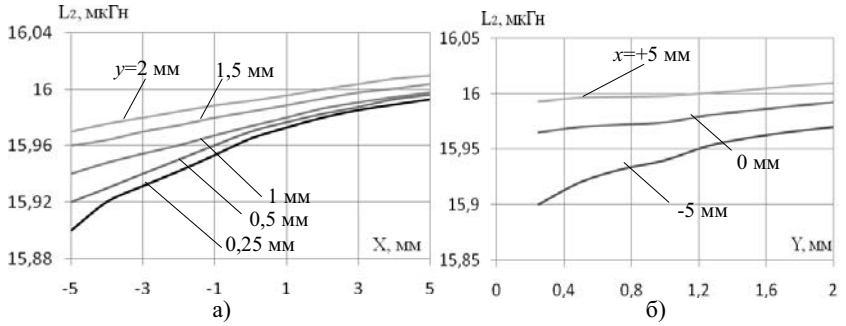



Рисунок 5 – Семейства ГХ макета М2 в установочном отверстии с центром $O_2$: $L_2(x)$ при $y$=const (а), $L_2(y)$ при $x$=const (б)

ний ГХ наблюдается существенная разница в полезных изменениях индуктивности при одних и тех же изменениях координат $x$ и $y$. Они в разы больше, если макет М2 находится в установочном отверстии с центром в точке $O_1$(Рисунок 4).

Аналогичные эксперименты, связанные с получением семейств ГХ, были проведены с макетом М3 (СТ на БС). Результаты экспериментов приведены на рисунках 6, 7, из которых следует, что характер изменений индуктивностей практически не отличается от ГХ макета М2 (СТ на ФС). Необходимо отметить, что характер изменений семейств ГХ и макета М1 (СТ на ФС), выполненного из нержавеющей стали, также сохраняет идентичность с семействами ГХ макетов М2 и М3.

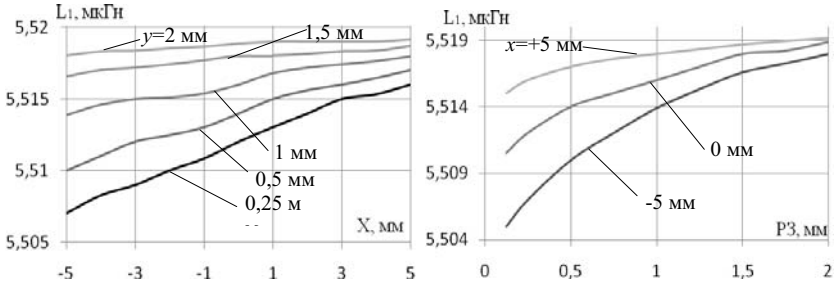



Рисунок 6 – Семейства ГХ макета М3 в установочном отверстии с центром О1: L1(x) при y=const (а), L1(y) при x=const (б)

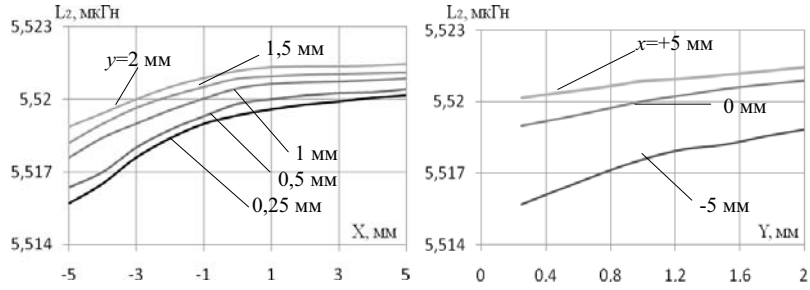



Рисунок 7 – Семейства ГХ макета М3 в установочном отверстии с центром $O_2$: $L_2(x)$ при $y$=const (а), $L_2(y)$ при $x$=const (б)

Вместе с тем, анализ ГХ выявил существенные отличия в чувствительности исследуемых конструкций к координатам $y$ и $x$. Результаты анализа приведены в Таблице 2. При этом оценка чувствительности проводилась при размещении выбранного макета датчика в установочное отверстие с центром $O_2$ (рисунок 2) и в исходном положении лопатки (ее профиль тонирован, координата $x$=-5 мм). Чувствительность определялась как относительное изменение индуктивности ОВТД, выраженное в процентах, к изменению координат смещения, выраженному в мм:

$$S_y = \frac{\left(\frac{\Delta L}{L_\infty}\cdot 100\%\right)}{\Delta y}, \quad S_x = \frac{\left(\frac{\Delta L}{L_\infty}\cdot 100\%\right)}{\Delta x},$$

где $L_\infty$ – индуктивность первичной обмотки СТ при «бесконечно большом» отдалении ЧЭ от объекта.

Из Таблицы 2 следует, что чувствительность $S_y$ почти на порядок превышает $S_x$ для всех разновидностей макетов ОВТД.

Таблица 2 – Чувствительность макетов ОВТД

| Макет ОВТД | Чувствительность, %/мм | |
|---|---|---|
| | $S_y$ (к РЗ) | $S_x$ (к ОС) |
| М1 | 0,185 | 0,018 |
| М2 | 0,248 | 0,025 |
| М3 | 0,036 | 0,004 |

В то же время наиболее важным (хотя и ожидаемым результатом) представляется снижение почти в 6-7 раз чувствительностей $S_y$ и $S_x$ макета М3 в сравнении с макетом М2.

Чувствительность макета М1 (выполненного из жаропрочной нержавеющей стали) также меньше чувствительности М2, но всего лишь в 1,5 раза. Можно прогнозировать аналогичное снижение чувствительности гипотетического ОВТД, также выполненного из жаропрочной нержавеющей стали с СТ на БС по сравнению с чувствительностью макета М3[1].

Если учесть, что в большинстве существующих ОВТД используются ФС с магнитной проницаемостью порядка 700, что обеспечивает чувствительность $S_y$ порядка 1,5÷2,5%/мм$^2$, то необходима серьезная доработка преобразователей индуктивностей ОВТД, аналогичных макетам М1, М2 и, тем более, М3.

**Заключение**

Разработаны новые конструктивные разновидности ОВТД, предназначенные для применения в турбинах, способные функционировать в условиях повышенной температуры вне статорной оболочки турбины, что обеспечивается применением ФС с повышенной точкой Кюри, либо БС, выполненными из высокотемпературной керамики.

Получены семейства ГХ для макетных образцов разработанных конструкций и показано значительное снижение чувствительности (особенно на макетах с СТ на БС), что вызывает необходимость серьезной доработки преобразователей изменений индуктивностей таких конструкций.

**Список литературы**


[1] Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Секисова Ю.Н., Скобелева О.П. – Самара, Самарский НЦ РАН ,2001. – 188с.

[2] Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях/ под общ. ред. О.П. Скобелева – М.: Машиностроение, 2011.-298с.

[3] Л.Б. Беленький, М.М. Кутейникова, Б.К. Райков и др. Методы измерения радиальных и осевых смещений лопаток с уменьшением влияния некоторых мешающих факторов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIII Международной конференции. Самара: Самарский НЦ РАН, 2011, с.294-299.


[1] Если бы чувствительность оценивалась для макетов ОВТД в установочном отверстии с центром $O_1$ и в конечном положении лопатки (ее профиль – пунктирная линия, координата x=+5 мм), то приведенные в Таблице 2 значения чувствительностей были бы больше.

[2] Эти данные соответствуют размещению ЧЭ ОВТД параллельно торцу лопатки, что обычно используется при измерении радиальных зазоров( РЗ) в компрессорах.

# ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЦЕПЬ С ОДНОВИТКОВЫМИ ВИХРЕТОКОВЫМИ ДАТЧИКАМИ И ПРИБЛИЖЕННЫМ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕМ

**Л.Б. Беленький, О.П. Скобелев**

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
belenki@iccs.ru
тел: +7 (846) 333-26-77, факс: +7 (846) 333-27-70

***Ключевые слова:*** *измерительная цепь, одновитковый вихретоковый датчик, преобразователь ток – напряжение, масштабирующий усилитель, накопление и рассеяние энергии, оценки быстродействия*

**Abstract**
Measuring circuit with active and compensation eddy current single coil sensors is studied. This circuit involves power supply with square wave signal, converters current – voltage and amplifier. By means modeling energy's accumulation and leakage quick-action of measuring circuit is analyzed.

## Введение

В работе [1] была предложена дифференциальная измерительная цепь (ИЦ) с рабочим и компенсационным одновитковыми вихретоковыми датчиками (ОВТД), построенная на основе известного метода первой производной [2, 3] и названная "электронным аналогом моста Блумлейна". ИЦ содержит источник импульсного питания, два преобразователя "ток - напряжение" (ПТН) на операционных усилителях (ОУ) и ОУ в режиме дифференцирования (ДН), максимальное напряжение на выходе которого (согласно методу первой производной) соответствует изменениям индуктивности рабочего ОВТД и фиксируется в запоминающем устройстве (ЗУ). Предполагается, что напряжение ЗУ преобразуется далее в цифровой код внешним по отношению к ИЦ аналого-цифровым преобразователем (АЦП).

Вычислительные эксперименты, проведенные с упрощенной моделью ИЦ, в которой учитывались только RLC-параметры ОВТД, частота единичного усиления ОУ, применяемых в ПТН и ДН, а также параметры ДН, показали, что искомое максимальное значение производной на выходе ДН удается достичь через 50·10-9 с при использовании самого современного ОУ (частота единичного усиления f0 = 1500 МГц). Более того, гипотетический ОУ, у которого f0 принималась на порядок выше и составляла 15000 МГц, обеспечивал время достижения максимума производной на выходе ДН только через 20·10-9 с.

Между тем, постоянная времени ОВТД составляет около 50·10-6 с, т.е. указанные времена достижения искомых максимумов на три порядка меньше постоянной времени и можно утверждать, что токи в обоих датчиках в это время изменяются по линейному закону.

Это означает, что на коротком интервале времени $\Delta t$ (в начале переходного процесса в ИЦ после подачи прямоугольного импульса питания) можно использовать приращение тока $\Delta i$ для получения информации об изменениях индуктивности рабочего ОВТД.

Представляется очевидным, что такая операция приближенного дифференцирования в начале переходного процесса ($\Delta i/\Delta t$) не противоречит методу первой производной [2, 3], а его реализация в дифференциальной ИЦ сводится к замене ДН масштабирующим усилителем (МУс) с фиксацией линейно нарастающего напряжения на его выходе в строго определенный момент времени (например, в момент окончания импульса питания).

Можно предположить, что подобная модернизация ИЦ позволит уменьшить длительность получения информативного сигнала, а также длительность рассеяния энергии, накопленной за время Δt.

В статье приводится модернизированная структурная схема с описанием ее функционирования, а также результаты моделирования эквивалентной схемы ИЦ без учета и с учетом линии связи (ЛС).

## 1 Структурная схема ИЦ

Предлагаемая структурная схема изображена на рисунке 1. Она содержит два ОВТД (рабочий и компенсационный), каждый из которых представлен чувствительным элементом (ЧЭ) и согласующим трансформатором (СТ). Через ЛС[1] с помощью бесконтактного ключа К подается питание от источника постоянного напряжения Е (с внутренним сопротивлением $r_0$). Через резистор с сопротивлением $R_{РС}$ происходит рассеяние энергии после преобразования параметров ОВТД в процессе накопления энергии (в замкнутом состоянии ключа К). При этом в ПТН происходит преобразование входных токов $i_1(t)$, $i_2(t)$ в соответствующие выходные напряжения $u_1(t)$, $u_2(t)$.

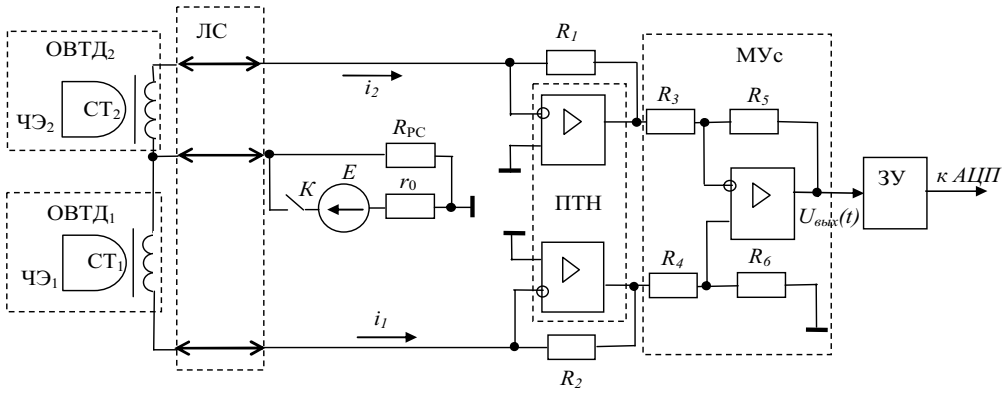



Рисунок 1 – Структурная схема с МУс

Одной из отличительных особенностей схемы на рисунке 1 от схемы, рассмотренной в работе [1], как отмечалось во Введении, является замена ДН на МУс, входы которого непосредственно подключены к выходам ПТН. При этом предполагается использование кратковременного питания ИЦ (Δt), когда в начальной части переходного процесса изменения во времени токов i1(t) и i2(t), а также напряжений на выходах ПТН - u1(t) и u2(t) практически линейны. Это означает, что при достаточно коротких импульсах питания (Δt) изменение линейно нарастающего напряжения на выходе МУс (Δu = u1(t) - u2(t)) будет соответствовать приближенному значению производной (Δu/Δt).

При этом на эпюрах 1 – 4 рисунка 2 предполагается, что длительность импульса питания минимизирована, строго фиксирована (Δt) и напряжение на выходе МУс имеет линейно нарастающий характер. Его максимум соответствует окончанию интервала времени Δ*t*, а в структуре ИЦ предусмотрено ЗУ, фиксирующее указанный максимум, который преобразуется затем в цифровой код.

[1] В работе [1] предполагалось, что ЛС отсутствует.

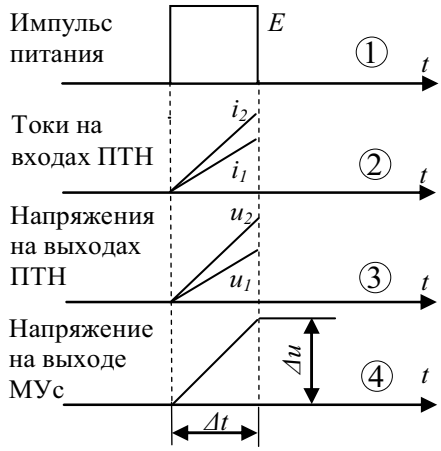



Рисунок 2 – Эпюры токов и напряжений ИЦ

## 2 Результаты исследования ИЦ

Моделирование осуществляется для эквивалентной схемы согласно рисунку 3. Здесь рабочий и компенсационный ОВТД представлены эквивалентными RLC-параметрами ($R_Р$, $L_Р$, $C_р$ – рабочий, $R_К$, $L_К$, $C_К$ – компенсационный), а ЛС – Г-образными схемами замещения с сосредоточенными параметрами ($R_Л$, $L_Л$, $C_Л$). Параметры ключа приняты идеальными.

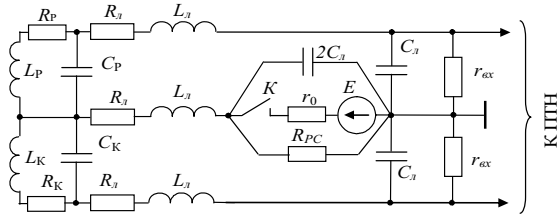



Рисунок 3 – Эквивалентная схема ИЦ

Моделирование ведется в среде Mathcad путем представления каждого полумоста в виде двусторонне нагруженного четырехполюсника, описываемого системой А-параметров, нагрузками которого являются на входе – источник питания ($E$, $r_0$), на выходе – входное сопротивление ПТН $r_{вх}$, вычисляемое как $r_{вх} = \dfrac{R_{1(2)}}{K+1}$, где $R_{1(2)}$ – сопротивление обратной связи ПТН, $K$ – коэффициент усиления ОУ ПТН с разомкнутой цепью обратной связи. Инерционные свойства ПТН и МУс учитываются путем их представления апериодическими звеньями первого порядка с постоянной времени $T = \dfrac{1}{2\pi f_0}$, где $f_0$ – частота единичного усиления ОУ [4].

Моделирование ведется в два этапа, причем на первом ЛС не учитывается[2].

[2] В процессе моделирования использовались следующие значения: индуктивность рабочего датчика $L_Р = 5.362 \cdot 10^{-6}$ Гн, индуктивность компенсационного датчика $L_К = 5.5 \cdot 10^{-6}$ Гн, что соответствует значению δL = 2.5%, эквивалентные емкости $C_Р = C_К = 10 \cdot 10^{-12}$ Ф, сопротивления обмоток $R_Р = R_К = 0.1$ Ом, сопротивления обратной связи ПТН $R_1 = R_2 =$

Ниже представлены результаты моделирования. На рисунке 4 можно видеть входной ток и выходное напряжение ПТН, а также более детально их начальные участки, что позволяет наблюдать обусловленную инерционностью ОУ задержку момента начала нарастания напряжения на выходе ПТН по сравнению с входным током. Для применяемого в ИЦ ОУ эта задержка не превышает $1 \cdot 10^{-9}$ с.

На рисунке 5 представлен результат моделирования выходного напряжения МУс для $\Delta t = 20 \cdot 10^{-9}$ с. Из графика видно, что этому времени соответствует напряжение 2 В, удобное для дальнейшего преобразования. Кроме того, из графика видно, что длительность рассеяния энергии до уровня $0.01 \cdot U_m$ приблизительно равно $80 \cdot 10^{-9}$ с. Это означает, что возможная частота повторения измерений составляет около 10 МГц, что в полтора раза выше результата, полученного в работе [1].

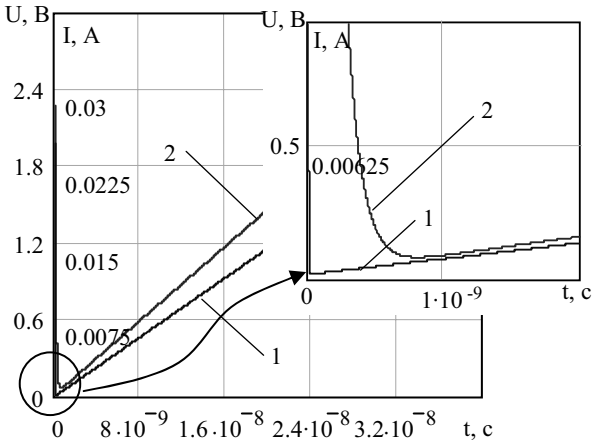



Рисунок 4 – Входной ток (1) и выходное напряжение (2) ПТН

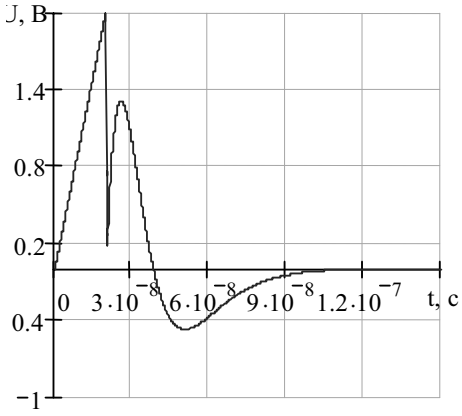



Рисунок 5 – Выходное напряжение МУс

На втором этапе учтены параметры короткой (0.05 м) ЛС[3]. На рисунке 6 представлены результаты моделирования входного тока и выходного напряжения ПТН, а на рисунке 7 – разностное напряжение ПТН и выходное напряжение МУс в режиме накопления энергии ИЦ. Инерционные свойства ОУ достаточны для сглаживания высокочастотных колебаний, вызванных ЛС, в сигнале ПТН. Потери в ЛС незначительны, и для восстановления прежнего уровня выходного напряжения МУс необходимо увеличить соотношение сопротивлений резисторов $R_5/R_3$ и $R_6/R_4$ менее чем на 2%.

---

100 Ом, напряжение и внутреннее сопротивление источника питания E = 4 В, $r_0$ = 0.1 Ом, сопротивление рассеивания $R_{PC}$ = 360 Ом. ПТН и МУс реализованы на ОУ ADA4930, у которого K = 1600, $f_0$ = 1400 МГц [5]. Сопротивления МУс удовлетворяет условию $R_3 = R_4$, $R_5 = R_6$, $R_5/R_3 = R_6/R_4$ и выбираются такими, чтобы обеспечить диапазон входных напряжений АЦП на выходе ЗУ равным 2 В.

[3] Параметры линии связи: $R_Л$ = 0.005 Ом, $L_Л = 0.005 \cdot 10^{-6}$ Гн, $C_Л = 10 \cdot 10^{-12}$ Ф.

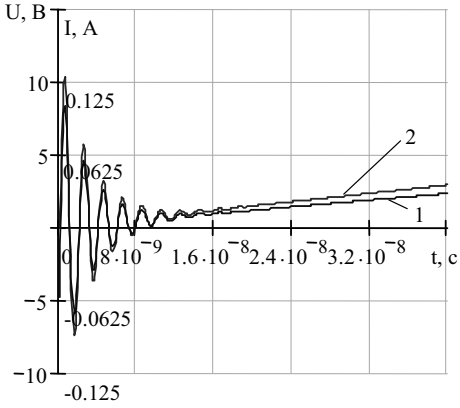



Рисунок 6 – Входной ток (1) и выходное напряжение (2) ПТН

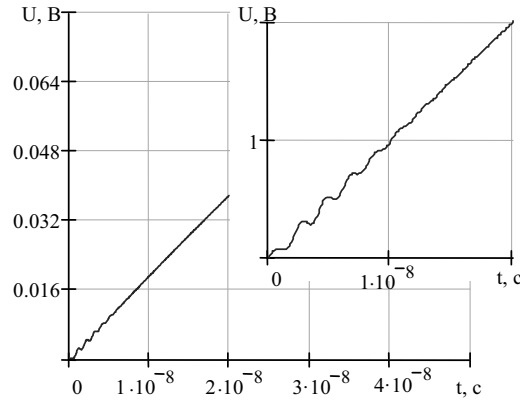



Рисунок 7 – Разностное напряжение ПТН и выходное напряжение МУс в режиме накопления энергии

**Заключение**

Приведено описание модернизированной структурной схемы ИЦ, в которой ДН заменен на МУс. С помощью моделирования показано, что получение информационного сигнала возможно через 20·10-9 с после начала переходного процесса в ИЦ как при отсутствии, так и при наличии ЛС.

**Список литературы**

[1] Беленький Л.Б., Скобелев О.П. Электронный аналог измерительной цепи в виде моста Блумлейна с одновитковыми вихретоковыми датчиками// Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIII международной конференции (15 – 17 июня 2011 г., Самара, Россия). – Самара: Самарский НЦ РАН, 2011. – С. 300 – 304.

[2] Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Секисова Ю.Н., Скобелева О.П. – Самара: Самарский НЦ РАН, 2001. - 188 с.

[3] Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / Под ред. Скобелева О.П. – Москва: Машиностроение, 2011. – 298 с.

[4] Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.

[5] Ultralow noise drivers for low voltage ADCs ADA4930-1/ADA4930-2 [Электронный ресурс]//Analog Devices – Режим доступа: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADA4930-1/4930-2.pdf - Яз. англ.

# СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ УСКОРЕНИЙ ЛОПАТОЧНОГО КОЛЕСА КОМПРЕССОРА И ТУРБИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОВИТКОВОГО ВИХРЕТОКОВОГО ДАТЧИКА И МИКРОКОНТРОЛЛЕРА[1]

**В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик**

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
borovik@iccs.ru
тел: +7 (846) 333-26-77, факс: +7 (846) 333-27-70

***Ключевые слова:*** *динамическая погрешность, коррекция погрешности, одновитковый вихретоковый датчик, частота вращения, угловое ускорение, система измерения, функционирование системы*

**Abstract**

The structure and operation of the system for measuring of angular accelerations of a compressor or turbine vane wheel of a gas-turbine engine are considered. The system intended to use a single-coil eddy-current sensors and it can be used as a part of the system for blade tips displacements measuring specially for minimization of dynamic error, related to the variation of vane wheel rotary speed.

## 1 Введение

Известны системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в компрессорах или турбинах газотурбинных двигателей (ГТД), которые построены на основе методов, предусматривающих использование сосредоточенных или распределенных на статоре кластеров одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) [1, 2]. Методы предполагают предварительное измерение периода вращения лопаточного колеса. По полученному результату и известному числу лопаток вычисляются моменты времени, когда подаются импульсы питания измерительной цепи, реализующей метод первой производной [3]. При этом последовательность импульсов синхронизируется с «меткой» на валу лопаточного колеса. Обычно измерение периода и синхронизация осуществляются с помощью датчика частоты вращения промышленного изготовления и простейшего АЦП «период – код». Тот же датчик обеспечивает и необходимую синхронизацию последовательности импульсов питания измерительной цепи, гарантирующую получение искомой измерительной информации точно в моменты прохождения замками лопаток геометрического центра (г.ц.) сосредоточенного кластера или г.ц. и виртуального г.ц. в распределенном кластере ОВТД [4-6].

Очевидно, что реализация методов требует постоянства скорости вращения лопаточного колеса, которого можно достичь только на стационарных режимах работы ГТД. Нестационарные режимы работы двигателя (режимы дросселирования, приемистости, сброса газа и т.д.) приводят к изменениям во времени скорости а, следовательно, и периода вращения лопаточного колеса. Это означает, что импульсы питания измерительной цепи, частота которых рассчитывается по результатам измерения периода вращения лопаточного колеса на первом обороте, будут опережать или отставать от моментов прохождения замками лопаток г.ц. или виртуального г.ц. кластеров ОВТД, а это, в свою очередь, вызывает появление динамической составляющей методических погрешностей, которая в ряде случаев может достигать уровня 10% и более [7].

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №11-08-01032а).

Уменьшить влияние указанной погрешности представляется возможным путем экстраполяции скорости вращения лопаточного колеса на основе информации о его мгновенных угловых ускорениях. Для этого предлагается использовать систему измерения ускорений, построенную на основе ОВТД и технических средств аналогичных тем, что применялись в системе измерения скорости вращения ротора ГТД, известной по работе [8]. В статье приводится описание структуры системы, а также рассматриваются особенности ее функционирования.

## 2 Структура технических средств

На рисунке 1 представлена структура технических средств системы измерения угловых ускорений лопаточного колеса компрессора и турбины ГТД. Система содержит два идентичных канала измерения частоты вращения ротора и синхронизации в состав которых входят ОВТД (ОВТД$_1$, ОВТД$_2$) с индивидуальными преобразователями сигналов (ИП$_1$, ИП$_2$) и формирователями импульсов ($\Phi_1$, $\Phi_2$).

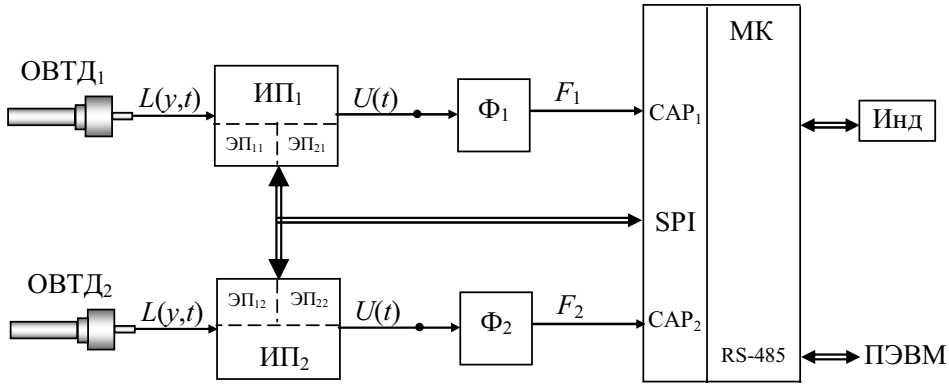



Рисунок 1 – Структура технических средств системы измерения угловых ускорений лопаточного колеса

Для измерения угловых ускорений ОВТД$_1$ размещается над лопаточным колесом контролируемой ступени компрессора или турбины ГТД таким образом, чтобы чувствительный элемент (ЧЭ) датчика взаимодействовал с торцами рабочих лопаток ротора [8]. Информационный параметр датчика – индуктивность зависит от зазора между торцами лопаток и статором ступени ГТД (ЧЭ ОВТД), а также углового положения торца лопатки по отношению к ЧЭ датчика, которое однозначно связано с угловым перемещением лопаточного колеса.

Используемый для привязки к начальному положению вала и синхронизации ОВТД$_2$ размещается вблизи вала ротора на котором закреплена одиночная «метка» начала оборота. Индуктивность ОВТД$_2$ будет зависит от углового положения «метки» и принимает минимальное значение в момент ее прохождения под ЧЭ датчика.

Преобразование изменений индуктивностей ОВТД$_1$ и ОВТД$_2$ в напряжения $U(t)$ осуществляется в ИП$_1$ и ИП$_2$. Максимум выходного напряжения ИП соответствует моментам прохождения торцами лопаток («метки») ЧЭ датчиков. В моменты, когда торцы лопаток («метка») находятся вне зоны чувствительности ОВТД, уровень выходного сигнала ИП минимальный. Поддержание уровней выходных напряжений ИП в заданных диапазонах изменений осуществляется с помощью операционных усилителей с электронными потенциометрами ЭП$_{11}$, ЭП$_{21}$, ЭП$_{12}$, ЭП$_{22}$.

Цифровая обработка сигналов измерительных каналов системы осуществляется в микроконтроллере (МК) семейства STM32, периферия которого содержит 16-ти разрядные таймерные модули с опциями «захват» и «сравнение», последовательные интерфейсы SPI и RS-485.

Система единого времени реализована на «свободно бегущем» таймере, имеющем регистры «захвата» $CAP_1$, $CAP_2$ и опцию прерывания при возникновении данных событий. Микроконтроллер используется и для управления подключенными через интерфейс SPI ЭП, входящими в состав ИП.

Передача данных о скоростях вращения и угловых ускорениях лопаточного колеса в ПЭВМ осуществляется по каналу RS-485. Кроме того, в системе предусмотрен вывод измерительной информации на четырехстрочный жидкокристаллический индикатор (Инд).

## 3 Функционирование системы

Временные диаграммы, поясняющие функционирования системы измерения угловых ускорений лопаточного колеса, представлены на рисунке 2.

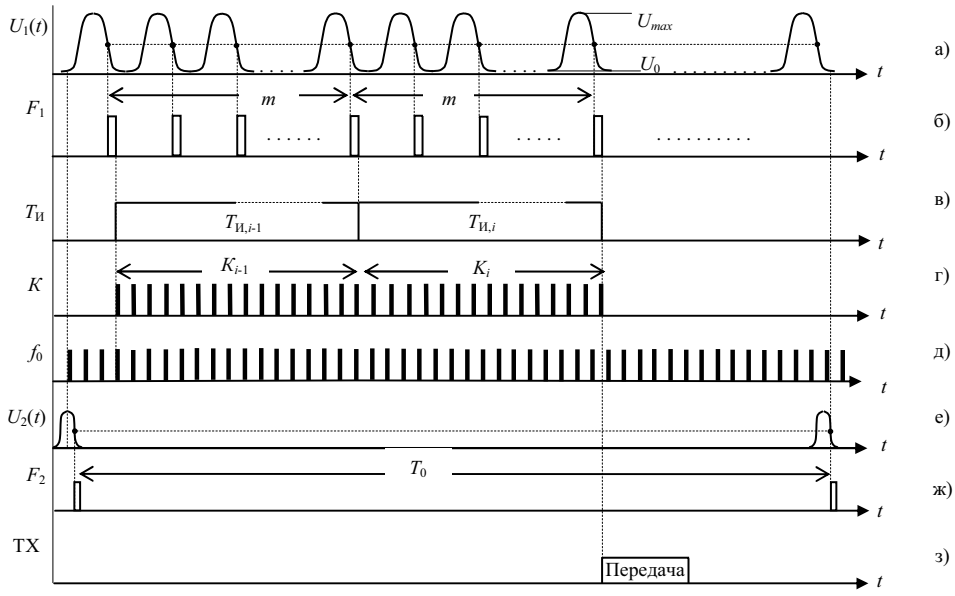



Рисунок 2 – Временные диаграммы функционирования системы

Прохождение торцами лопаток в процессе вращения ротора зоны чувствительности $ОВТД_1$ сопровождается формированием напряжения $U_1(t)$ на выходе $ИП_1$ представляющего собой последовательность импульсов колоколообразной формы (рисунок 2, а). При этом максимумы выходного сигнала $U_{max}$ соответствуют прохождению торцами лопаток ЧЭ датчика, а наименьший уровень выходного напряжения $U_0$ – нахождению торцов лопаток вне зоны чувствительности $ОВТД_1$. Формирователь ($Ф_1$) на каждый колоколообразный импульс $U_{1,n}(t)$ вырабатывает одиночный прямоугольный импульс $F_{1,n}$, передний фронт которого соответствует моменту достижения задним фронтом $U_{1,n}(t)$ значения, равного $0.5U_{max}$ (рисунок 2, б)[2].

Для вычисления текущего углового ускорения ($a_i$) осуществляется непрерывное измерение угловых скоростей вращения лопаточного колеса ($\omega_{i-1}$ и $\omega_i$) на примыкающих измеритель-

[2] Сигнал $U_{1,n}(t)$ в области $0.5U_{max}$ имеет наибольшую крутизну, что повышает точность временной (а, как следствие, и угловой) привязки переднего фронта импульса $F_{1,n}$. Кроме того, угловое положение точки $0.5U_{max}$ на сигнале $U_{1,n}(t)$ не зависит от изменений частоты вращения лопаточного колеса и зазоров между ЧЭ и торцом $n$-ой лопатки.

ных интервалах $T_{И,i-1} = T_{И,i} \le T_0$, где $T_0$ – период вращения лопаточного колеса (рисунок 2, в) способом, аналогичным приведенному в [8]. При этом величина измерительных интервалов ($T_{И,i-1}$, $T_{И,i}$) определяется по прохождению заданного числа ($m$=*const*) лопаток ЧЭ ОВТД$_1$ (импульсов $F_{1,i}$, $F_{1,i+1}$, …, $F_{1,i+m}$).

В течение $T_{И,i}$ в счетчиках фиксируется $m$ импульсов $F_1$ и число импульсов $K_i$ опорной частоты $f_0$ за временной интервал, равный суммарной длительности $m$ интервалов (рисунок 2, г, д). Тогда, с учетом $n_л$ лопаток, угловая скорость вращения лопаточного колеса на $i$-том измерительном интервале равна:

$$(1) \quad \omega_i = \frac{2\pi(m-1)}{K_i \cdot n_л} \cdot f_0 ,$$

а угловое ускорение, соответственно:

$$(2) \quad a_i = \frac{\omega_i - \omega_{i-1}}{K_i} \cdot f_0 .$$

Следует отметить, что вычисления угловых скоростей и ускорений лопаточного колеса могут осуществляться как на уровне МК, так и в ПЭВМ, входящей в состав системы измерения. В последнем случае, учитывая, что все параметры в выражениях (1, 2) за исключением $K_i$ являются константами, для сокращения времени передачи данных по последовательному каналу RS-485 достаточно передавать в начале каждого оборота величину $K_0$ (результат первого измерения частоты), а затем, периодически, величины приращений $\Delta K_i = K_i - K_{i-1}$ для последующих смежных интервалов измерения (рисунок 2, з). При этом объем передаваемой в реальном времени информации сокращается до 2-х байт, а все вычислительные операции выполняются на уровне ПЭВМ.

Функционирование канала синхронизации с датчиком ОВТД$_2$ осуществляется аналогичным образом. Прохождение «меткой» на валу ротора зоны чувствительности ОВТД$_2$ сопровождается формированием напряжения $U_2(t)$ на выходе ИП$_2$ (рисунок 2, е), которое после формирователя Ф$_2$ преобразуется в прямоугольные импульсы $F_2$, являющиеся сигналами кадровой синхронизации (рисунок 2, ж).

## 4 Заключение

Предложена структура технических средств и рассмотрено функционирование системы измерения на основе применения ОВТД, обеспечивающей измерение как частоты (угловой скорости), так и угловых ускорений лопаточного колеса компрессора или турбины ГТД. Система содержит дополнительно измерительный канал, предназначенный для формирование одного кадрового синхроимпульса на период вращения лопаточного колеса.

Разработанные технические и программные средства могут быть применены в составе систем измерения многомерных перемещений торцов лопаток ГТД, в том числе и для уменьшения влияния динамической составляющей методической погрешности, связанной с изменением скорости вращения лопаточного колеса. Кроме того, наличие автономного канала измерения угловой скорости вращения лопаточного колеса позволяет повысить быстродействие упомянутых систем измерения многомерных перемещений торцов лопаток ГТД.

## Список литературы

[1] Белослудцев В.А., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К, Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Тулупова В.В. Экспериментальная проверка работоспособности кластерных методов измерения координат смещения торцов лопаток и деформаций статора в лабораторных условиях // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XII Международной конференции. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН. –2010. – С. 316-322.

[2] Боровик С.Ю. Система измерения смещений торцов лопаток с распределенным кластером одновитковых вихретоковых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. -2011. -№4. – С. 36-41.
[3] 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.
[4] Беленький Л.Б., Боровик С.Ю., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Тулупова В.В. Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков. Часть 1. Обоснование предлагаемых методов и их описание // Мехатроника, автоматизация, управление. -2009. -№4. – С.16-19.
[5] Беленький Л.Б., Боровик С.Ю., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Тулупова В.В. Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков. Часть 2. Реализуемость методов // Мехатроника, автоматизация, управление. -2009. -№5. – С.21-30.
[6] Беленький Л.Б., Боровик С.Ю., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Тулупова В.В. Уменьшение длительности получения информации о смещениях торцов лопаток // Мехатроника, автоматизация, управление. -2010. -№5. – С.53-59.
[7] Боровик С.Ю., Скобелев О.П. Методические погрешности систем измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток // Мехатроника, автоматизация, управление. -2012 (в печати).
[8] Белопухов В.Н., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Система измерения скорости вращения ротора ГТД на основе одновитковых вихретоковых датчиков // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XIII Международной конференции. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН. –2011. - С. 311-315.

# ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА ИНЕРЦИАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

**В.Ю. Ольшанский[1], А.В. Серебряков[2], И.Ф. Паршина[1]**

[1]Институт проблем точной механики и управления РАН
410028, Саратов, Рабочая, 24, Россия
iptmuran@san.ru
тел. +7 (8452) 22-23-40, факс +7 (8452) 22-23-40

[2]ЭТИ (филиал) СГТУ
413100, Энгельс, Площадь Свободы, 17, Россия
bmm@techn.sstu.ru
тел. +7 (8453) 95-35-53, факс +7 (8453) 95-35-53

***Ключевые слова:*** *сила Кориолиса, угловая скорость, упругие колебания, пьезоэффект, электроупругость*

**Abstract**

The present work deals with the interaction of MEMS structures and a sensor element in inertial data device. The device operation is based on the piezoeffect and allows to measure one component of the angular velocity for the controlled object. The solution to the problem is presented taking into account the distribution of the elastic waves in sensor element.

## Введение

Данная работа посвящена исследованию характеристик датчика инерциальной информации. Устройство предназначено для измерения одного из компонент угловой скорости вращения контролируемого объекта. Принципиальная схема датчика обсуждалась в работах [1-4]. Там же приведены результаты расчетов для случая, когда чувствительный элемент датчика рассматривается как абсолютно твердое тело. В настоящей работе рассматривается случай, когда колебания микроэлектромеханических (МЭМС) структур, взаимодействующих с чувствительным элементом, вызывают в нем упругие деформации.

## 1 Объект исследования

Рассматривается датчик инерциальной информации. Устройство предназначено для измерения одного из компонент угловой скорости вращения контролируемого объекта. Конструкция датчика включает в себя микроэлектромеханические (МЭМС) структуры в виде двух взаимно перпендикулярных пьезокерамических пластин $П_1$ и $П_2$, а также чувствительный элемент (ЧЭ) в форме упругого куба массой $M$ с ребром $l$. Пластины имеют равные толщины $h_1=h_2=h$. У каждой пластины одно из оснований закреплено, а другое находится в контакте с чувствительным элементом. Контакт реализован так, что на пластины передаются только нормальные механические усилия. На пластину $П_1$ подаётся переменный ток. Вследствие этого в ней за счет обратного пьезоэффекта возбуждаются упругие волны, которые вызывают колебания чувствительного элемента. При наличии угловой скорости переносного вращения чувствительный элемент как присоединенная масса воздействует на пластину $П_2$. За счет прямого пьезоэффекта в этой пластине генерируется электрический ток. Характеристики тока зависят от величины угловой скорости. Учитывается, что выбор материала для изготовления чувствительного элемента определяет его податливость, которая в свою очередь влияет на распространение в чувствительном элементе упругих волн и тем самым – на положение его центра

масс. С учетом названных факторов требуется рассчитать амплитудно-частотные характеристики датчика.

## 2 Математическая модель

В качестве математической модели рассматривается связанная линейная динамическая задача электроупругости для системы упругих тел. Микроэлектромеханические (МЭМС) структуры рассматриваются как пластины, у которых по толщине распространяются упругие волны, связанные с электрическим полем за счет явления пьезоэффекта. Рассматривается режим установившихся колебаний, так как период колебаний пластин мал и за один период угловая скорость $\Omega$ изменяется незначительно. Учитывается наличие вязкого трения. Выбрав систему координат с осями, нормальными к основаниям пластин, представим упругие перемещения функциями $u_k(x_k,t)$ и электрические потенциалы – функциями $\psi_k(x_k,t)$, где $k$=1, 2.

После перехода к безразмерной форму уравнения механических колебаний можно представить в виде

$$(1)\quad \frac{\partial^2 u_k}{\partial t^2} + 2\alpha \frac{\partial u_k}{\partial t} = \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_k^2}, \quad k = 1,2 .$$

Для электрических потенциалов используются уравнения вынужденной электростатики [5] в виде

$$(2)\quad \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial x_k^2} = \frac{k_{33}^2}{1-k_{33}^2} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_k^2}, \quad k = 1,2 .$$

В формулы (2) входит продольный статический коэффициент электромеханической связи $k_{33}^2$. Уравнения (2) рассматриваются при граничных условиях для электрических потенциалов. Эти условия имеют вид

$$(3)\quad \psi_1(0,t) = -U(t)/2 ,\ \psi_1(h_1,t) = U(t)/2 ,\ \psi_2(0,t) = 0 ,\ \psi_2(h_2,t) = 0 .$$

В формулы (3) входит напряжение $U(t)$, приложенное к пластине $\Pi_1$.

Уравнения механических колебаний (1) также следует рассматривать при определенных граничных условиях. Условия вида

$$(4)\quad u_k(0,t) = 0, \quad k = 1,2$$

учитывают закрепление МЭМС структур в корпусе датчика. Следует также сформулировать граничные условия на поверхности контакта с чувствительным элементом. Эти условия можно получить из выполнения равенств

$$(5)\ (5)\quad \sigma(h_k,t)A = -M \frac{\partial^2 u_{Ck}(t)}{\partial t^2} + F_k^c, \qquad k = 1,2 .$$

В формулах (5) через $\sigma(h_k,t)$ обозначены нормальные напряжения на поверхности контакта МЭМС структуры и чувствительного элемента, $A$ – площадь этой поверхности. Правая часть формул (5) содержит силы инерции, которые определяют воздействие со стороны чувствительного элемента на МЭМС структуры. Силы инерции выражены через ускорение центра масс $C$ чувствительного элемента. Дополнительные слагаемые, кориолисовы силы $F^c_k$, представлены выражениями

$$(6)\quad F_1^c = 2M\Omega_3 \frac{\partial u_{C2}(t)}{\partial t}, \quad F_2^c = -2M\Omega_3 \frac{\partial u_{C1}(t)}{\partial t} .$$

Формулы (6) содержат величину измеряемого компонента $\Omega_3$ угловой скорости, а также проекции скорости центра масс ЧЭ. а также известные соотношения в рамках линейной тео-

рии пьезоэффекта между механическими напряжениями, деформациями и напряженностью электрического поля $E$ устанавливается зависимость вида

$$(7)\quad \sigma = \frac{1}{s_{33}}\left(\frac{\partial u}{\partial x} - d_{33}\cdot E\right),$$

где $s_{33}$ – упругая податливость материала. Используя выражения (6) и (7), преобразуем условия (5) к безразмерному виду

$$(8)\quad \begin{aligned} &\frac{\partial u_1(h_1,t)}{\partial x_1} + \frac{\partial \psi_1(h_1,t)}{\partial x_1} = m\left(-\frac{\partial^2 u_{C1}(t)}{\partial t^2} + 2\omega\frac{\partial u_{C2}(t)}{\partial t}\right),\\ &\frac{\partial u_2(h_2,t)}{\partial x_2} + \frac{\partial \psi_2(h_2,t)}{\partial x_2} = m\left(-\frac{\partial^2 u_{C2}(t)}{\partial t^2} - 2\omega\frac{\partial u_{C1}(t)}{\partial t}\right), \end{aligned}$$

куда входят безразмерные комплексы $m=Ms_{33}c^2/Ah$, $\omega=\Omega_3 h/c$.

Движения центра масс $C$ чувствительного элемента получаются в результате осреднения по объему ЧЭ перемещений элементов сплошной среды. Используется приближенная оценка механических колебаний в чувствительном элементе. При этом полагается, что колебания можно разложить на независимые составляющие $v_1(x_1,t)$ и $v_2(x_2,t)$ вдоль осей координат. Тогда

$$(9)\quad \frac{\partial u_{Ck}(t)}{\partial t} = \frac{1}{l}\int_{h_k}^{h_k+l}\frac{\partial v_k(x_k,t)}{\partial t}dx_k,\quad \frac{\partial^2 u_{Ck}(t)}{\partial t^2} = \frac{1}{l}\int_{h_k}^{h_k+l}\frac{\partial^2 v_k(x_k,t)}{\partial t^2}dx_k \quad k=1,2$$

Для перемещений $v_1(x_1,t)$ и $v_2(x_2,t)$ приходим к волновым уравнениям вида

$$(10)\ \frac{\partial^2 v_k}{\partial t^2} + 2\alpha_v\frac{\partial v_k}{\partial t} = a^2\frac{\partial^2 v_k}{\partial x_k^2},\quad k=1,2\,.$$

В формулах (10) величина $a^2$ определяется отношением скоростей упругих волн в пьезокерамических МЭМС и в чувствительном элементе. К уравнениям (10) добавляются условия неразрывного контакта между пьезопластинами и чувствительным элементом

$$(11)\ u_k(h_k,t) = v_k(h_k,t),\quad k=1,2\,,$$

а также условия

$$(12)\,(12)\ \frac{\partial v_k(h_k+l,t)}{\partial x_k} = 0,\quad k=1,2\,.$$

на свободных поверхностях ЧЭ.

### 3 Решение связанной задачи электроупругости и определение характеристик тока

Краевая задача (1)-(4), (8)-(12) решалась для случая, когда внешнее напряжение изменяется по гармоническому закону $U(t)=U_0(t)\mathbf{sin}\beta t$. Развивается подход, представленный ранее в работах [2-4]. При этом перемещения удается выразить в виде

$$(13)\quad \begin{aligned} &u_k(x_k,t) = 2\,\mathbf{Re}\left((A_{k1}\,\mathbf{ch}\,\lambda x_k + A_{k2}\,\mathbf{sh}\,\lambda x_k)\,\mathbf{exp}(i\beta t)\right)\quad k=1,2;\\ &v_k(x_k,t) = 2\,\mathbf{Re}\left((B_{k1}\,\mathbf{ch}\,\mu x_k + B_{k2}\,\mathbf{sh}\,\mu x_k)\,\mathbf{exp}(i\beta t)\right)\quad k=1,2. \end{aligned}$$

В формулы (13) входят волновые числа $\lambda$, $\mu$. Эти величины определяются упругими и вязкими характеристиками пьезокерамики и материала ЧЭ. Комплексные константы $A_{11},\ldots,B_{22}$ определяются из граничных условий. Для дальнейших расчетов представляет интерес выражение

(14) $u_2(x_2,t) = -\frac{U_0}{h}\mathbf{Re}\left(\frac{\Phi(\lambda,\mu)\mathbf{sh}(\lambda x_k)}{\mathbf{mod}(\Phi(\lambda,\mu))}\mathbf{exp}(i\beta t)\right)$,

где Φ(λ,μ) – определенная комплекснозначная функция. Используя (14), получаем далее выражение для потенциала $\psi_2(x_2,t)$ и рассчитываем характеристики тока, который генерируется в пьезопластине $П_2$. Так, силу тока удается представить [4] в виде

(15) $I(t) = \left(A\frac{c}{h}\right)\cdot\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{d_{33}}{s_{33}}\cdot\frac{\partial u_2(h_2,t)}{\partial x_2} - \frac{\varepsilon_{33}}{d_{33}}\cdot\frac{\partial \psi_2(h_2,t)}{\partial x_2}\right)$.

Здесь $d_{33}$ – пьезоэлектрическая постоянная, $\varepsilon_{33}$ – диэлектрическая проницаемость при постоянных деформациях.

## 4 Обсуждение результатов

В рамках представленной модели проведены численные эксперименты и получены амплитудно-частотные характеристики датчика при различных отношениях скорости упругих волн в МЭМС структурах и скорости волн $c_v$ чувствительном элементе. При этом упругие характеристики МЭМС структур взяты для пьезокерамики марки ЦТС-19. Упругие свойства ЧЭ варьировались в диапазоне значений, характерных для соединений на основе кремния. Установлено, что по мере увеличения жесткости ЧЭ расчетные результаты приближаются к полученным ранее [2] для модели с недеформируемым ЧЭ. В качестве иллюстрации на рисунках 1,2 приведены в безразмерной форме зависимости амплитудных значений для выходного тока от частоты $\beta$ вынуждающих электрических колебаний

На рисунке 1 при достаточно близких значениях упругих свойств материалов МЭМС структур и ЧЭ наблюдается несколько пиков амплитуд тока. При этом пиковые значения сопоставимы по величине. Такая картина объясняется тем, что МЭМС структуры и чувствительный элемент работают как одно упругое тело со слабой неоднородностью, в котором распространяются упругие волны.

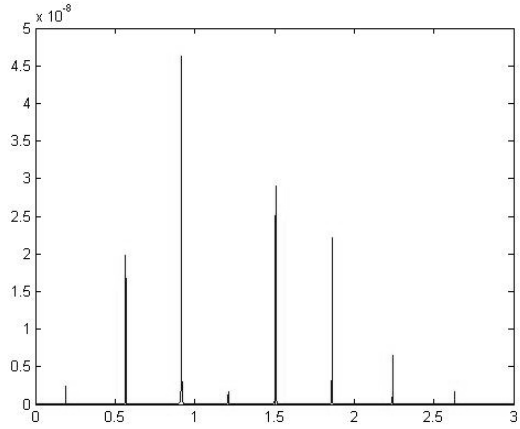



Рисунок 1 – Зависимость амплитуды тока от частоты $\beta$ при $c_v$=1,6·$c$

На рисунке 2 представлен случай, когда материал чувствительного элемента гораздо жестче, чем пьезокерамика для МЭМС. Результат расчетов приближается к полученному ранее в работе [2] для модели с недеформируемым ЧЭ. Выделяется одно пиковое значение, ко-

торое достигается при значении вынуждающей частоты $\beta$, близком к первой собственной частоте колебаний пьезопластины.

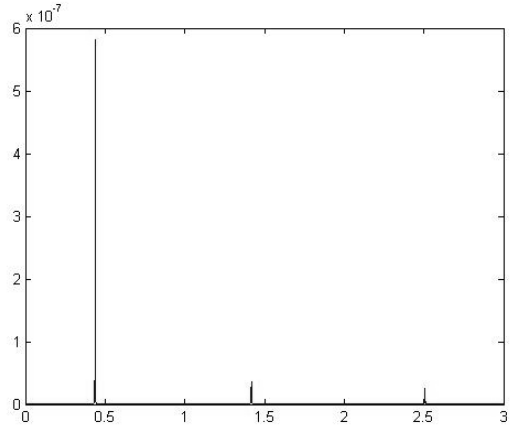



Рисунок 2 – Зависимость амплитуды тока от частоты $\beta$ при $c_v$=6·$c$

По мере увеличения жесткости ЧЭ наблюдается также рост пиковых значений амплитуды.

**Заключение**

Данная работа представляет результаты расчетов характеристик датчика инерциальной информации. Рассмотрен случай, когда колебания микроэлектромеханических структур, взаимодействующих с чувствительным элементом, вызывают в нем упругие деформации. Путем серии численных экспериментов исследовано влияние жесткости чувствительного элемента на характеристики выходного сигнала. Также подтверждено соответствие с результатами, которые получены авторами ранее для предельного случая – абсолютно твердого чувствительного элемента. В качестве рекомендаций при проектировании навигационного оборудования определен диапазон изменения упругих свойств материала для изготовления чувствительного элемента.

**Список литературы**

[1] Об одной модели пьезогироскопа / Ю.Н.Нагар, В.Ю.Ольшанский, В.М.Панкратов, А.В.Серебряков //Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 2. – С. 71–74.

[2] Влияние диссипации на характеристики измерителя угловой скорости на основе взаимного пьезоэффекта / В.М.Панкратов, В.Ю.Ольшанский, Ю.Н.Нагар, А.В.Серебряков //Авиакосмическое приборостроение. – 2010, №8. – С. 3–8.

[3] Об одной модели датчика инерциальной информации / В.Ю.Ольшанский, И.Ф.Абитова, Ю.Н.Нагар, А.В.Серебряков //Вестник Нижегородского университета. – 2011, №4. Часть 2. – С. 260–261.

[4] Ольшанский В.Ю., Серебряков А.В., Абитова И.Ф. О влиянии граничных условий на динамику чувствительного элемента пьезогироскопа //Известия Саратовского университета (Новая серия). Серия Физика. – 2011. – Т.11, Вып.2. – С. 51-54.

[5] Гринченко В.Т. Электроупругость / В.Т.Гринченко, А.Ф.Улитко, Н.А.Шульга. – Киев: Наук.думка, 1989. – 280 с.

# СИНТЕЗ ОБОБЩЕННЫХ СТРУКТУР БЕСКОНТАКТНЫХ ТАХОМЕТРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА РАСТРОВЫХ СИНУСНО-КОСИНУСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

**М.А. Габидулин**

Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики
119454, Москва, пр. Вернадского, 78, Россия
gabidulin_ma@mail.ru
тел: +7 (495) 434-73-74

***Ключевые слова:*** *синтез, обобщенные структуры, бесконтактные тахометры постоянного тока, растровые синусно-косинусные преобразователи перемещений*

**Abstract**

The general laws of construction are revealed and block-modular structures of contactless tachometers of the direct current in accord with circuit technique of photo-electric digitizers of movings on raster sine-cosine converters are synthesized.

## Введение

Повышение эффективности и интенсификация производственных процессов на основе информационных технологий требуют модернизации и разработки, новых более совершенных, мехатронных средств автоматизации, к числу которых, в первую очередь, относятся информационно-силовые модули безредукторных цифровых электроприводов с широким диапазоном регулирования скорости перемещения исполнительных механизмов. В силу ряда преимуществ наибольшее применение при построении таких приводов получили двухконтурные структуры, в которых в качестве датчика главной позиционной обратной связи используются датчики положения, а в качестве датчика обратной связи контура подчиненного регулирования – тахометры.

Для замыкания внешнего контура управления преимущественно используются цифровые преобразователи перемещений, при построении которых применяются различные физические принципы и технические и конструктивные решения. Однако наибольшее распространение получили индуктивные преобразователи на вращающихся трансформаторах, сельсинах, редуктосинах и индуктосинах, а также фотоэлектрические преобразователи на растровых синусно-косинусных преобразователях (СКП) и первичных преобразователях с кодовыми шкалами. Для замыкания внутреннего контура используются частотные и амплитудные тахометры, базирующиеся на тех же физических принципах построения, что и преобразователи перемещений, но различающиеся способом дифференцирования перемещения по времени.

При построении частотных тахометров широкое применение получили накапливающие структуры фотоэлектрических цифровых преобразователей перемещений, как наиболее полно отвечающие растущим требованиям к точности, быстродействию, технологичности, массогабаритным и другим параметрам, но их быстродействие и точность ограничиваются разрешающей способностью, определяемой числом импульсов на оборот, импульсного первичного преобразователя. Это делает технически сложным создание тахометров на низкие и инфранизкие частоты с постоянной времени, измеряемой десятыми долями мс и которая зависит от интервала усреднения скорости.

В отличие от последних тахометры, основанные на непосредственном формировании постоянных напряжений пропорциональных мгновенным значениям производной от перемеще-

ния по времени, не имеют ограничений принципиального характера на расширение диапазона преобразуемых частот вплоть до нулевой частоты. Так, бесконтактные тахометры постоянного тока (БТПТ) на синхронных тахогенераторах характеризуются большой крутизной характеристики, малыми пульсациями, остаточными напряжениями и инерционностью, что позволяет решать задачу создания безредукторных приводов с диапазоном регулирования частоты вращения до $10^4$-$10^5$. Однако вопросы совершенствования БТПТ повышением точности, быстродействия, технологичности при снижении массогабаритных размеров и стоимости попрежнему весьма актуальны, ибо их характеристики существенно зависят от прецизионности технологии изготовления.

В этом отношении представляют интерес БТПТ на основе растровых СКП, которые в отличие от других типов СКП характеризуются большей точностью, технологичностью, меньшими массогабаритными размерами и формируют синусные и косинусные сигналы непосредственно на постоянном токе, что позволяет получить большее быстродействие. Их создание позволит унифицировать информационное обеспечение цифровых электроприводов, базирующееся на использовании чисто фотоэлектрических преобразователей измерительной информации.

Однако в известных источниках [1-3] вопросы построения тахометров постоянного тока с учетом особенностей проектирования и схемотехники фотоэлектрических цифровых преобразователей перемещений на основе растровых СКП детально не рассмотрены, что препятствует их применению.

**Постановка задачи**

Анализ показывает, что операция дифференцирования в тахометрах постоянного тока может быть осуществлена в процессах либо первичного преобразования перемещений электромеханическим способом, что имеет место при применении синхронных тахогенераторов, либо вторичного преобразования электрическим способом при применении электронных дифференциаторов.

Конструктивно синхронные тахогенераторы (СТГ) представляют собой обычные или индукторные электрические машины. Их магнитная система должна обеспечивать синусоидальный закон модуляции сигналов, а обмотки отсимметрированы и иметь постоянную времени, измеряемую десятыми долями мс, что связано с технологическими трудностями и представляет достаточно сложную задачу, так как электромеханическая часть тахометра должна состоять из двух первичных преобразователей (ПП), необходимых для формирования выходного напряжения [1].

Применение электронных дифференциаторов позволяет упростить электромеханическую часть тахометра и цифрового электропривода в целом за счет формирования сигналов обратных связей от одного первичного преобразователя. Причем для формирования сигналов формата СТГ наиболее предпочтительны СКП, основанные на различных физических принципах построения. Применение растровых СКП позволяет упростить формирование сигналов формата СТГ и повысить быстродействие за счет исключения демодуляторов и сопутствующих им сглаживающих фильтров.

Из известных технических решений видно, что преобразование продифференцированных по времени синусно-косинусных сигналов в сигнал постоянного тока может быть осуществлено различными методами. Из них только методы, основанные на аналоговом умножении и делении, обеспечивают теоретически точное преобразование. Остальные методы осуществляют преобразование с методической погрешностью. К их числу относятся метод синхронного одно или двухполупериодного детектирования многофазной системы продифференцированных сигналов, например, при помощи многофазных выпрямителей, а также методы, основанные на цифро-аналоговых перемножителях и делителях. Однако наличие методической по-

грешности не является принципиальным недостатком, так как при соответствующем выборе числа фаз или разрядности АЦП ее можно снизить до любой сколь угодно малой величины. Поэтому, несмотря на усложнение, применение аналого-цифровых методов преобразования позволяет повысить точностные и динамические характеристики тахометра и реализовать его на современной микроэлементной базе.

Произведем их анализ с целью выявления общих закономерностей построения тахометров и синтеза структур, наилучшим образом отвечающих задачам их реализации на растровых СКП. Для определенности будем рассматривать СКП угловых перемещений.

**Анализ методов преобразования сигналов формата СТГ в сигнал постоянного тока, пропорциональный мгновенной частоте вращения**

Из известных работ следует, что принципиально задача преобразования сигналов СТГ в сигнал постоянного тока решается их фазочувствительным (синхронным) детектированием. При этом для исключения сглаживающих фильтров используются квадратурные синхронные детекторы.

Выходной сигнал при квадратурном синхронном детектировании формируется попарным перемножением сигналов формата СТГ и формата СКП и алгебраическом суммировании их результатов

(1) $U_{\text{т}} = k_{\text{су}} k_{\text{п}} \left( U_{\text{тс}} U_c - U_{\text{тs}} U_s \right),$

где $k_{\text{су}}$, $k_{\text{п}}$ – коэффициенты передачи суммирующего и перемножающего устройства; $U_{\text{тs},c}$, $U_{s,c}$ – синусный и косинусный сигналы СТГ и СКП.

Представив формат СТГ, сформированный при помощи электронных дифференциаторов, в виде

(2) $U_{\text{тs},c} = k_{\text{др}} \dfrac{\mathrm{d}U_{c,s}}{\mathrm{d}t},$

где $k_{\text{др}}$ – коэффициенты передачи электронного дифференциатора,

(3) $U_s = U_m \sin\varphi,$

(4) $U_c = U_m \cos\varphi,$

где $U_m$, $\varphi = N\alpha$ – амплитуда и пространственная фаза $U_{s,c}$; $N$ – коэффициент масштабного преобразования углового перемещения $\alpha = \Omega t$, изменяющегося во времени с угловой скоростью $\Omega$, с учетом (2)-(4) будем иметь

(5) $U_{\text{т}} = k_{\text{су}} k_{\text{п}} k_{\text{др}} U_m^{\,2} N\Omega \left( \cos^2 N\Omega t + \sin^2 N\Omega t \right).$

Используя в (5) тригонометрические соотношения

$$\cos^2 N\Omega t = \frac{1+\cos 2N\Omega t}{2} \quad \text{и} \quad \sin^2 N\Omega t = \frac{1-\cos 2N\Omega t}{2},$$

можно записать

(6) $U_{\text{т}} = k_{\text{т}} \Omega \left( 1 + \dfrac{\cos 2N\Omega t - \cos 2N\Omega t}{2} \right),$

где $k_{\text{т}} = k_{\text{су}} k_{\text{п}} k_{\text{др}} N U_m^{\,2}$ – крутизна выходной характеристики тахометра.

Из (6) следует, что при квадратурном синхронном детектировании переменные составляющие, изменяющиеся с частотой $2N\Omega$, взаимно компенсируются и поэтому амплитудное

детектирование может быть произведено без применения фильтров, что позволяет получить высокое быстродействие. Выходное напряжение при этом будет пропорционально мгновенной частоте вращения

(7) $U_{\text{т}} = k_{\text{т}}\Omega$.

Анализ показывает, что уравнение квадратурного синхронного детектора (1) представляет частный случай двухфазного фазовращателя (ФВ)

(8) $U_{\text{фв}} = k_{\text{су}}k_{\text{п}}\left(U_{\text{тс}}\,U_{\text{рс}} - U_{\text{тs}}\,U_{\text{рs}}\right)$,

где $U_{ps,\,c}$ – синусный и косинусный сигналы развертки $\psi$ [4-6].

Подставив в выражение (8)

(9) $U_{ps} = U_{m\,\text{р}}\,\mathbf{sin}\,\psi$,

(10) $U_{ps} = U_{m\,\text{р}}\,\mathbf{cos}\,\psi$,

где $U_{m\,\text{р}}$, $\psi$ – амплитуда и фаза сигналов развертки, будем иметь

(11) $U_{\text{фв}} = U_{m\,\text{фв}}\,\mathbf{cos}\left(\psi - \varphi\right)$,

где $k_{\text{фв}} = k_{\text{су}}k_{\text{п}}k_{\text{др}}U_{m\,\text{фв}}U_{m}N\Omega$ – амплитуда выходного сигнала ФВ.

Из (11) видно, что при $\psi = \varphi$ и $U_{m\,\text{р}} = U_{m}$ уравнение фазовращателя совпадает с уравнением квадратурного синхронного детектора, и будем иметь
$U_{\text{фв}} = U_{m\,\text{фв}} = k_{\text{д}}\Omega$.

Отсюда следует, что квадратурное синхронное детектирование может быть осуществлено в общем случае по многофазной схеме, описываемой уравнением многофазного фазовращателя [4-7].

Таким образом, показано, что в общем случае преобразование формата СТГ в сигнал постоянного тока может быть осуществлено многофазным синхронным детектированием, реализуемым уравнением многофазного гониометрического фазовращателя, представляющим собой скалярное произведение многофазных систем сигналов СТГ и преобразователя угла [6-7].

Произведенное исследование позволило выявить более общие алгоритмы формирования тахометрического сигнала постоянного тока, а также показало, что известный способ, основанный на соотношении $\mathbf{cos}^2\,\varphi + \mathbf{sin}^2\,\varphi = 1$, можно рассматривать как способ, основанный на уравнении двухфазного фазовращателя. Такая трактовка открывает новые возможности построения тахометров на основе СКП, так как позволяет использовать для этого технические решения из схемотехники цифровых преобразователей перемещений [4-7].

С учетом (11) функцию преобразования БДПТ можно представить в виде

(12) $U_{\text{т}} = k_{\text{т}}\dfrac{\text{d}\varphi}{\text{d}t}\mathbf{cos}\left(\psi - \varphi\right)$.

Из (12) следует, что, как и в случае преобразования перемещений $\alpha$, в процессе преобразования скорости вращения $\Omega$ должно осуществляться равенство $\psi = \varphi$. При построении тахометров аналоговыми методами это достигается использованием в качестве $\psi$ непосредственно пространственной фазы $\varphi$. Применение циклической развертки $\psi = \omega t$ позволяет построить тахометр с функцией преобразования

$$U_{\text{т}} = k_{\text{т}}\,\frac{\text{d}\varphi}{\text{d}t}\mathbf{cos}\left(\omega\text{t} - \varphi\right).$$

Таким образом, применение непрерывной развертки ψ приводит к техническим решениям, используемым в преобразователях перемещений при построении аналоговых ФВ.

При дискретной развертке в процессе преобразования воспроизводятся дискретные значения пространственной фазы

(13) $\psi = \varphi_N$,

где $\varphi_N = Nq$ – уровни квантования φ; $q$, $N=Ent\left[\frac{\varphi}{q}+\xi\right]$ – шаг и номер уровня квантования; ξ – начальное смещение зависимости $N$ от φ.

Подставив (13) в выражение (12), будем иметь

(14) $U_{\text{т}} = k_{\text{т}} \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} \mathbf{cos}\left(\psi - \varphi_N\right)$.

Из выражения (14) следует, что переход от непрерывной развертки к дискретной развертке приводит к появлению пульсаций выходного сигнала тахометра, величина которых определяется шагом квантования $q$ и смещением ξ. Наименьший размах пульсаций будет при выборе $\xi = 0.5$, что соответствует случаю, когда равенство $\varphi = \varphi_N$ достигается в середине кванта.

При этом относительная величина пульсаций не будет превышать

(15) $\delta U_{\text{п}} = \frac{1-\mathbf{cos}\,0.5q}{1+\mathbf{cos}\,0.5q}$,

где $q = \frac{2\pi}{N_{\text{кв}}}$, $N_{\text{кв}}$ – шаг и число уровней квантования.

Произведя упрощение (15), находим

(16) $\delta U_{\text{ï}} = \mathbf{tg}^2 \frac{q}{4} = \mathbf{tg}^2 \frac{\pi}{2^{n+1}}$,

где $n = \mathbf{lg}\, N_{\text{кв}}$.

Из вышеизложенного следует, что для формирования тахосигнала постоянного тока на основе дискретной развертки ψ необходимо произвести аналого-цифровое преобразование угла α в код $N$ с коэффициентом редукции СКП и цифро-аналоговое преобразование кода $N$ согласно уравнению (14), которое представляет собой уравнение цифрового фазовращателя (ЦФВ).

В зависимости от способов их реализации могут быть синтезированы различные структуры БТПТ на растровых СКП.

Таким образом, применение дискретной развертки ψ приводит к техническим решениям, используемым в преобразователях перемещений на основе ЦФВ, и соответствует цифро-аналоговому способу формирования тахосигнала.

**Синтез обобщенных цифро-аналоговых структур БДПТ на СКП**

Как следует из изложенного, цифро-аналоговая структура тахометра в общем случае должна состоять из растрового СКП, АЦП пространственной фазы (АЦПФ), двух дифференциаторов (ДР1, 2) и ЦФВ, как показано на рис.1. При этом предпочтительными являются АЦПФ непосредственного преобразования, основанные на применении дискретной развертки $\psi = \varphi_N$ и решении уравнения цифрового фазовращателя

(17) $\mathbf{sin}\left(\psi - \varphi_N\right) = 0$.

В зависимости от способа воспроизведения дискретных значений развертки $\psi = \varphi_N$ во времени различают последовательные, параллельные и параллельно-последовательные АЦПФ (ПсАЦПФ, ПрАЦПФ и ПрПсАЦПФ). Из них с точки зрения быстродействия наиболее приемлемы ПрАЦПФ, характеризующиеся наивысшим быстродействием. Однако их применение оправдано при $n \le 5...6$, так как с ростом числа разрядов объем оборудования резко возрастает. При $n \ge 5...6$ предпочтительны ПрПсАЦПФ и следящие АЦПФ (СлАЦПФ). В перечисленных структурах основным функциональным узлом является ЦФВ, работа которого описывается уравнением (12). Сопоставление (12) и (17) показывает их идентичность, если учесть, что дифференцирование вносит сдвиг по фазе $0.5\pi$ на опережение.

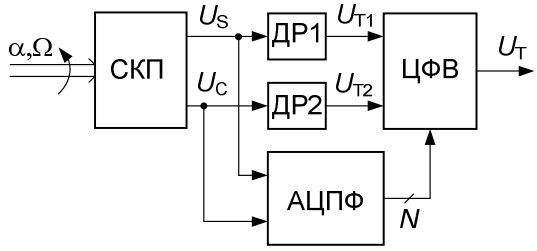



Рисунок 1 – Обобщенная цифро-аналоговая структура БТПТ на СКП

Отсюда следует, что в схеме на рис. 1, могут быть использованы структуры ЦФВ из схемотехники СлАЦПФ, ПрАЦПФ и ПрПсАЦПФ. На рис. 2 представлены двухступенчатые структуры ЦФВ СлАЦПФ (а) и ПрПсАЦПФ (б).

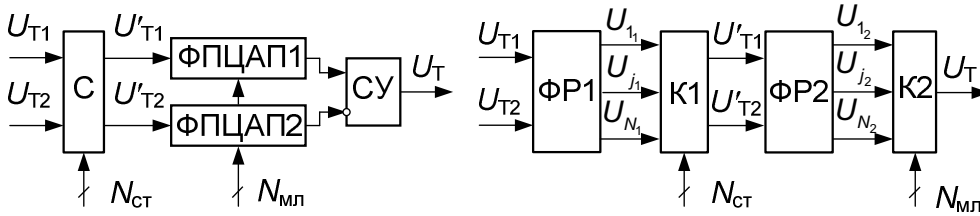



Рисунок 2 – Двухступенчатые блочно-модульные структуры ЦФВ

ЦФВ на рис. 2, а содержит селектор (С) в виде двух малоразрядных ЦФВ первой ступени, который в зависимости от числа шагов разбиения диапазона $2\pi$ называют селектором квадрантов, октантов и т.д., и два функциональных перемножающих ЦАП (ФПЦАП1, 2) во второй ступени с суммирующим устройством (СУ) на выходе. Пройдя через вторую ступень, сигналы $U'_{т_1}$ и $U'_{т_2}$ формируют на выходе СУ выходной сигнал $U_т$. Синтез ЦФВ по двухступенчатой схеме позволяет применить более простые ФПЦАП во второй ступени, так как диапазон изменения кода $N_{і ё}$ равен одному кванту кода $N_{ст}$.

Достоинствами схемы является возможность построения тахометра с использованием схемотехники СлАЦПФ, АЦП и ЦАП, функциональные узлы которых унифицированы и выпускаются в виде БИС.

В параллельно-последовательной структуре ЦФВ (ПрПсЦФВ) в общем случае может содержаться произвольное число ступеней, состоящих из фазорасщепителя (ФР) и коммутатора (К). На рис. 2, б показан наиболее распространенный случай двух ступеней. В схеме блок ФР1 формирует с шагом $q_1$ многофазную систему $U_{j_1}; j_1 = \overline{1, N_1}$, где $N_1$ – число фаз, равное числу уровней квантования первой ступени, поступающую на входы коммутатора К1, который

управляется старшими разрядами $N_{ст}$ кода АЦПФ, дискретность которого соответствует $q_1 = \frac{2\pi}{N_1}$. Закон коммутации выбирается так, чтобы на выходах сформировать два квадратурных сигнала $U'_{т_1}$ и $U'_{т_2}$ вида (14), что возможно при $N_1$, кратном 4. Таким образом, первая ступень выполняет функцию селектора предыдущей схемы. Вторая ступень устроена аналогично. При этом блок ФР2 формирует многофазную систему $U_{j_2}; j_2 = \overline{1, N_2}$ с шагом $q_2$ и числом фаз $N_2$, связанных соотношением $q_2 = \frac{q_1}{N_2}$, а коммутатор К2, управляемый младшими разрядами $N_{мл}$ АЦПФ, пропускает на выход, составляющую ФР2 $U_{j_2}$, имеющую вид $U_т$.

Частным случаем ПрПсЦФВ является ПрЦФВ, состоящий из одной ступени.

Особенности структур обусловлены характером формирования в них разностного сигнала вида $\mathbf{cos}(\psi - \varphi_N)$. В последовательной структуре он формируется непосредственно на выходе СУ при помощи ФПЦАП, достоинствами которых являются возможность использования БИС ЦАП и большая точность. В параллельной структуре значения разностного сигнала для всех $\varphi_N$ воспроизводятся одновременно в виде многофазной системы, а коммутатор в зависимости от кода $N$ пространственной фазы φ пропускает на выход составляющую с начальной фазой $\varphi_N$. Число фаз фазорасщепителя и входов коммутатора при этом равно числу уровней квантования АЦПФ. В параллельно-последовательной структуре он воспроизводится ступенчато: в первой воспроизводятся значения разностного сигнала, соответствующие старшим разрядам цифрового эквивалента $\varphi_N$, а во второй – младшим. Поэтому суммарное число фаз фазорасщепителей и входов коммутаторов в структуре будет существенно меньшим числа фаз разностного сигнала, воспроизводимых на выходе и определяемых числом уровней квантования АЦПФ.

Сопоставление показывает, что наиболее простыми в реализации при разрядности $\varphi_N$ n≤5…6 являются структуры на основе ПрАЦПФ и ПрПсАЦПФ, отличающие технологичностью и высоким быстродействием. Структуры на СлАЦПФ предпочтительны при $n \geq 5...6$. Однако, учитывая, что при $n \approx 5...6$ методическая погрешность, вызываемая пульсациями из-за квантования не превышает 0.1%, что меньше других составляющих погрешности, более предпочтительными являются структуры БТПТ на ПрАЦПФ и ПрПсАЦПФ.

В результате исследований выявлена общность принципов построения тахометров и преобразователей перемещений и синтезированы на СКП блочно-модульные структуры БТПТ, отличающиеся технологичностью и высоким быстродействием и позволяющие синтезировать различные частные структуры в зависимости от выбора конкретных технических решений основных функциональных узлов.

**Список литературы**


[1] Бродовский В.Н. и др. Бесколлекторные тахогенераторы постоянного тока/ В.Н. Бродовский, Б.Н. Коржавов, Ю.Н. Рыбкин; Под ред. В.Н. Бродовского. – М.: Энергоиздат, 1982. – 128с.

[2] Домрачев В.Г., Смирнов Ю.С. Цифроаналоговые системы позиционирования (Электромеханотронные преобразователи). – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240с.

[3] Домрачев В.Г. и др. Схемотехника цифровых преобразователей перемещений: Справоч. пособ./ В.Г. Домрачев, В.Р. Матвеевский, Ю.С. Смирнов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 392с.

[4] Высокоточные преобразователи угловых перемещений/ Э.Н. Асиновский, А.А.Ахметжанов, М.А. Габидулин и др.; Под общ. ред. А.А.Ахметжанова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128с.

[5] Габидулин М.А. Синтез фотоэлектрического цифрового преобразователя угла и скорости, встраиваемого в исполнительный электродвигатель// Мехатроника, автоматизация, управление. 2008, №5. – С. 23-27.
[6] Габидулин М.А. Синтез фазовращателей преобразователей перемещений// Сб. трудов 53 НТК. – М.: МИРЭА, 2004. – Ч.3. Технические науки. – С.14-19.
[7] Габидулин М.А. Анализ n-фазных фазовращателей преобразователей перемещений// Сб. трудов 54 НТК. – М.: МИРЭА, 2005. – Ч.3. Технические науки. – С.131-135.

# СИНТЕЗ МЕТОДОВ И СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

**В.С. Мелентьев, А.О. Лычев, А.А. Миронов**

Самарский государственный технический университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
vs_mel@mail.ru
тел: +7 (846) 337-05-45

***Ключевые слова:*** *интегральные характеристики, гармоническая модель, ортогональные составляющие, сравнение сигналов, характерные точки, мгновенные значения сигналов*

**Abstract**

Methods and systems of definition of integrated characteristics on instant values of orthogonal making harmonious signals are considered.

## Введение

Практически все реальные измерительные сигналы имеют форму, отличную от гармонической. Анализ моделей и гармонического состава сигналов присоединений электрических подстанций показывает, что в сетях с номинальным напряжением 110 кВ и выше модель сигналов близка к гармонической и коэффициенты искажения синусоидальности не превышают 2 %, а коэффициенты гармонических составляющих – 1,5 %. Еще большее соответствие гармонической модели имеют выходные сигналы генераторов гидро- и теплоэлектростанций. Близкими к гармоническим являются сигналы в цепях ряда электромеханических систем.

Для определения интегральных характеристик (ИХ) таких сигналов можно воспользоваться гармонической моделью, оценив погрешность, обусловленную несоответствием модели виду реального сигнала [1].

В настоящее время распространение получили методы измерения интегральных характеристик гармонических сигналов (ИХГС): среднеквадратических значений (СКЗ) напряжения и тока, активной (АМ) и реактивной (РМ) мощности по отдельным мгновенным значениям. Существенное сокращение времени измерения обеспечивают методы, основанные на формировании дополнительных сигналов, сдвинутых по фазе относительно основного сигнала, и определении ИХГС по мгновенным значениям основного и дополнительных сигналов.

Однако вопросы использования в качестве дополнительных сигналов ортогональных составляющих практически не изучены.

В статье рассматриваются методы и, реализующие их, системы измерения ИХ на основе формирования дополнительных ортогональных составляющих сигналов (ОСС).

## Методы и системы измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов

Предлагается классифицировать методы и системы измерения ИХ с использованием ОСС по следующим признакам: связь с характерными точками сигналов; сравнение основного и дополнительного сигналов; запоминание мгновенных значений сигналов для последующего сравнения (рисунок 1).

В результате классификации выделены четыре группы методов.

Первую группу составляют методы, основанные на сравнении мгновенных значений основного и дополнительного сигналов, не использующие характерные точки сигналов (методы 1 и 2).

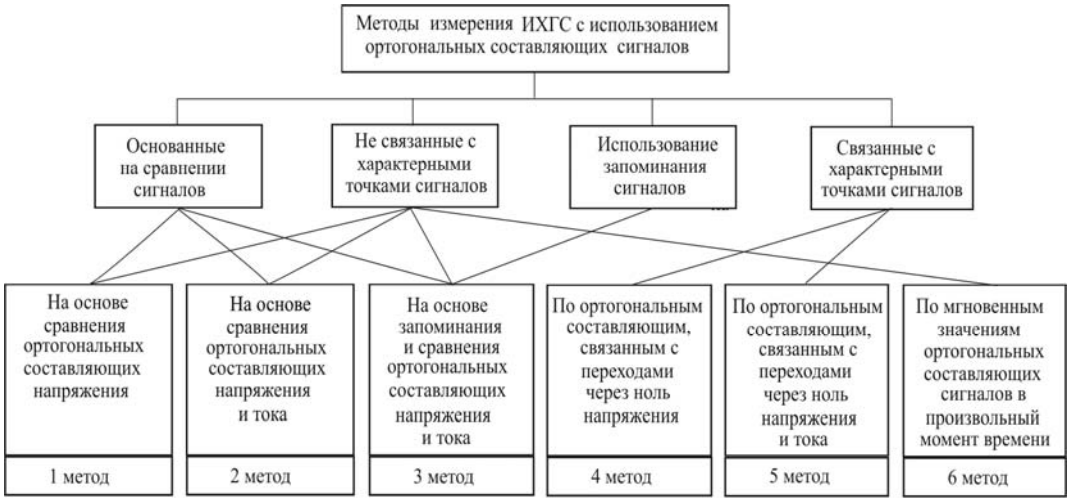



Рисунок 1 – Классификация методов

Вторую группу составляют методы, использующие запоминание мгновенных значений основных сигналов с последующим сравнением с мгновенными значениями дополнительных сигналов (метод 3).

Третья группа методов основана на фиксации переходов сигналов через ноль без сравнения основного сигнала и его ортогональной составляющей (методы 4 и 5).

Четвертую группу составляют методы, не использующие сравнение мгновенных значений сигналов и характерные точки сигналов (метод 6).

Первый метод основан на том, что формируют ОСС напряжения и тока; в момент равенства основного и дополнительного сигналов напряжения одновременно измеряют мгновенные значения основного сигнала напряжения, основного и дополнительного сигналов тока и определяют ИХГС по измеренным значениям [2].

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рисунке 2.

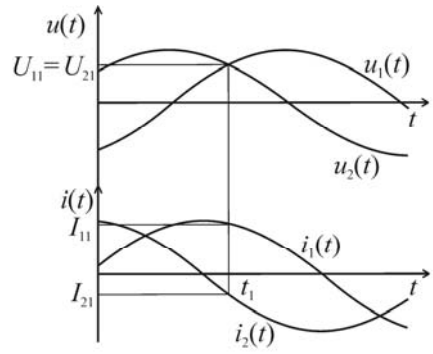



Рисунок 2 – Временные диаграммы, поясняющие первый метод

Для входного напряжения $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ и тока $i_1(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ и дополнительных сигналов напряжения $u_2(t) = U_m \cos \omega t$ и тока $i_2(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi)$ в момент времени $t_1$, когда основной и дополнительный сигналы напряжения будут равны, выражения для мгновенных значений сигналов примут вид: $U_{11} = U_m \sin \alpha_1$; $U_{21} = U_m \cos \alpha_1$; $I_{11} = I_m \sin \alpha_2$; $I_{12} = I_m \cos \alpha_2$, где $U_m$, $I_m$ - амплитудные значения напряжения и тока; $\alpha_1$, $\alpha_2$ - фазы сигналов напряжения и тока в момент времени $t_1$; $\varphi = \alpha_2 - \alpha_1$ - угол сдвига фаз между сигналами напряжения и тока; $\omega$ - угловая частота входного сигнала.

Мгновенные значения $U_{11}$ и $U_{21}$ будут равны при угле $\alpha_1 = \frac{\pi}{4} + \pi l$, где $l = 0,1$.

В этом случае выражения для определения основных ИХГС примут вид:

- СКЗ напряжения и тока $U_{СКЗ} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = |U_{11}|$; $I_{СКЗ} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{I_{11}^2 + I_{21}^2}{2}}$;

- АМ и РМ $P = \frac{U_m I_m \cos \varphi}{2} = \frac{U_{11}(I_{21} + I_{11})}{2}$; $Q = \frac{U_m I_m \sin \varphi}{2} = \frac{U_{11}(I_{11} - I_{21})}{2}$.

Информационно-измерительная система (ИИС), реализующая метод, представлена на рисунке 3.

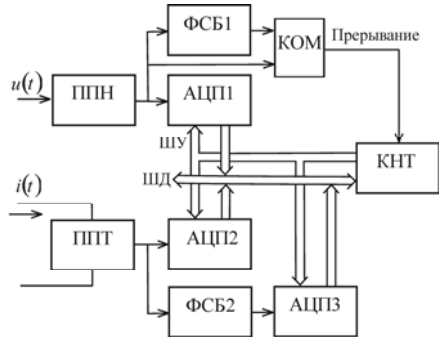



Рисунок 3 – ИИС, реализующая первый метод

В состав ИИС входят: первичные преобразователи напряжения ППН и тока ППТ, аналого-цифровые преобразователи АЦП1, АЦП2 и АЦП3, фазосдвигающие блоки ФСБ1 и ФСБ2, осуществляющие сдвиг входных сигналов на 90°, компаратор КОМ, контроллер КНТ, шины управления ШУ и данных ШД.

В рассматриваемом методе время измерения не зависит от угла сдвига фаз между напряжением и током, а определяется только временным интервалом между моментами начала измерения и моментом равенства мгновенных значений напряжений $U_{11}$ и $U_{21}$.

Реализации метода предполагает использование трех АЦП.

При реализации следующего метода измерения ИХГС число АЦП сокращается до двух.

Второй метод основан на том, что формируют ОСС напряжения и тока; в момент равенства основного и дополнительного сигналов напряжения одновременно измеряют мгновенные значения основных сигналов напряжения и тока; в момент равенства основного и дополнительного сигналов тока измеряют мгновенные значения основных сигналов тока и напряжения и определяют ИХГС по измеренным значениям.

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рисунке 4.

В момент времени $t_1$, когда основной и дополнительный сигналы напряжения будут равны, выражения для мгновенных значений сигналов примут вид:

$U_{11} = I_m \sin\alpha_1$ ; $U_{21} = U_m \cos\alpha_1$ ; $I_{11} = I_m \sin\alpha_2 = I_m \sin\left(\frac{\pi}{4} + \pi l + \varphi\right)$.

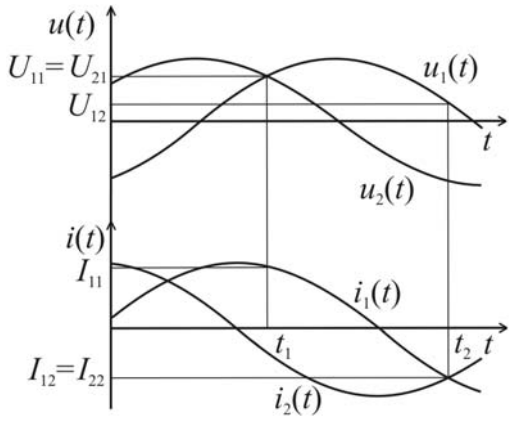



Рисунок 4 – Временные диаграммы, поясняющие второй метод

В момент времени $t_2$, когда будут равны основной и дополнительный сигналы тока, выражения для мгновенных значений сигналов будут иметь следующий вид:

$$I_{12} = I_m \sin\alpha_3 ;\ I_{22} = I_m \cos\alpha_3 ;\ U_{12} = U_m \sin(\alpha_3 - \varphi) = U_m \sin\left(\frac{\pi}{4} + \pi l - \varphi\right),$$

где $\alpha_3$ - фаза сигнала тока в момент времени $t_2$.

Мгновенные значения $I_{12}$ и $I_{22}$ будут равны, при угле $\alpha_3 = \frac{\pi}{4} + \pi l$.

В этом случае выражения для определения основных ИХГС будут равны:

$$U_{\text{СКЗ}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = |U_{11}| ;\ I_{\text{СКЗ}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = |I_{12}| ;\ P = \frac{U_{11}\left[I_{11} + sign(U_{11})sign(U_{12})sign(I_{12})\sqrt{2I_{12}^2 - I_{11}^2}\right]}{2};$$

$$Q = \frac{U_{11}\left[I_{11} - sign(U_{11})sign(U_{12})sign(I_{12})\sqrt{2I_{12}^2 - I_{11}^2}\right]}{2}.$$

В данном методе время измерения зависит от угла сдвига фаз между сигналами напряжения и тока.

Третий метод основан на том, что в произвольный момент времени одновременно измеряют первые мгновенные значения входного напряжения и ОСС напряжения и первое мгновенное значение тока; в момент достижения входным сигналом напряжения запомненного первого мгновенного значения дополнительного напряжения одновременно измеряют вторые мгновенные значения дополнительного напряжения и тока и определяют ИХГС по измеренным значениям [3].

Для входного тока $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ и напряжения $u_1(t) = U_m \sin\omega t$ и дополнительного напряжения $u_2(t) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \cos\omega t$ выражения для мгновенных значений сигналов:

$$\begin{cases} U_{11} = U_m \sin \alpha_1; \\ U_{21} = U_{12} = U_m \cos \alpha_1; \\ I_{11} = I_m \sin \alpha_2; \\ I_{12} = I_m \cos \alpha_2. \end{cases}$$

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рисунке 5.

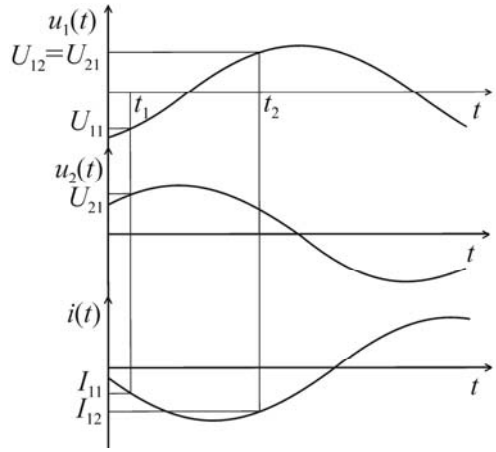



Рисунок 5 – Временные диаграммы, поясняющие третий метод

Для гармонических моделей напряжения и тока выражения для определения интегральных характеристик имеют следующий вид:

- СКЗ напряжения и тока $U_{CK3} = \sqrt{\dfrac{U_{11}^2 + U_{21}^2}{2}}$ ; $I_{CK3} = \sqrt{\dfrac{I_{11}^2 + I_{12}^2}{2}}$ ;
- АМ и РМ $P = \dfrac{U_{11}I_{11} + U_{21}I_{12}}{2}$; $Q = \dfrac{U_{11}I_{12} - U_{21}I_{11}}{2}$ .

ИИС, реализующая метод, представлена на рисунке 6.

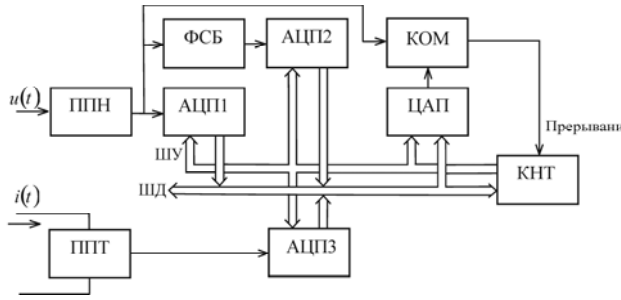



Рисунок 6 – ИИС, реализующая третий метод

В состав ИИС, кроме известных блоков, входит цифро-аналоговый преобразователь ЦАП, который формирует сигнал, равный запомненному первому мгновенному значению дополнительного напряжения. Система содержит только один фазосдвигающий блок в канале напряжения.

В рассматриваемом методе время измерения не зависит от угла сдвига фаз между напряжением и током и соответствует четверти периода.

Четвертый метод основан на том, что в момент перехода ОСС напряжения через ноль одновременно измеряют первые мгновенные значения входного напряжения и тока; в момент перехода ОСС тока через ноль измеряют второе мгновенное значение входного тока и определяют ИХГС по измеренным значениям.

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рисунке 7.

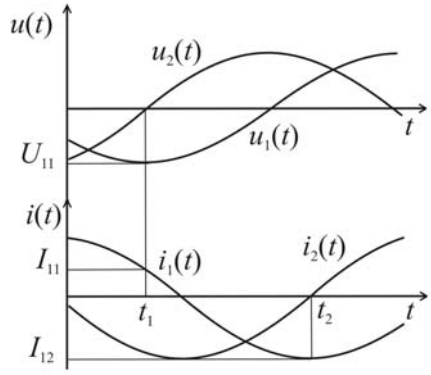



Рисунок 7 – Временные диаграммы, поясняющие четвертый метод

Выражения для мгновенных значений сигналов в моменты времени t1 и t2 имеют следующий вид:

$$\begin{cases} U_{11} = U_m \sin\left(-\dfrac{\pi}{2}\right) = -U_m; \\ I_{11} = I_m \sin\varphi; \\ I_{12} = I_m \sin\left(-\dfrac{\pi}{2}\right) = -I_m. \end{cases}$$

В этом случае выражения для определения основных ИХГС примут вид:

$$U_{СКЗ} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = |U_{11}|;\ I_{СКЗ} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = |I_{12}|;\ P = \frac{|U_{11}|I_{11}}{2};\ Q = \frac{sign(U_{12})sign(I_{12})|U_{11}|\sqrt{I_{12}^2 - I_{11}^2}}{2}.$$

В данном методе время измерения также зависит от угла сдвига фаз между сигналами напряжения и тока.

При реализации метода используются два АЦП и два ФСБ. При этом погрешности ФСБ по напряжению и току отсутствуют, так как дополнительные сигналы применяются только для определения переходов через ноль.

Пятый метод основан на определении ИХГС по двум мгновенным значениям напряжения и одному мгновенному значению тока. В данном методе мгновенное значение тока взято в момент перехода через ноль сигнала напряжения, мгновенные значения напряжения взяты одновременно в момент перехода сигнала тока через ноль, причем второе мгновенное значение напряжения сдвинуто относительно первого на 90º.

Для данного метода мгновенные значения сигналов имеют вид:

$$\begin{cases} I_{11} = I_m \sin(-\varphi); \\ U_{22} = U_m \sin\left(\varphi + \dfrac{\pi}{2}\right) = U_m \cos\varphi; \\ U_{12} = U_m \sin\varphi. \end{cases}$$

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рисунке 8.

Для гармонических моделей напряжения и тока выражения для определения интегральных характеристик сигналов имеют следующий вид:

- СКЗ напряжения и тока $U_{СКЗ}=\sqrt{\frac{U_{12}^2+U_{22}^2}{2}}$ ; $I_{СКЗ}=\left|\frac{I_{11}\sqrt{U_{12}^2+U_{22}^2}}{U_{12}\sqrt{2}}\right|$;
- АМ и РМ $P=sign(U_{22})\left|\frac{I_{11}U_{22}\sqrt{U_{12}^2+U_{22}^2}}{2U_{12}}\right|$ ; $Q=-\frac{I_{11}\sqrt{U_{12}^2+U_{22}^2}}{2}$.

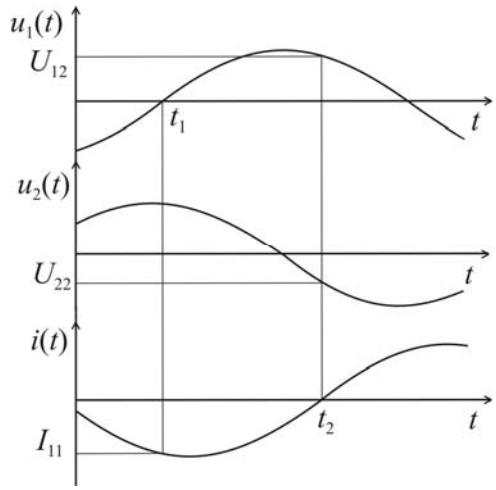



Рисунок 8 – Временные диаграммы, поясняющие пятый метод

В данном методе время измерения также зависит от угла сдвига фаз между сигналами напряжения и тока. Реализация метода предусматривает использования трех АЦП и одного ФСБ.

Шестой метод основан на определении интегральных характеристик сигналов по двум мгновенным значениям напряжения и тока, одновременно измеренным в произвольный момент времени, причем вторые мгновенные значения напряжения и тока сдвинуты относительно первых на угол 90° в сторону опережения [1].

Если сигналы напряжения и тока в исследуемой цепи имеют гармонические модели, то их мгновенные значения в произвольный момент времени t1 равны:

$$\begin{cases} U_1 = U_m \sin\alpha_1; \\ U_2 = U_m \sin\left(\alpha_1+\frac{\pi}{2}\right) = U_m \cos\alpha_1; \\ I_1 = I_m \sin\alpha_2; \\ I_2 = I_m \sin\left(\alpha_2+\frac{\pi}{2}\right) = I_m \cos\alpha_2. \end{cases}$$

Выражения для определения ИХГС принимают следующий вид:

- СКЗ напряжения и тока $U_{СКЗ}=\sqrt{\frac{U_1^2+U_2^2}{2}}$ ; $I_{СКЗ}=\sqrt{\frac{I_1^2+I_2^2}{2}}$ ;
- АМ и РМ $P=\frac{U_1I_1+U_2I_2}{2}$ ; $Q=\frac{U_1I_2-U_2I_1}{2}$.

Временные диаграммы, поясняющие метод, приведены на рисунке 9.

ИИС, реализующая метод, представлена на рисунке 10.

ИИС содержит два фазосдвигающих блока и четыре аналого-цифровых преобразователя.

Время измерения ИХГС в данной ИИС не зависит от момента начала измерения и угла сдвига фаз между током и напряжением, а определяется только временем аналого-цифрового преобразования мгновенных значений сигналов и ввода кодов в контроллер.

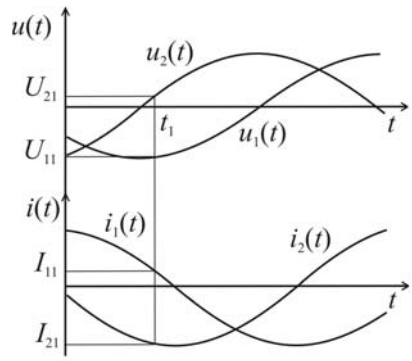



Рисунок 9 – Временные диаграммы, поясняющие шестой метод

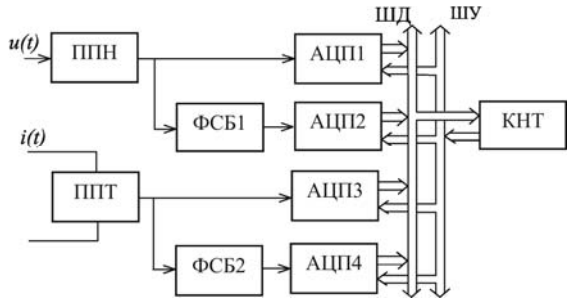



Рисунок 10 – ИИС, реализующая шестой метод

**Заключение**

Проведенный анализ методов и систем измерения ИХГС, для определения которых используются ортогональные составляющие сигналов, показал, что наименьшее время измерения обеспечивает шестой метод. Однако его реализация требует достаточно больших аппаратурных затрат.

При реализации второго и четвертого методов применяются только по два аналого-цифровых преобразователя. В ИИС, реализующих третий и пятый методы, используется только по одному фазосдвигающему блоку.

Полученные результаты позволяют оптимально выбирать методы и системы измерения ИХГС в зависимости от параметров сигналов в цепях объекта исследования и предъявляемых требований по времени измерения и аппаратурным затратам.

**Список литературы**

[1] Мелентьев В.С., Батищев В.И. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 240 с.

[2] Мелентьев В.С., Рудаков Д.В. Методы измерения интегральных характеристик гармонических сигналов, основанные на сравнении ортогональных составляющих сигналов // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: межвуз. сборник. – Вып.1. – Бийск: Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 2011. - С. 129 – 131.
[3] Мелентьев В.С., Кожевникова Е.Г. Использование компарирования мгновенных значений периодических сигналов для определения их интегральных характеристик // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – Самара, СамГТУ, 2010. -№7(28) - С. 225 – 228.

# ВЫЯВЛЕНИЕ, ОЦЕНКА И КОМПЕНСАЦИЯ РАССОГЛАСОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ СТЕРЕОЗРЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ ИНФОРМАЦИОННОГО И КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА СТЕРЕОПАРЫ

**С.В. Кравцов**

Технологический институт Южного федерального университета в г.Таганроге
347928, Ростовская область, Таганрог, ГСП-17А, пер. Некрасовский, 44, ТТИ ЮФУ, Россия
krsvtg@rambler.ru
тел: +7 (863-4) 31-55-07, +7-928-165-82-46

***Ключевые слова:*** *стереозрение, ошибки измерений, калибровка*

**Abstract**

Touches upon the method determining the mismatch parameters of the digital system stereovision based on the information and correlation analysis of a stereo pair images. As digital stereovision system is analyzed system from two collinear digital camcorders.

## Введение

Патентные исследования в области калибровки цифровых бинокулярных систем технического зрения (БСТЗ) выявили ряд недостатков и ограничений известных методов и подходов, применяемых для решения данной задачи.

Во-первых, в большинстве методов для калибровки используются информативные признаки рассогласований, выделяемые на изображениях стереопары по калибровочному объекту. Информативные признаки определяются в пиксельном пространстве фотоматриц, носят характер дискретных оценок, и, следовательно, имеют ошибки дискретизации. Информативные признаки рассогласований параметров БСТЗ также не учитывают параллакс при наблюдении калибровочного объекта. Эти обстоятельства препятствуют получению высокой точности калибровки.

Во-вторых, в качестве калибровочных объектов наблюдаемой сцены выбираются либо специально созданные эталонные сцены, либо выбранные по каким-либо критериям реальные объекты наблюдаемой сцены. В первом случае, калибровка предполагает участие оператора для точной установки калибровочного объекта. Во втором случае затруднено определение стереобазы БСТЗ за счет незнания истинных координат выбранного калибровочного объекта.

Цель исследований состоит в определении методов направленных на повышение точности калибровки БСТЗ.

## Метод калибровки БСТЗ посредством информационного и корреляционного анализа стереопары

Рассмотрим метод, позволяющий выявлять и оценивать рассогласования $\mathbf{\Delta}$ БСТЗ (несоосность – отклонения оптических осей видеокамер (ВК) по углу места $\alpha$, крена $\beta$, тангажа $\gamma$; расфокусирование – разность фокусных расстояний объективов ВК $\delta f=f_{ВК2}-f_{ВК1}$; и смещение оптических центров ВК вдоль осей $X - \delta x$, $Y - \delta y$, $Z - \delta z$). Полагается, что проекционные искажения в стереопаре за счет аберрации объективов скомпенсированы. Дефекты фотоматриц ВК полагаются не существенными.

Метод предполагает использование тестовой таблицы с нанесением двух идентичных тестовых изображений (мишеней), геометрические центры которых (рисунок 1) разнесены на величину $b$ базы. Тестовая таблица должна размещаться в области, где поля зрений обеих ВК

не перекрываются, при этом мишень 1 попадает в поле зрения первой ВК (ВК1), а мишень 2 – в поле зрения второй ВК (ВК2). Линия, соединяющая геометрические центры мишеней, должна быть параллельна оси 0*X*. Плоскость тестовой таблицы имеет наклон *ϑ*.

При идеальной согласованности параметров БСТЗ фиксируемые изображения от мишеней будут идентичны. Рассогласования параметров БСТЗ приведут к нарушению идентичности фиксируемых изображений мишеней.

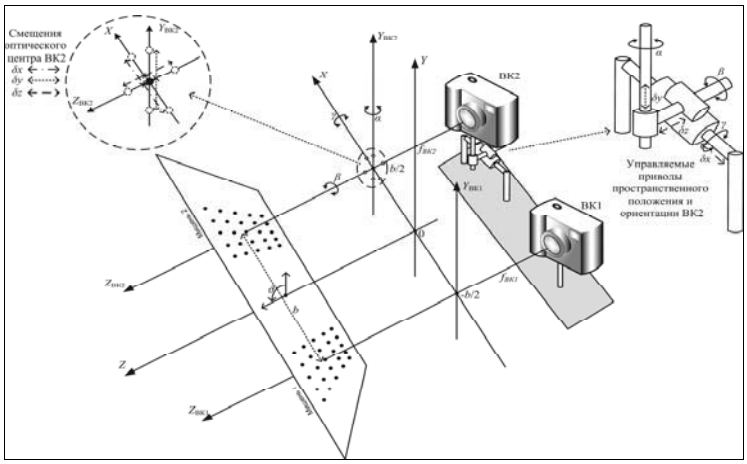



Рисунок 1 – Размещение тестовой таблицы для калибровки БСТЗ

Полагается, что все возможные рассогласования двух ВК в БСТЗ [3] можно привести к случаю рассогласования параметров второй ВК относительно первой.

На первом этапе калибровки производится информационный анализ изображений стереопары путем простого наложения для выявления смещения центров мишеней тестовой таблицы и путем наложения с совмещением центров мишеней тестовой таблицы для выявления наличия и характера деформаций в изображениях стереопары. Проведенный информационный анализ изображений мишеней в стереопаре при моделировании рассогласований [3] позволил выявить информативные признаки соответствующих рассогласований. Результаты представлены в таблице 1. Расположение указанных в таблице 1 квадрантов (обозначение – кв.) соответствует приведенному на рисунке 2.

Анализ информативных признаков свидетельствует, что не всегда однозначно можно выявить вид рассогласования, присутствующий в БСТЗ, путем информационного анализа изображений стереопары. Например, расфокусирование и смещение оптического центра второй ВК по оси *Z* имеют схожие информативные признаки. При задании комбинированных рассогласований информационный анализ изображений стереопары показывает наложение (комбинацию) информативных признаков, что существенно сужает его возможности для точной идентификации рассогласований и определения их величины.

В этих условиях для калибровки БСТЗ эффективным оказывается метод корреляционного анализа изображений. Первый вариант реализации метода, назовем его прямым методом, заключается в обеспечении максимума взаимной корреляционной функции изображений $S_{ВК1}$ и $S_{ВК2}$ при управлении настройками параметров второй ВК по компенсации рассогласований $\mathbf{\Delta}$. Действительно, главный максимум взаимокорреляционной функции достигается, когда изображения стереопары идентичны, и, следовательно, рассогласования $\mathbf{\Delta}$ в БСТЗ отсутствуют.

Другим (имитационным) методом определения величины рассогласований, основанном на корреляционном анализе, является имитационное моделирование, когда в определенную модель первой ВК искусственно вводят (с некоторым шагом $\delta\Delta$) рассогласования $\Delta$ [1,3] и получают смоделированное изображение мишени SBK1($\Delta$), которое сравнивают с изображе-

нием SBK2. Максимум взаимной корреляционной функции изображений SBK1(Δ) и SBK2 дает оценку рассогласований **Δ** БСТЗ. Вычисленные значения рассогласований могут быть использованы для принятия мер по их устранению или учитываются при измерениях координат объектов наблюдаемой сцены рассогласованной БСТЗ.

Таблица 1 – Информативные признаки рассогласований

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Вид рассогласования</td><td colspan="9">Информативный параметр изображений (второй ВК в сравнении с первой ВК)</td></tr>
<tr><td colspan="5">По горизонтали</td><td colspan="4">По вертикали</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Тип рассогласования</td><td rowspan="2">значение</td><td rowspan="2">Смещение геометрического центра изображения</td><td colspan="4">Изменение масштаба относительно геометрического центра изображения второй ВК, иной признак</td><td rowspan="2">Смещение геометрического центра изображения</td><td colspan="4">Изменение масштаба относительно геометрического центра изображения второй ВК, иной признак</td></tr>
<tr><td>1кв.</td><td>2кв.</td><td>3кв.</td><td>4кв.</td><td>1кв.</td><td>2кв.</td><td>3кв.</td><td>4кв.</td></tr>
<tr><td colspan="11">1.Расфокусирование</td></tr>
<tr><td rowspan="2">$\delta f$</td><td>$\delta f>0$</td><td rowspan="2">нет</td><td colspan="4">Увеличение масштаба (Ув М)</td><td rowspan="2">нет</td><td colspan="4">Ув М</td></tr>
<tr><td>$\delta f<0$</td><td colspan="4">Уменьшение масштаба (Ум М)</td><td colspan="4">Ум М</td></tr>
<tr><td colspan="11">2.Отклонения в направленности оптической оси второй ВК по отношению к направленности оси первой ВК</td></tr>
<tr><td rowspan="2">по углу места</td><td>$\alpha>0$</td><td>влево</td><td>Ув М</td><td>Ум М</td><td>Ув М</td><td>Ум М</td><td rowspan="2">нет</td><td>Ув М</td><td>Ум М</td><td>Ув М</td><td>Ум М</td></tr>
<tr><td>$\alpha<0$</td><td>вправо</td><td>Ум М</td><td>Ув М</td><td>Ум М</td><td>Ув М</td><td>Ум М</td><td>Ув М</td><td>Ум М</td><td>Ув М</td></tr>
<tr><td rowspan="2">по углу крена</td><td>$\beta>0$</td><td rowspan="2">нет</td><td colspan="4">Вращение против час. стрелки</td><td rowspan="2">нет</td><td colspan="4">Вращение против час. стрелки</td></tr>
<tr><td>$\beta<0$</td><td colspan="4">Вращение по часовой стрелке</td><td colspan="4">Вращение по часовой стрелке</td></tr>
<tr><td rowspan="2">по углу тангажа</td><td>$\gamma>0$</td><td rowspan="2">нет</td><td colspan="2">Ув М</td><td colspan="2">Ум М</td><td>вверх</td><td colspan="2">Ув М</td><td colspan="2">Ум М</td></tr>
<tr><td>$\gamma<0$</td><td colspan="2">Ум М</td><td colspan="2">Ув М</td><td>вниз</td><td colspan="2">Ум М</td><td colspan="2">Ув М</td></tr>
<tr><td colspan="11">3.Смещение оптического центра второй ВК</td></tr>
<tr><td rowspan="2">по оси $X$</td><td>$\delta x>0$</td><td>вправо</td><td colspan="4" rowspan="2">нет</td><td>нет</td><td colspan="4" rowspan="2">нет</td></tr>
<tr><td>$\delta x<0$</td><td>влево</td><td>нет</td></tr>
<tr><td rowspan="2">по оси $Y$</td><td>$\delta y>0$</td><td rowspan="2">нет</td><td colspan="4" rowspan="2">нет</td><td>вверх</td><td colspan="4" rowspan="2">нет</td></tr>
<tr><td>$\delta y<0$</td><td>вниз</td></tr>
<tr><td rowspan="2">по оси $Z$</td><td>$\delta z>0$</td><td rowspan="2">нет</td><td colspan="4">Ув М</td><td rowspan="2">нет</td><td colspan="4">Ув М</td></tr>
<tr><td>$\delta z<0$</td><td colspan="4">Ум М</td><td colspan="4">Ум М</td></tr>
</table>

Как в первом, так и во втором методе, рассогласования **Δ** будут определяться как вектор, содержащий компоненты несоосности, расфокусирования и смещения оптического центра ВК, с размерностью 7×1. Следовательно, в общем случае взаимная корреляционная функция изображений $S_{BK1}$ и $S_{BK2}$ должна находиться в семимерном пространстве рассогласований **Δ**. Размерность пространства может быть понижена за счет информационного анализа стереопары, т.е. на первом этапе калибровки. Отсутствие каких-либо из признаков рассогласований говорит об отсутствии самих этих рассогласований, и, следовательно, размерность вектора рассогласований **Δ** может быть понижена. Это снижает количество регулируемых параметров второй ВК для прямого метода, или вычислительные затраты для имитационного метода.

Точность калибровки БСТЗ для прямого метода полностью определяется точностью приводов, регулирующих параметры ВК2. Для имитационного метода точность определения рассогласований БСТЗ не превышает величины половины шага нахождения взаимокорреляционной функции $\delta\mathbf{\Delta}/2$.

Имитационные эксперименты проводились на модели БСТЗ с параметрами: расстояние между ВК (стереобаза) 0,5 м; фокусные расстояния объективов ВК 8 мм; размеры фотоматриц ВК $N\times M$=1600×1200; линейные размеры пикселей фотоматриц 3 мкм. Мишени тестовой таблицы имитировались трехуровневым набором контрастных точек. На матрицах ВК находились полутоновые изображения $S_{BK1}$ и $S_{BK2}$ соответствующих мишеней в 8-битной кодировке с шумами на уровне младшего разряда (соотношение сигнал/шум ≈ 42дБ). При отсутствии рассогласований в БСТЗ значение нормированного коэффициента взаимной корреляции изображений $S_{BK1}$ и $S_{BK2}$ по серии из 100 расчетов лежало в пределах 0,95…0,96. Несоосность, расфокусирование и смещение оптического центра задавались для параметров второй ВК в пределах

малых значений: для $\delta f$ -0,5…0,5 мм, для угловых параметров направления оптической оси -1…1 градус и для смещений оптического центра -1…1 см.

На рисунке 3 приведен пример наложения полутоновых изображений стереопары $S_{ВК1}$ и $S_{ВК2}$ при наличии рассогласований.

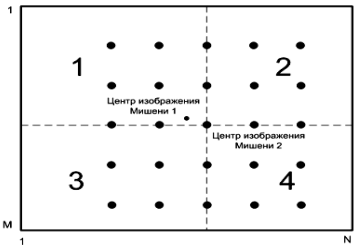



Рисунок 2 – Расположение квадрантов при анализе изображений стереопары, размерностью $N \times M$ пикселей

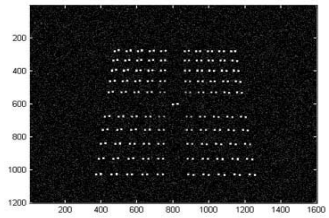
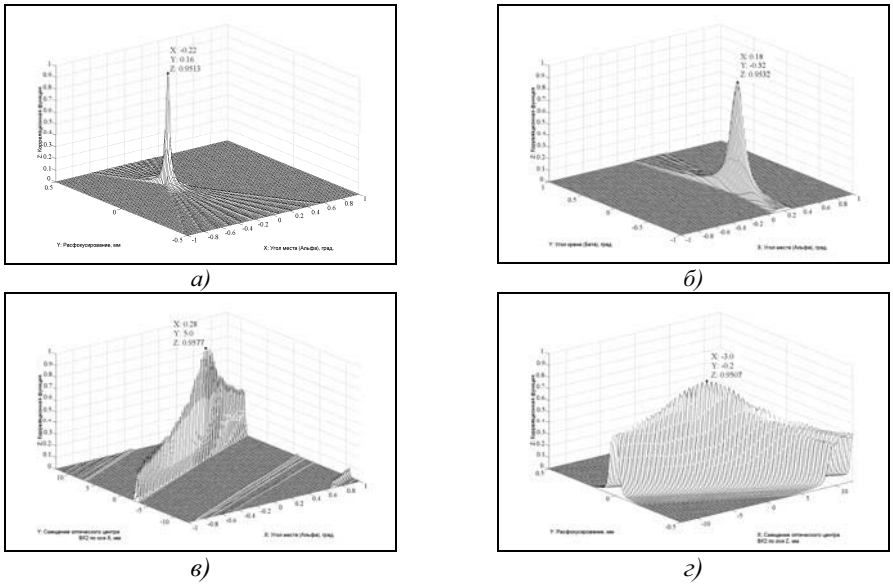



Рисунок 3 – Наложение $S_{ВК1}$ и $S_{ВК2}$ при наличии рассогласований

На рисунке 4 приведены примеры определения рассогласований БСТЗ, заданных произвольным способом из указанных диапазонов, при размерности вектора рассогласований $\mathbf{\Delta}$ 2×1.



*а)* *б)* *в)* *г)*

Рисунок 4 – Нормированные взаимокорреляционные функции изображений $S_{ВК1}$ и $S_{ВК2}$ при рассогласованиях:
*а)*по углу места и расфокусировании; *б)*по углам места и крена; *в)*по углу места и смещении оптического центра второй ВК по оси *X*; *г)*расфокусировании и смещении оптического центра второй ВК по оси *Z*

Точка максимума нормированной взаимокорреляционной функции изображений $S_{ВК1}$ и $S_{ВК2}$ (указана для всех приведенных на рисунке 4 случаев) дает оценку значений рассогласований БСТЗ. Полученные оценки рассогласований БСТЗ соответствуют заданным значениям вектора рассогласований **Δ.** Для бóльших размерностей вектора рассогласований достигались аналогичные результаты по оценке рассогласований БСТЗ.

**Учет рассогласований в измерениях БСТЗ, выявленных посредством информационного и корреляционного анализа стереопары**

Одним из преимуществ рассмотренного метода калибровки БСТЗ является возможность получения оценок рассогласований в системе, если эти рассогласования физически невозможно устранить. Оценки рассогласований должны быть учтены при измерениях рассогласованной БСТЗ. Эксперимент, иллюстрирующий эффективность использования оценок неустраненных рассогласований при измерениях рассогласованной БСТЗ, проводился по следующей схеме. Имеется БСТЗ с известными параметрами. Задан набор случайных, равномерно распределенных в измерительном пространстве точек сцены. Измерительное пространство БСТЗ [1,2] ограничено по глубине сцены заданной диспарантностью.

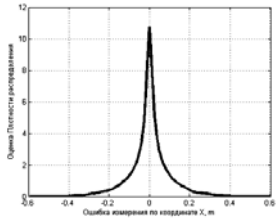
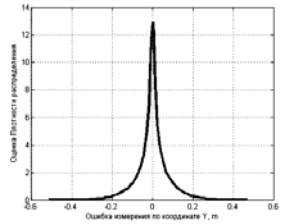
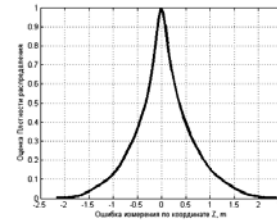
1) Производится измерение координат точек сцены идеально согласованной БСТЗ. Определяются параметры качества измерений (среднеквадратические отклонения (СКО) и среднее ошибок измерений) по всем координатам.
2) В БСТЗ вводятся рассогласования параметров $\mathbf{\Delta}\neq 0$. На том же наборе случайных точек сцены производится измерение их координат рассогласованной системой. Определяются параметры качества измерений по всем координатам при наличии рассогласований.
3) Проведением калибровки производится оценка $\hat{\mathbf{\Delta}}$ рассогласований параметров БСТЗ. Оценки рассогласований $\hat{\mathbf{\Delta}}$ учитываются при производстве измерений $(\mathbf{\Delta}-\hat{\mathbf{\Delta}})$ рассогласованной БСТЗ на исходном наборе случайных точек сцены. Определяются параметры качества измерений БСТЗ по всем координатам при учете рассогласований.

В модельном эксперименте зона измерений БСТЗ, с указанными ранее параметрами, ограничена диспарантностью $d_\Delta \geq 25$, или максимальная глубина [1] измерений составляет

$$Z_{\max}(d_\Delta = 25) = \frac{f}{\Delta_x} * \frac{b}{d_\Delta - 1} = \frac{8*10^{-3}*0{,}5}{3*10^{-6}*(25-1)} \approx 55{,}56 \text{ (м)}.$$

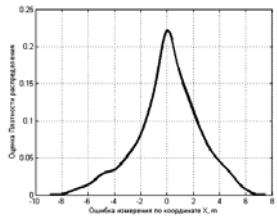
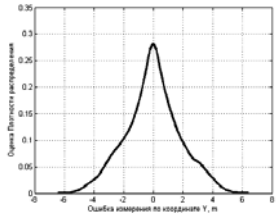
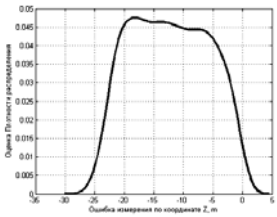
Объем набора случайных, равномерно распределенных точек сцены $Q$=32000. Результаты расчета качества измерений идеально согласованной БСТЗ представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры качества измерений согласованной БСТЗ

| Статистические распределения и центральные моменты распределений ошибок измерений | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| $\bar{\varepsilon}_x\big\|_{\Delta=0} \approx 0$ м, $\hat{\sigma}[\varepsilon_x]\big\|_{\Delta=0} \approx 0{,}103$ м. | $\bar{\varepsilon}_y\big\|_{\Delta=0} \approx 0$ м, $\hat{\sigma}[\varepsilon_y]\big\|_{\Delta=0} \approx 0{,}078$ м. | $\bar{\varepsilon}_z\big\|_{\Delta=0} \approx 0{,}04$ м, $\hat{\sigma}[\varepsilon_z]\big\|_{\Delta=0} \approx 0{,}595$ м. |

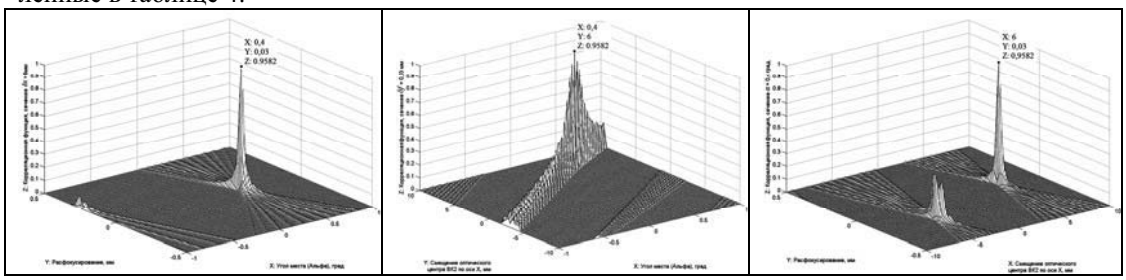
При значениях рассогласований $\mathbf{\Delta}$ БСТЗ δf = 0,03 мм; α=0,4 градус; β=0 градус; γ=0 градус; δx=6 мм; δy=0 мм; δz=0 мм параметры качества измерений представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры качества измерений рассогласованной БСТЗ

| Статистические распределения и центральные моменты распределений ошибок измерений | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| $\bar{\varepsilon}_x\big\|_{\Delta\neq 0} \approx 0,08$ м, $\hat{\sigma}\left[\varepsilon_x\right]\big\|_{\Delta\neq 0} \approx 2,41$ м. | $\bar{\varepsilon}_y\big\|_{\Delta\neq 0} \approx -0,03$ м, $\hat{\sigma}\left[\varepsilon_y\right]\big\|_{\Delta\neq 0} \approx 1,82$ м. | $\bar{\varepsilon}_z\big\|_{\Delta\neq 0} \approx -12,34$ м, $\hat{\sigma}\left[\varepsilon_z\right]\big\|_{\Delta\neq 0} \approx 6,44$ м. |

Выбор значимых рассогласований $\boldsymbol{\Delta}$ БСТЗ в эксперименте не случаен. Такой набор имитирует один из худших вариантов рассогласований [3]. Полученные данные свидетельствуют о многократном увеличении СКО ошибок измерений по сравнению с согласованной БСТЗ. Кроме того, наблюдается значительный рост среднего ошибок измерений по координате *Z*. Отличными от нуля стали и значения средних ошибок измерений по координатам *X* и *Y*.

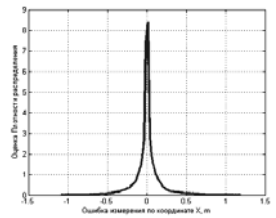
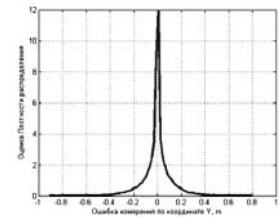
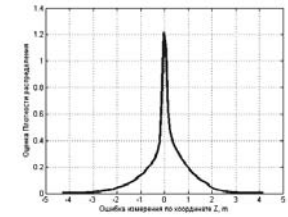
Проведением калибровки определена (рисунок 5) оценка $\hat{\boldsymbol{\Delta}}$ вектора рассогласований: $\hat{\delta} f = 0,03$ мм; $\hat{\alpha} = 0,4$ градус; $\hat{\beta} = 0$ градус; $\hat{\gamma} = 0$ градус; $\hat{\delta} x = 6$ мм; $\hat{\delta} y = 0$ мм; $\hat{\delta} z = 0$ мм. При учете выявленных рассогласований в измерениях БСТЗ получены показатели качества, представленные в таблице 4.



*а)* *б)* *в)*

Рисунок 5 - Сечения нормированной взаимокорреляционной функции изображений первой и второй ВК в плоскостях рассогласований: *а)α-δf* при $\hat{\delta} x = 6$ мм; *б)α-δx* при $\hat{\delta} f = 0,03$ мм; *в)δx-δf* при $\hat{\alpha} = 0,4$ градус

Таблица 4 - Параметры качества измерений при учете рассогласований

| Статистические распределения и центральные моменты распределений ошибок измерений | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| $\bar{\varepsilon}_x\big\|_{\Delta\text{-}\hat{\Delta}} \approx 0,004$ м, $\hat{\sigma}\left[\varepsilon_x\right]\big\|_{\Delta\text{-}\hat{\Delta}} \approx 0,167$ м. | $\bar{\varepsilon}_y\big\|_{\Delta\text{-}\hat{\Delta}} \approx -0,001$ м, $\hat{\sigma}\left[\varepsilon_y\right]\big\|_{\Delta\text{-}\hat{\Delta}} \approx 0,118$ м. | $\bar{\varepsilon}_z\big\|_{\Delta\text{-}\hat{\Delta}} \approx 0,048$ м, $\hat{\sigma}\left[\varepsilon_z\right]\big\|_{\Delta\text{-}\hat{\Delta}} \approx 0,899$ м. |

Полученные данные свидетельствуют о значительном уменьшении СКО ошибок измерений по всем координатам и приближении их значений к значениям для согласованной БСТЗ.

Значения средних ошибок измерений по всем координатам после учета в измерениях оценок рассогласований не существенно отличаются от значений для согласованной БСТЗ.

**Заключение**

Полученные результаты свидетельствуют о возможности совместного использования информационного и корреляционного анализа для калибровки цифровой БСТЗ. Путем создания идентичных тестовых сцен для каждой из ВК удается избежать параллакса наблюдаемой сцены в стереопаре и тем самым обеспечить высокую точность метода калибровки БСТЗ.

Одним из преимуществ рассмотренного метода калибровки БСТЗ является получение оценок рассогласований, если эти рассогласования физически невозможно устранить. При учете оценок рассогласований в измерениях рассогласованной БСТЗ может быть достигнуто приемлемое качество измерений.

**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. Т. 7. № 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] Кравцов С.В. Зависимость точности идентификации точечных объектов от рассогласований параметров стереоскопического измерителя // Информационное противодействие угрозам терроризма. 2011. № 17. С. 31-52.

# АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СЕРВОПРИВОДОМ С НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛЬЮ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

**В.Е. Кузнецов, А.В. Кузнецов, Д.М. Филатов, Ян Чжан**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
"ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)
19737, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, Россия
тел: (812) 234-68-18, факс: (812) 234-68-18

***Ключевые слова:*** *сервопривод, модель линейного электродвигателя, нелинейные характеристики, закон адаптивного управления*

**Abstract**

Opportunities of suppression of influence of nonlinear factors in linear (on moving) the electric motor model with the purpose of improvement of its characteristics, especially in the field of small signals are presented in this report. The first opportunity is an application of a current circuit for controlling windings, and secondly the adaptive controller with the subsequent design of a following drive for steering system of the maneuverable plane is considered.

## Введение

Формирования новых требований к рулевым системам самолета основаны на обеспечении его управляемости и качества динамики во всех эксплуатационных режимах, особенно для самолетов с неустойчивой аэродинамической компоновкой. В рулевых системах в области малого сигнала существует ряд факторов, которые снижают динамические и статические характеристики системы, а именно: существенные нелинейности и нестационарность характеристик линейного (по перемещению) электродвигателя (ЛЭД) и золотниковых гидрораспредителей. Для облегчения формирование адаптивного закона управления следящим контуром сервопривода, содержащего ЛЭД, предлагается его математическая модель, составленная с учетом параметров магнитной цепи и включающая в себя новые нелинейные статические характеристики, полученные аналитически. В результате исследований сформирован новый алгоритм адаптивного регулятора, сочетающий в себе принцип эталонной и настраиваемой модели за счет введения ограничений в сигналы настройки модели и контура управления, что позволило уменьшить влияние нелинейных статических характеристик линейного электродвигателя и гидроузлов с различными значениями крутизны их характеристик в зависимости от уровней входного сигнала. Особое место отводится выполнению требований, предъявляемых к частотным характеристикам рулевого привода, в области рабочих (низких) частот при малой амплитуде, что чрезвычайно актуально при цифровой реализации законов управления.

Целью доклада является представление результатов исследования адаптивных регуляторов для авиационных электрогидравлических рулевых систем, обеспечивающих последним повышение динамической точности и стабилизацию характеристик в условиях влияния нелинейностей и изменении параметров, при действии внешних возмущений и нагрузки.

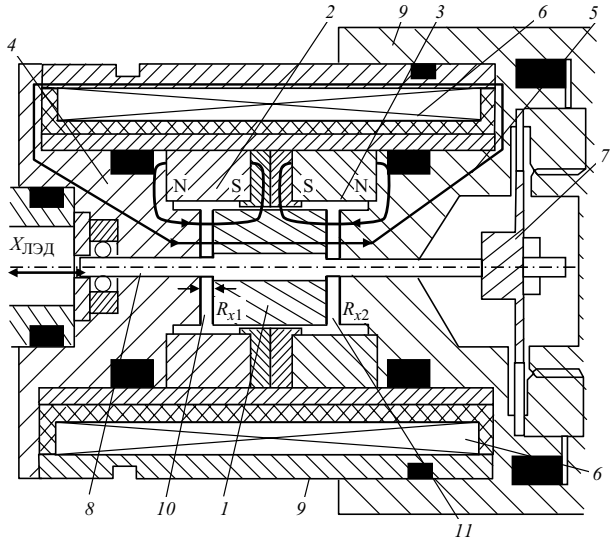
## Основные результаты

**1**. ***Модель ЛЭД.*** Для схемы линейного электродвигателя, представленной на рисунке 1, приводится построение его модели с учетом принятых допущений: – однородности поля, ненасыщенной магнитной системы, пренебрежения потоками рассеяния, пренебрежения сопро-

тивлениями нерабочих зазоров. Модель строится по схемам замещения (рисунки 2 и 3) с учетом параметров магнитной цепи – сопротивлений воздушных зазоров

$R_{x1} = (1-\overline{x})R_{x0}$; $R_{x2} = (1+\overline{x})R_{x0}$,

и сопротивлений постоянных магнитов ПМ $R_{\text{м}} = R_{\text{м1}} = R_{\text{м2}}$, где $R_{x0} = \delta/\mu_0 S_f$ $\overline{x} = x/\delta$, $\delta$ – воздушный зазор в среднем положении двигателя, $x$ – абсолютное перемещение якоря ЛЭД; $S_f$ – площадь полюсных наконечников.




1 – якорь, 2,3– постоянные магниты, 4,5 –полюсные наконечники, 6 – обмотка управления ОУ, 7 – центрирующая пружина, 8 – шток, 9 – стакан, 10,11– воздушные зазоры

Рисунок 1– Принципиальная схема линейного электродвигателя

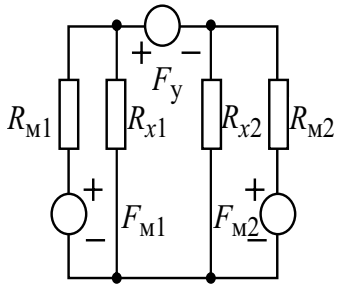



Рисунок 2 – Схема замещения магнитной цепи

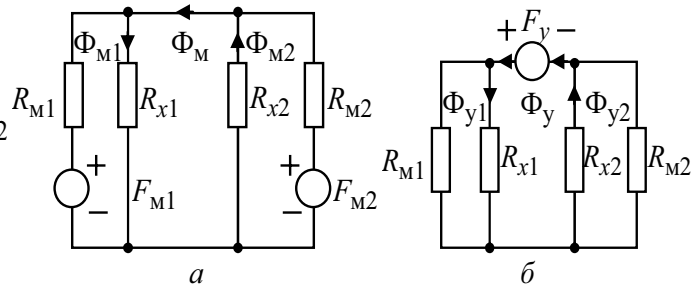



Рисунок 3 – Схемы замещения магнитных цепей:
*а* – для потоков подмагничивания; *б* – для потока управления

Из схемы ЛЭД на рисунках 1 и 2 следует выражение для его электромагнитной силы:

$$f = \frac{1}{2\mu_0 S_f}\left[(\Phi_{\text{м1}} + \Phi_{\text{у1}})^2 - (\Phi_{\text{м2}} - \Phi_{\text{у2}})^2\right],$$

где $\Phi_{\text{м1}}, \Phi_{\text{у1}}, \Phi_{\text{м2}}, \Phi_{\text{у2}}$ – соответственно, магнитные потоки в левом и правом зазорах от МДС ПМ ($F_{\text{м}}$) и МДС ОУ ($F_{\text{у}} = wI$). Определяя магнитные потоки из схем замещения (рисунки 3а-3б), отдельно для потоков подмагничивания и управления, получаем нелинейную зависимость силы ЛЭД от параметров цепи

(1) $$f_{эм} = \frac{\kappa}{\left(\bar{R}_м + 1 - \bar{x}^2\right)^2}\left[2\left(\bar{R}_м + 1 + \bar{x}^2\right)F_м F_у + \left(\frac{4F_м^2}{\delta} + \frac{\left(\bar{R}_м + 1\right)F_у^2}{\delta}\right)x\right],$$

где $\kappa = \left(2\mu_0 S_f R_{x0}^2\right)^{-1}$, $\bar{R}_м = R_м / R_{x0}$.

Для определения электромагнитных параметров ЛЭД используется уравнение баланса напряжений ЛЭД с учетом закона электромагнитной индукции и результирующего магнитного потока от всех источников в следующем виде

(2) $$u = Ri + L\left(F_у, \bar{x}\right)\frac{di}{dt} + C_e\left(F_у, \bar{x}\right)\frac{dx}{dt}.$$

где $u$, $i$, $R$, $w$ – соответственно, напряжение, ток, сопротивление и число витков ОУ ЛЭД; Ф – полный магнитный поток через катушку. Коэффициенты $C_e$ и $L$ определяются выражениями:

(3) $$L\left(F_у, \bar{x}\right) = w^2\frac{\partial \Phi}{\partial F_у} = \frac{w^2\left[\left(\bar{R}_м + 1\right)^2 - \bar{x}^2\right]}{2\bar{R}_м\left(\bar{R}_м + 1 - \bar{x}^2\right)},\ C_e\left(F_у, \bar{x}\right) = \frac{w\left(\bar{R}_м + 1\right)F_у\bar{x} + wF_м\left(\bar{R}_м + 1 + \bar{x}^2\right)}{R_{x0}\left(\bar{R}_м + 1 - \bar{x}^2\right)^2\delta}.$$

Для обеспечения требуемой механической характеристики ЛЭД в исследованиях проведена оценка жесткости $C$ центрирующей механической пружины ЛЭД с учетом выбора жесткости «магнитной» пружины $C_м$ в соответствии с условием $C = 2C_м$. С учетом выбранной механической жесткости ЛЭД получается уравнение его движения

(4) $$f_{эм} = m_{ЛЭД}\ddot{x} + b_{ЛЭД}\dot{x} + Cx + f_н,$$

где $m_{ЛЭД}$ – масса подвижной части; $b_{ЛЭД}$ – коэффициент вязкого трения; $f_н$ – внешняя сила.

**2**. ***Полная модель ЛЭД и ее упрощения.*** Применимость математической модели ЛЭД по уравнениям (1) – (4) основана на выполнении ряда предпосылок.

1) В качестве объектов модели ЛЭД рассматриваются только двигатели с постоянными магнитами, где максимальная МДС ОУ $F_у = F_{у max}$ соотносится с МДС ПМ $F_м$ следующим образом $F_{у max} = (0.1...0.16)F_м$.
2) Рассматриваются двигатели с величиной относительного магнитного сопротивления ПМ в пределах $\bar{R}_м = 7...10$.
3) Рассматриваемые двигатели перемещаются в малом относительно нуля.

При выполнении всех предпосылок сразу, математическая модель ЛЭД принимает линейное описание. В этом случае уравнение линеаризованной статической характеристики ЛЭД, определяющее электромагнитную силу $f_{эм}$, полученную по уравнению (1) вблизи среднего положения примет вид

(5) $$f_{эм} = K_у F_у + C_м x = K_{FI} I + C_м x,$$

где $K_у = \frac{2\kappa F_м}{\bar{R}_м + 1}$, $C_м = \frac{4\kappa F_м^2}{\left(\bar{R}_м + 1\right)^2\delta}$. А уравнение (2), определяющее электромагнитные параметры ЛЭД, имеет постоянные коэффициенты: $L = L_0 = \frac{w^2(\bar{R}_м + 1)}{2R_м}$; $C_e = C_{e0} = \frac{F_м w}{R_{x0}(\bar{R}_м + 1)\delta}$.

В наиболее общем случае, т. е. при выполнении только условия 1, статическая механическая характеристика ЛЭД – нелинейная. Нелинейным получается и уравнение силы ЛЭД

(6) $$f_{\text{ЛЭД}} = \frac{2\kappa F_{\text{м}}\left(\bar{R}_{\text{м}} + 1 + \bar{x}^2\right)F_{\text{у}}}{\left(\bar{R}_{\text{м}} + 1 - \bar{x}^2\right)^2} + \left(\frac{4\kappa F_{\text{м}}^2}{\left(\bar{R}_{\text{м}} + 1 - \bar{x}^2\right)^2 \delta} - C\right)x .$$

Проведем оценку функциональной зависимости силы ЛЭД (6) с помощью приближенного описания формы нелинейных зависимостей слагаемых уравнения.

Нелинейную зависимость изменения силы (6) первого слагаемого ( $f_{\text{т}}$ ), определим с помощью формальной замены переменных: перемещения $\bar{x}$ – на силу тока (МДС ОУ $F_{\text{у}}$ ) в первом слагаемом уравнения (6), что следует из принципа построения пропорционального управления линейным двигателем. Поэтому форму нелинейной зависимость силы тяги ЛЭД для построения его модели приближенно определим следующим образом

$$f_{\text{т}} = \frac{2\kappa F_{\text{м}} F_{\text{у}\max}\left(\bar{R}_{\text{м}} + 1 + \bar{F}_{\text{у}}^2\right)\bar{F}_{\text{у}}}{\left(\bar{R}_{\text{м}} + 1 - \bar{F}_{\text{у}}^2\right)^2}.$$

Второе слагаемое в (6.41) (в скобках) является результирующей силой упругости «магнитной» и механических и пружин

$$f_{\Sigma\text{упр}} = \left(\frac{4\kappa F_{\text{м}}^2}{\left(\bar{R}_{\text{м}} + 1 - \bar{x}^2\right)^2 \delta} - C\delta\right)\bar{x} .$$

Суммарная сила упругости в заданной области перемещения имеет два экстремума, при достижении которых ЛЭД снижает статическую жесткость. Последнее обстоятельство вынуждает на практике сокращать ход ЛЭД до величины, равной 1/3 рабочего зазора двигателя $\delta$ , где градиент изменения нелинейной характеристики незначителен.

С учетом указанных особенностей нелинейных зависимостей, математическая модель ЛЭД может быть представлена в виде структурной схемы на рисунке 4.

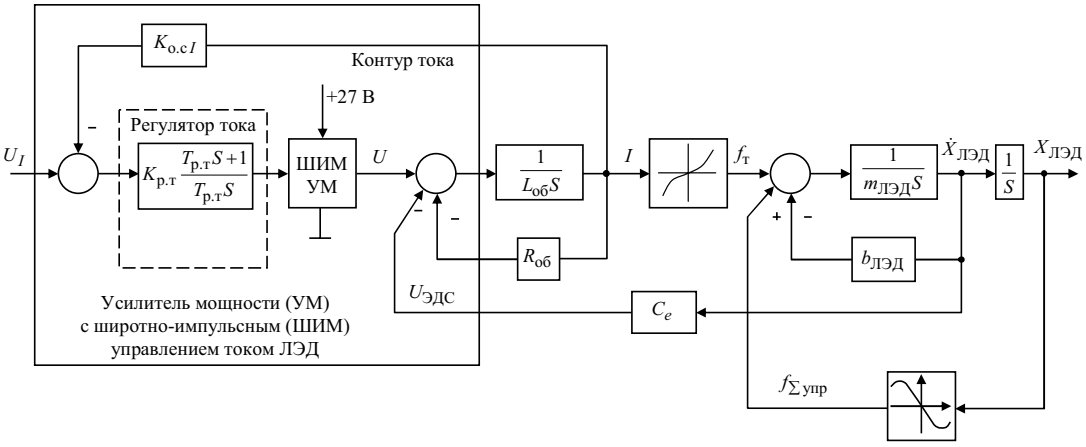



Рисунок 4 – Нелинейная модель линейного электродвигателя

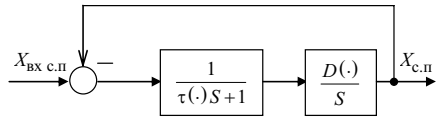
Математическое описание механической части ЛЭД с учетом нелинейных статических характеристик ЛЭД может быть представлена в виде

$$K_{FI} I = m_{\text{ЛЭД}} \ddot{X}_{\text{ЛЭД}} + b_{\text{ЛЭД}} \dot{X}_{\text{ЛЭД}} + f_{\Sigma\text{упр}}\left(X_{\text{ЛЭД}}\right),$$

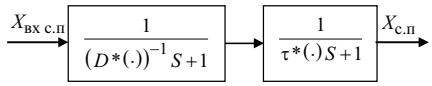
где $K_{FI}$ – функциональная зависимость силы тяги ЛЭД по току управления (может быть аппроксимирована кусочно-линейной функцией). Ограничение максимального тока управления $\left(I_{\max} \approx 1\,\text{А}\right)$ и перемещения подвижной системы ЛЭД существенно линеаризует его характе-

ристику позиционирования. Для уменьшения влияния ЭДС двигателя, при требуемой полосе пропускания сервопривода с ЛЭД в пределах 30…50Гц, необходимо обеспечивать полосу пропускания контура тока на порядок большую, за счет соответствующих настроек регулятора тока. При ограничении рабочего хода якоря ЛЭД $\left(\left|X_{\text{ЛЭД}}\right| \le 0.5 \text{ мм}\right)$ нелинейную зависимость $f_{\Sigma \text{упр}}\left(X_{\text{ЛЭД}}\right)$ допустимо считать линейной. Собственная частота упругой подвижной системы ЛЭД – «якорь – пружина» находится правее частоты 300Гц, поэтому для синтеза алгоритмов управления в требуемой полосе частот сервопривода допускается представление динамических свойств ЛЭД нелинейным фильтром первого порядка со следующими параметрами: регулировочный коэффициент $K_{XI}\left(a_I\right)$ при условии $C - C_{\text{м}} = \text{const}$ эквивалентен $K_{XI} = K_{FI}\left(C - C_{\text{м}}\right)^{-1}$ – тяговой характеристике ЛЭД; $T_{\text{сп}} = T_{\text{ЛЭД}}$ – постоянная времени подвижной системы ЛЭД , $a_I$ – амплитуда тока.

**3**. ***Адаптивное управление***. Для синтеза закона управления, при использовании рассматриваемого подхода, модель контура сервопривода может быть представлена таким образом:




Здесь $D(\cdot)$ – «функциональная добротность» контура привода; τ(·) – «постоянная времени» ЛЭД. Поскольку, как правило, $D(\cdot) << \tau^{-1}(\cdot)$, то модель контура сервопривода допустимо преобразовать к виду

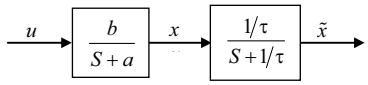



Здесь $D^*(\cdot)$ и $D(\cdot)$, $\tau^*(\cdot)$ и $\tau(\cdot)$ – соответственно, близкие величины. В рассматриваемых схемах указанные параметры отличаются друг от друга

$$D^* - D = \Delta_D, \quad \omega - \omega^* = \Delta_\omega, \quad \omega = \tau^{-1}, \quad \omega^* = 1/\tau^* .$$

Погрешность $\Delta_D$, $\Delta_\omega$ преобразования будет убывать по мере разнесения частот среза контура и малоинерционного фильтра с постоянной времени $\tau^*$.

Для синтеза адаптивных законов управления представим модель контура в удобной форме:




Здесь $a$, $b$ – параметры, полученные усреднением функциональных зависимостей τ(·) и $D(\cdot)$.

*Особенности адаптивной системы с эталонной моделью (ЭМ) с учетом малого параметра.*

Уравнения адаптивной системы с ЭМ состоят из описаний объекта управления, малоинерционного звена, эталонной модели и сигнального адаптивного алгоритма:

(7) $\dot{x} = -ax + bu,\ u = g + z;$

(8) $\tau\dot{\tilde{x}} = -\tilde{x} + x;$

(9) $\dot{x}_{\text{м}} = -a_{\text{м}}x_{\text{м}} + b_{\text{м}}g;$

(10) $z = -h\,\text{sign}\ b_{\text{м}}\left(\tilde{x} - x_{\text{м}}\right),$

где $a = a(x, t)$ и $b = b(x, t)$ – локально ограниченные функции; $\tau$ – малый параметр; $a_м$ и $b_м$ – параметры эталонной модели. Зададим модель фильтра (8) в операторном виде $\tilde{x} = Fx,\ F = (\tau D_t + 1)^{-1}$, где $D_t = d/dt$ – оператор дифференцирования.

Исследования показали, что при учете малого параметра сигнальный адаптивный алгоритм (10) обнаруживает свойства диссипативности процессов адаптации. Что проявило себя в том, что параметр $h$ адаптивного алгоритма на промежутке времени $t \le 3\tau$ является функцией малого параметра $h(t, \tau)$. Качество слежения за эталонной моделью при адаптации будет снижаться с увеличением постоянной $\tau$. Поэтому в этом случае для улучшения качества управления необходимо введение дифференциальной составляющей в сигнал адаптации $z$.

*Синтез адаптивной системы с настраиваемой моделью (НМ) с учетом малого параметра.*

В качестве НМ используется стационарный наблюдатель состояния первого порядка. Уравнения адаптивной системы с НМ состоят из описаний: объекта управления, где выделена стационарная часть с параметрами $a_0$, $b_0$; малоинерционного звена с постоянной времени $\tau$; настраиваемой модели и адаптивного алгоритма:

(11) $\dot{x} = -a_0 x + b_0 u + (a_0 - a)x + (b - b_0)u,\ u = g + \mu,$

(12) $\tau\dot{\tilde{x}} = -\tilde{x} + x,\ \tilde{x} = Fx,\ F = \dfrac{1}{\tau D_t + 1},\ D_t = d/dt,$

(13) $\dot{\hat{x}} = -(a_0 + g_1)\hat{x} + g_1\tilde{x} + b_0 u + b_0 z,$

(14) $z = h\,\mathrm{sign}\, b_0(\tilde{x} - \hat{x}),\ \mu = -b_0^{-1} F_f F^{-1} z,\ F_f = (T_f D_t + 1)^{-1},\ F^{-1} = \tau D_t + 1.$

Синтез адаптивного регулятора с НМ с учетом $\tau$ выявил следующие особенности:

Адаптивная система (11) – (14) по управлению (адаптации) диссипативна.

Механизм сигнальной адаптации содержит оператор дифференцирования $F^{-1} = \tau D_t + 1$.

**4.** ***Адаптивный регулятор.*** С учетом указанных особенностей и практической реализуемости алгоритма на микроконтроллере, схема адаптивного регулятора с перестраиваемой моделью, показанная на рисунок 5, включает в себя следующие отличия.

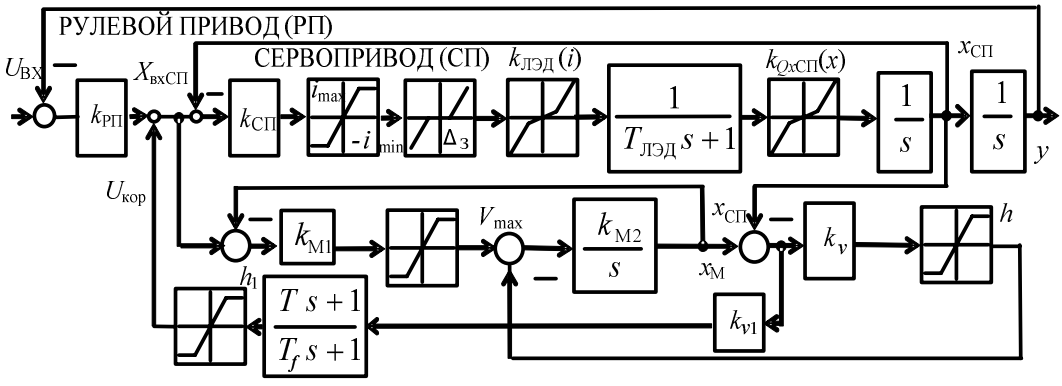



Рисунок 5 – Адаптивный регулятор сервопривода с ЛЭД

Для удобства цифровой реализации адаптивного регулятора производится замена знаковой функции **sign** в адаптивном механизме (14) и (18) на функцию ограничения **sat**.

В модель объекта вводится ограничение на ее скорость $V_{max}$ в момент ограничения скорости объекта управления.

При малых сигналах управления (до наступления ограничения в объекте), согласование движения модели и объекта управления производится в соответствие с уравнениями (11)–(14) и схемой реализации АР, показанной на рисунке 5.

При больших сигналах управления, когда скорости объекта и модели ограничены, ограничивается и сигнал согласования модели. В этом случае адаптивный механизм перестраивает систему на работу с ЭМ. Адаптивный механизм формирует сигнальное адаптивное воздействие в виде линейной комбинации составляющих вектора ошибки с учетом ограничения $h_1$ и дифференцирования с малоинерционной фильтрацией.

**Заключение**

Результаты исследования показали высокую эффективность адаптивного регулятора, что подтверждается частотными характеристиками сервопривода (рисунок 6) двухконтурной цифровой рулевой системы без адаптивного регулятора и при его включении.

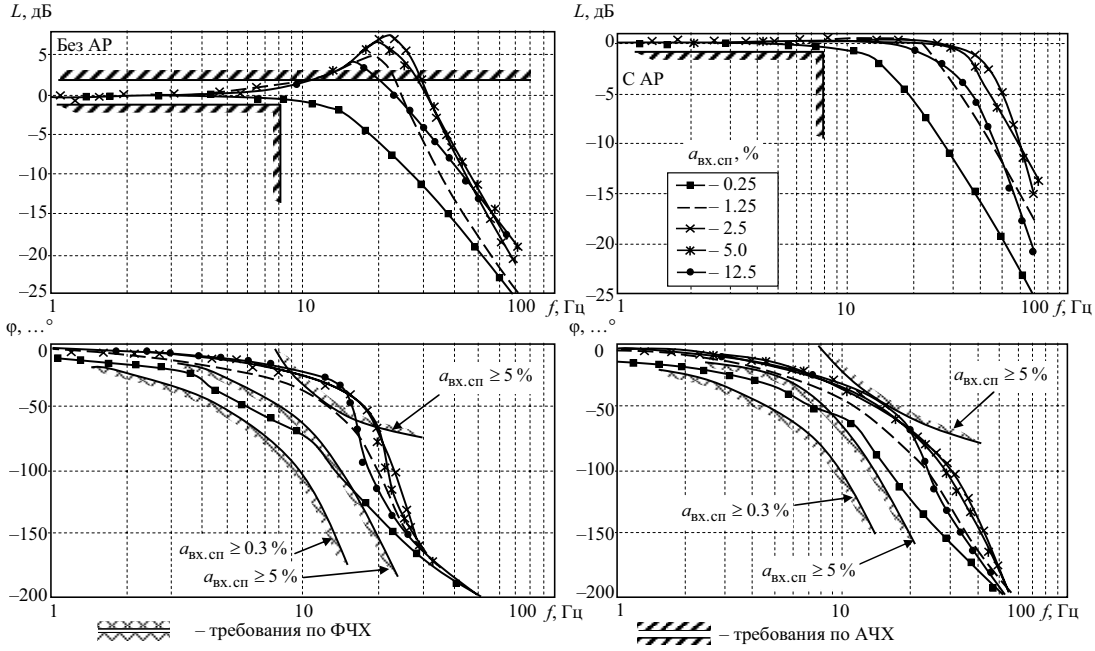



Рисунок 6 – ЛЧХ сервопривода с ЛЭД при Тсп = 0.01с

На рисунке 6 продемонстрирована эффективность включения АР, заключающаяся в отсутствии подъемов АЧХ за требуемую границу, сближении ФЧХ сервопривода на малых уровнях управляющего сигнала к характеристикам при больших уровнях в требуемой полосе пропускания и границах фазового диапазона. Это свидетельствует о линеаризации нелинейностей ЛЭД и сервопривода, повышении демпфированности внутреннего контура и, как следствие, повышении динамической точности рулевой системы.

**Благодарности**

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по программе ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг в рамках мероприятия №1.2.2 по гос. контракту №698 от 20.05.10.

**Список литературы**

[1] Применение новых подходов для разработок рулевых приводов перспективных маневренных самолетов / С. В. Константинов, П. Г. Редько, А. В. Кузнецов и др. // Общерос. науч.-техн. жур. «Полет». 2009. № 3. С. 28–37.

[2] Борцов Ю. А., Поляхов Н. Д., Путов В. В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 216 с.

# МЕТОДЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**А.В. Саушев, В.А. Шошмин**

Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, Россия
ep-spguvk@bk.ru
тел: +7 (812) 334-38-34, факс: +7 (812) 251-01-14

***Ключевые слова:*** *управление состоянием, параметрический синтез, запас работоспособности, область работоспособности, техническая система*

**Abstract**

The structure of managerial process is considered by a condition of technical system. Definition is resulted and classification of various kinds of a category a condition is given. From a position of parametrical management the condition considers problems which take place at various stages of life cycle of system. Methods of the decision of these problems, based on the information on border of area of working capacity of system are stated.

## Введение

Процесс управления состоянием технических систем (ТС) включает в свой состав целый комплекс задач анализа и синтеза, имеющих место на различных этапах и стадиях их жизненного цикла. До последнего времени эти задачи рассматривались изолированно и независимо одна от другой, хотя при более общем взгляде все они оказываются тесно связанными. Объединяющим началом является то, что их решение сводится к изучению целенаправленных и случайных процессов изменения структуры и параметров элементов ТС, определяющих качество их работы, способы и принципы управления этим процессом.

Важнейшей составляющей процесса управления состоянием ТС является параметрическое управление, которое предусматривает решение задач параметрического синтеза, контроля и прогнозирования ТС. Все эти задачи следует рассматривать комплексно. Основой для их решения является информация о границе области работоспособности системы. В статье рассматриваются методологические основы процесса параметрического управления состоянием ТС и методы решения основных задач, составляющих этот процесс.

## 1 Структура процесса управления состоянием технической системы

Под состоянием ТС будем понимать внутреннюю определенность ТС, характеризуемую в рассматриваемый момент времени признаками, установленными технической документацией на ТС, которые являются начальными условиями процессов их дальнейшего изменения [1].

Совокупность внутренних свойств ТС и их характеристик в некоторый фиксированный момент времени определяет ее *внутреннее* или, что тоже, *материально–структурное состояние*. Это состояние характеризуется сочетанием *состояния комплектующих элементов* ТС и ее *коммутационного состояния*, которое определяется видом структуры системы и, в частности, положением различных переключающих устройств, связанных с пуском, реверсом, включением нагрузки и т.п. Совокупность функциональных свойств и выходных параметров ТС в некоторый фиксированный момент времени определяет ее *функциональное состояние*.

Кроме рассмотренных видов состояний можно также выделить *состояние среды*, которое определяет режим работы ТС, т.е. является режимным состоянием (в широком смысле). В свя-

зи с тем, что часть внешних воздействий целенаправленно изменяют (задают) обслуживающий персонал или автоматы, состояние среды целесообразно представить двумя группами: *режимом работы* (в узком смысле) и *состоянием условий использования* ТС, которые определяются атмосферными условиями, степенью "нагруженности" элементов, качеством технического обслуживания и ремонта и т.п. Все множества состояний ТС взаимосвязаны и соответствуют многообразию различаемых в эксплуатации видов технического состояния.

Для раскрытия сущности эволюции состояния ТС следует выделять структурные и параметрические возмущения [1, 2]. *Параметрические возмущения* обусловлены непрерывным изменением интенсивности свойств комплектующих элементов ТС вследствие их старения, износа и действия внешних возмущающих воздействий. Эти возмущения приводят к непрерывному накоплению параметрических отклонений и, как следствие, к изменению запаса работоспособности системы, каждому уровню которого в соответствии с заданной дискретностью, ставится в соответствие определенное состояние. *Структурные возмущения*, в отличие от параметрических возмущений, приводят к накоплению структурных отклонений и, как следствие, к потере одного или нескольких свойств комплектующих элементов, что отражается на изменении структуры системы и, в конечном счете, приводит к ее внезапному отказу.

Качество и эффективность работы ТС определяются способами управления процессами формирования и сохранения ее необходимых свойств и значений параметров на всех этапах и стадиях жизненного цикла: при исследовании, проектировании, изготовлении, обращении, эксплуатации. При этом под *управлением состоянием* ТС будем понимать целенаправленный процесс изменения управляющих воздействий, внутренних параметров и структуры системы с целью предупреждения и устранения отказов ее элементов и достижения оптимального по заданному критерию качества функционирования.

В наиболее общем виде процесс управления состоянием ТС, охватывающий все стадии и этапы ее жизненного цикла, можно представить в виде структурной схемы, приведенной на рисунке. В качестве объекта управления выступают свойства и параметры ТС и составляющих ее элементов. Можно выделить три контура управления состоянием – параметрическое, координатное и структурное.

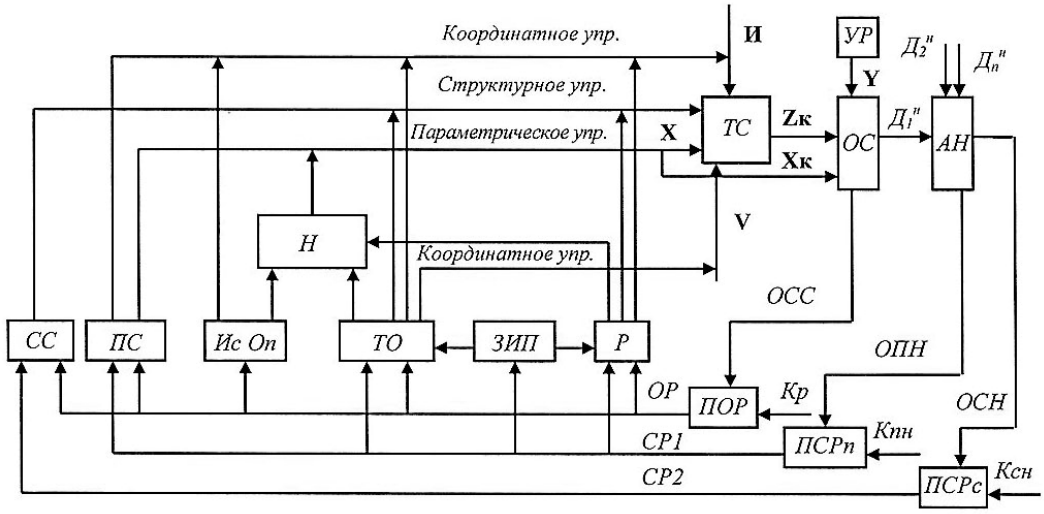



Рисунок 1 – Структура процесса управления состоянием технической системы

*Параметрическое управление* предполагает целенаправленное воздействие на внутренние параметры **X** ТС. При *координатном управлении* эти воздействия представляют собой из-

менение параметров входных сигналов **u** и параметров внешних воздействий **v**, определяющих условия эксплуатации ТС. При *структурном управлении* управляющими воздействиями являются изменения состава элементов ТС и (или) связей между ними. Необходимым условием для реализации любого контура управления является возможность определения состояния ТС и ее элементов в любой момент времени.

При оперативном управлении по состоянию принятие оперативного решения (*ПОР*) осуществляется с учетом требований заданного критерия работоспособности $K_p$ ТС. Принятие статистического решения (*ПСРп* и *ПСРс*) производится на основе оценки параметрической надежности (*ОПН*) и оценки структурной надежности (*ОСН*), которые получают в результате анализа надежности (*АН*) по донесениям $Д_1^н, Д_2^н, ... Д_n^н$ об изменениях технического состояния, постепенных и внезапных отказах элементов ТС. При этом учитываются требования критериев параметрической надежности $\hat{E}_{\ddot{i}\acute{i}}$ и структурной надежности $K_{сн}$. Оперативное решение (*ОР*) определяет на стадии эксплуатации ТС необходимый объем технического обслуживания (*ТО*) или ремонта (*Р*) по состоянию, а также виды структурного синтеза (*СС*).

Параметрическое управление при испытании опытных образцов (*ИсОп*), осуществляется в результате выполнения операции настройки (*Н*). Структурный синтез реализуется в виде функций реконфигурации структуры системы и аварийной защиты. На стадии проектирования решение предполагает выполнение структурного синтеза (поиск варианта технического решения, выбор оптимального по заданному критерию варианта) и параметрического синтеза (*ПС*). Статистическое решение (*СР1*) на стадии эксплуатации предусматривает регламентированное техническое обслуживание и ремонт, а на стадии проектирования – реализацию задачи параметрического синтеза по критерию, учитывающему показатели параметрической надежности ТС. Статистическое решение (*СР2*) предполагает на стадии проектирования реализацию функции резервирования, с целью обеспечения требуемой структурной надежности.

Рассмотренный процесс управления состоянием ТС является замкнутым. Важнейшей задачей, как это видно из рисунка, является реализация процесса параметрического управления состоянием ТС. Для оптимального управления этим процессом необходима разработка теории, методов и средств по комплексному решению задач параметрического синтеза, настройки и оценки состояния ТС, имеющих место на различных этапах ее жизненного цикла.

## 2 Задачи параметрического управления состоянием технической системы

Задача параметрического синтеза, результатом которой является определение номинальных значений внутренних параметров (номиналов) ТС и допустимых пределов их изменения (допусков) решается на этапе эскизного проектирования. При этом внутренние параметры являются управляемыми параметрами. Расчет этих параметров оптимальный с позиции некоторого критерия при заданной структуре системы, называют *параметрической оптимизацией*. Помимо оптимизации номиналов и допусков параметрическая оптимизация решает и задачу оптимизации технических требований, предъявляемых к внутренним параметрам системы.

Оптимизация технических требований и допусков отличается от оптимизации номиналов тем, что здесь в итоге определяется не одна точка, характеризующая номинальные значения внутренних параметров, а некоторая область в пространстве этих параметров. Эта область определяет классы точности комплектующих элементов системы и характеризует диапазоны допускаемых значений параметров, при которых обеспечивается работоспособность системы, а также достигается экстремальное значение выбранной целевой функции.

Рассмотренный выше процесс управления является итерационным и предполагает неоднократное выполнение задач анализа, позволяющих оценить состояние ТС при различных вариантах ее структуры и некоторых фиксированных значениях внутренних параметров. Такая оценка возможна в результате выделения опорных значений параметров, к которым относятся:

$X_{\text{ном}}$ – номинальное значение (служит началом отсчета отклонений); $X_{\text{доп}}$ – допустимое наибольшее или наименьшее значение, при достижении которого недопустимо снижается качество функционирования ТС; $X_{\text{пред}}$ – предельное значение (определяет невозможность физической реализации ТС). Для опорных значений параметров **X** справедливо соотношение:
$|X_{\text{ном}}| < |X_{\text{доп}}| \le |X_{\text{пред}}|$.

Для выходных параметров **Y** и внутренних параметров $\mathbf{Z}^{\text{v}}$, являющихся переменными состояния на выходах элементов ТС, к опорным параметрам относятся: $Y_{\text{доп}}(Z^{\text{v}}_{\text{доп}})$ – допустимое значение параметра, которое определяется техническими требованиями, устанавливаемыми при составлении технического задания на стадии проектирования ТС или ее элемента. Их нарушение ведет к снижению эффективности применения ТС по назначению; $Y_{\text{пред}}(Z^{\text{v}}_{\text{пред}})$ – предельное значение параметра, т.е. такое расчетное наибольшее или наименьшее его значение, при достижении которого функционирование ТС, с точки зрения выполнения возложенных на нее функций, становится невозможным; $Y_{\text{кр}}(Z^{\text{v}}_{\text{кр}})$ – критическое значение параметра, при котором работа ТС принципиально невозможна. Для опорных значений выходных параметров **Y** и внутренних параметров $\mathbf{Z}^{\text{v}}$ выполняется соотношение:
$|Y_{\text{доп}}(Z^{\text{v}}_{\text{доп}})| < |Y_{\text{пред}}(Z^{\text{v}}_{\text{пред}})| \le |Y_{\text{кр}}(Z^{\text{v}}_{\text{кр}})|$.

Важным результатом анализа является ответ на вопрос, выполняются или не выполняются условия работоспособности, под которыми понимаются необходимые условия безотказной работы системы, выраженные в виде неравенства:
$Y_{j\min} \le Y_j = F_j(\mathbf{X}) \le Y_{j\max}$, $j = \overline{1,m}$, $Z^{\text{v}}_{j\min} \le Z^{\text{v}}_j = F^{\text{v}}_j(\mathbf{X}) \le Z^{\text{v}}_{j\max}$, $X_{i\min} \le X_i \le X_{i\max}$, $i = \overline{1,n}$,
где $Y_{j\max}(Z^{\text{v}}_{j\max})$, $Y_{j\min}(Z^{\text{v}}_{j\min})$, $Y_j(Z^{\text{v}}_j)$ – соответственно максимально и минимально допустимое значение *j*-го выходного (внутреннего) параметра.

Первое неравенство является внешним условием работоспособности, второе и третье неравенства – внутренними условиями работоспособности. Эти условия определяют область работоспособности *G*, которая составляет множество допустимых значений внутренних параметров **X**, при которых выполняются все требования, предъявляемые к выходным **Y** и внутренним $\mathbf{Z}^{\text{v}}$ параметрам системы. Форма области *G* может иметь сложную конфигурацию [1].

Различают задачи определения и назначения допусков. Под определением допусков понимается решение задачи построения области работоспособности, которая обычно задается в виде совокупности граничных точек. Под назначением допусков, как правило, понимают решение задачи аппроксимации области работоспособности гиперпараллелепипедом (брусом) наибольшего объема, который может быть вписан в эту область или описан вокруг нее.

Основными показателями качества, определяющими выбор целевой функции при параметрической оптимизации ТС, являются показатели назначения, надежности и экономичности. *Показатели назначения* характеризуют свойства ТС, определяющие основные функции, для выполнения которых она предназначена. *Показатели надежности* характеризуют свойства ТС, определяющие ее способность сохранять работоспособное состояние при использовании системы по назначению. Показателем параметрической надежности при ограниченных статистических данных о законах распределения внутренних параметров ТС во времени является запас работоспособности [1, 3]. *Экономические показатели* характеризуют затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию ТС. Эти показатели при параметрическом управлении состоянием определяют: затраты на информационное обеспечение, связанные с определением состояния ТС; затраты на восстановление работоспособного состояния ТС в случае параметрических отказов; классы точности элементов ТС, влияющих на стоимость всей системы.

### 3 Решение задач параметрического управления состоянием технической системы

Параметрическое управление состоянием сводится к обеспечению требуемого уровня запаса работоспособности ТС, а также контролю и прогнозированию его значения в процессе эксплуатации системы.

Для решения первой задачи предлагается поисковый метод, сущность которого сводится к следующему. На первом этапе известными методами [4, 5] определяется граница области $G$, состоящая из конечного числа гиперповерхностей $\Phi_j$, каждую из которых можно с заданной погрешностью описать, используя условия работоспособности. В пространстве внутренних параметров $R^n$ вводится метрика $l$, являющаяся функцией координат двух любых точек этого пространства, например точек $A$ и $B$. При этом $l = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \mu_i \left(X_i(A) - X_i(B)\right)^2}$, где $\mathbf{X}(A)$, $\mathbf{X}(B)$ – координаты векторов точек $A$ и $B$ соответственно; $\mu_i$ – нормирующий множитель по $i$–ой координате переменных $\mathbf{X}$. Если одна из точек, например точка $A$, является граничной точкой области $G$, а точка $B$ находится внутри этой области и ее координаты характеризуют состояние ТС в рассматриваемый момент времени, то данная метрика будет определять запас работоспособности $\rho$ системы и служить критерием сужения исходной области $G^{(0)}$ с целью определения координат оптимальной точки. Далее производится сужение области $G^{(0)}$ по критерию $l = \rho$. С этой целью изменяют критерий на величину $\Delta l$, т.е. $l^{(1)} = l^{(0)} + \Delta l$, получают аналитическое описание границы области $G^{(1)}$ и определяют требуемое множество ее граничных точек.

Найдем уравнение, отображающее координаты граничных точек области $G^{(0)}$ в координаты граничных точек области $G^{(1)}$. Предположим, что область $G^{(0)}$ определена на плоскости двух параметров $X_1$ и $X_2$. Для граничной точки $A^{(0)}(X_1^{(0)}, X_2^{(0)})$ области $G^{(0)}$ уравнение нормали к кривой $\Phi^{(0)} \in G^{(0)}$, на которой расположена точка $A^{(0)}$, имеет вид:
$c_2(X_1^{(1)} - X_1^{(0)}) - c_1(X_2^{(1)} - X_2^{(0)}) = 0$, $c_1 = \partial\Phi^{(0)}(X_1, X_2)/\partial X_1$, $c_2 = \partial\Phi^{(0)}(X_1, X_2)/\partial X_2$.

Учитывая, что $(X_1^{(1)} - X_1^{(0)})^2 + (X_2^{(1)} - X_2^{(0)})^2 = \Delta l_1^{\,2}$ и решая эти уравнения, получим:
$\left|X_1^{(1)} - X_1^{(0)}\right| = c_1 \Delta l \Big/ \sqrt{\left(c_1^{\,2} + c_1^{\,2}\right)}$, $\left|X_2^{(1)} - X_2^{(0)}\right| = c_2 \Delta l \Big/ \sqrt{\left(c_1^{\,2} + c_1^{\,2}\right)}$.

Обобщая на произвольный случай и опуская знак модуля, можно записать:
$$X_i^{(1)} = X_i^{(0)} \pm \frac{\left(\partial\Phi^{(0)}(\mathbf{X})/\partial X_i\right)\Delta l_1}{\left|grad\,\Phi^{(0)}(\mathbf{X})\right|},\ grad\,\Phi^{(0)}(\mathbf{X}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\partial\Phi^{(0)}(\mathbf{X})/\partial X_i\right)^2}.$$

Получим уравнения, описывающие область $G^{(1)}$. С этой целью для каждой гиперповерхности определим координаты $N_j$ граничных точек, равных числу значимых коэффициентов этой гиперповерхности. Подставляя эти координаты в систему уравнений
$$\varphi_j^{(1)} = \Phi_j^{(1)}(\mathbf{X}) = b_0^1 + \sum_{i=1}^{n} b_i^1 X_{i\rho} + \sum_{i=1}^{n} b_{ii}^1 X_{i\rho}^2 + \sum_{i=2}^{n}\sum_{\nu=1}^{i-1} b_{i\nu}^1 X_{i\rho} X_{\nu\rho} = 0,\ \rho = \overline{1, N_j}$$
и решая ее относительно неизвестных коэффициентов $b_0^1$, $b_i^1$, $b_{ii}^1$, $b_{i\nu}^1$, получим искомые уравнения, описывающие границу области $G^{(1)}$.

На основе использования логических *R*-функций [6] и полученных уравнений $\varphi_j^{(1)}$ записывается одно уравнение, которое с заданной методической погрешностью аналитически описывает допусковую область $G^{(1)}$ на первом шаге поиска:

$$\begin{cases} G^{(1)} = G^{(1)}_{2(m+n)} = 0,5\left( G^{(1)}_{2(m+n)-1} + \varphi^{(1)}_{2(m+n)} - \left| G^{(1)}_{2(m+n)-1} - \varphi^{(1)}_{2(m+n)} \right| \right); \\ \ldots \quad G^{(1)}_j = 0,5\left( G^{(1)}_{j-1} + \varphi^{(1)}_j - \left| G^{(1)}_{j-1} - \varphi^{(1)}_j \right| \right); \quad \ldots \quad G^{(1)}_1 = \varphi^{(1)}_1 \end{cases}.$$

Аналогичным образом, определяется допусковая область $G^{(2)} \in G^{(1)}$ и процесс сужения исходной области $G^{(0)}$ циклически повторяется до получения оптимального решения при $N = 1$. На основании отображения $\Phi_Z : G \to F$ в пространстве параметров **Z** областям $G_k$ будут соответствовать области $F_k$. Каждой подобласти $G_k(F_k)$ соответствует свой запас работоспособности ТС [7]. Таким образом, задача оценки состояния ТС сводится к распознаванию в пространстве параметров **Z** принадлежности вектора текущего состояния системы той или иной подобласти $F_k$. Если после подстановки полученных в результате контроля значений в уравнение, аналитически описывающее область $F$ окажется, что $F < 0$, следовательно, ТС находится в работоспособном состоянии и далее проверяется справедливость выполнения неравенств $F_k < 0,\ k = 1,2,\ldots,(S+1)$. Если $F_k \le 0$ и $F_{k+1} > 0$, следовательно, вектор текущего состояния ТС принадлежит подобласти $F_k$ и запас работоспособности ТС равен $\lambda_k$. Если $F > 0$ – система неработоспособна. В этом случае осуществляется параметрическая коррекция настраиваемых параметров и ТС восстанавливает работоспособное состояние.

**Заключение**

Процесс параметрического управления состоянием ТС включает в свой состав целый комплекс задач анализа и синтеза, включая задачи методологического обеспечения процесса, параметрического синтеза, контроля и прогнозирования состояния системы. Для решения этих задач необходима информация о границе области работоспособности системы. При этом обеспечивается возможность параметрической оптимизации ТС по критерию запаса работоспособности и высокая достоверность контроля. Для аналитического описания областей работоспособности с низкой методической погрешностью следует использовать разработанный авторами метод, основанный на применении логических *R*–функций. Рассмотренные в статье методы были апробированы на примерах параметрического синтеза и контроля состояния разнообразных электромеханических систем.

**Список литературы**


[1] Саушев А.В. Методы управления состоянием электротехнических систем: СПб.: СПГУВК, 2004.

[2] Саушев А.В., Шошмин В.А. Методологические аспекты процесса управления состоянием автоматизированных электроприводов // Приводная техника. - 2010. Вып.6. – С. 54-59.

[3] Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.

[4] Саушев, А. В. Метод построения границы области работоспособности электротехнических объектов // Электричество. - 1990. - № 4. - С. 14-19.

[5] Саушев А.В. Сеточный метод построения областей работоспособности технических объектов на основе алгоритма симплексного поиска. Журнал университета водных коммуникаций. - СПб.: СПГУВК, 2010. Вып.1(V).- С. 58-69.

[6] Саушев А.В. Аналитическое описание областей работоспособности электротехнических систем. Журнал университета водных коммуникаций. - СПб.: СПГУВК, 2009. Вып.4.- С. 34-41.

[7] Саушев А.В., Шошмин В.А. Контроль состояния электротехнических систем на основе информации о границе области работоспособности систем // Современные информационные и инновационные технологии на транспорте: Труды II Международной научно-практической конференции MINTT-2010 (25-27 мая 2010 г., Херсон, Украина). – Херсон, 2010. - С. 201-204.

# РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ СХЕМНОГО ТИПА

**А.В. Лопота, А.Г. Любимов**

Центральный научно-исследовательский опытно-конструкторский институт
робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК)
194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21, Россия
lubimov@rtc.ru
тел: +7 (812) 552-05-69, +7 (911) 232-61-41

***Ключевые слова:*** *система управления, техническая система схемного типа, имитационная модель, специальное программное обеспечение управляющей системы*

**Abstract**

Control system of sophisticated technical objects consists of:

- data acquisition means;
- control algorithms;
- actuating devices.

Object under control is replaced by simulation model to test the system and to provide personnel training.

## Введение

В настоящее время интенсивно увеличивается потребность управления *сложными техническими объектами*. При этом выделяются две группы научно-технических задач:

- задачи и проблемы, возникающие при разработке *систем управления*;
- методология применения систем управления в различных ситуациях и режимах.

Разработка систем управления проходит несколько этапов [1]. Как правило, лишь на завершающих этапах разработки имеется возможность взаимодействия *управляющей системы* с *объектом управления*. По указанным причинам необходимо создавать компьютерные *имитационные модели* объектов управления для решения задач на стадиях разработки систем управления. С другой стороны имитационные модели могут использоваться при отработке вопросов применения систем управления и обучения персонала.

## 1 Основные положения

Предметом разработки и исследования являются системы управления сложными техническими объектами

По определению *система управления* (СУ), представляет собой совокупность *объекта управления* (ОУ) и *управляющей системы* (УС):

(1) СУ = ОУ ∪ УС.

Всякий процесс управления всегда содержит три обязательных этапа:

1) Сбор информации о состоянии ОУ.
2) Отработка информации и принятие решения на управляющие воздействия.
3) Реализация управляющих воздействий.

В каждой СУ все из указанных этапов поддерживаются соответствующими средствами (техническими, аппаратными, программными), имеют свои содержание и реализацию.

Управляющая система включает в себя:

- средства сбора информации о состоянии ОУ;
- средства обработки информации и выработки решений на управление;
- средства реализации управляющих воздействий [2].

Чёткую границу между УС и ОУ определить невозможно. Так средства сбора информации и средства реализации управляющих воздействий можно считать общими для ОУ и УС.

Общая структура системы управления приведена на рисунке 1.

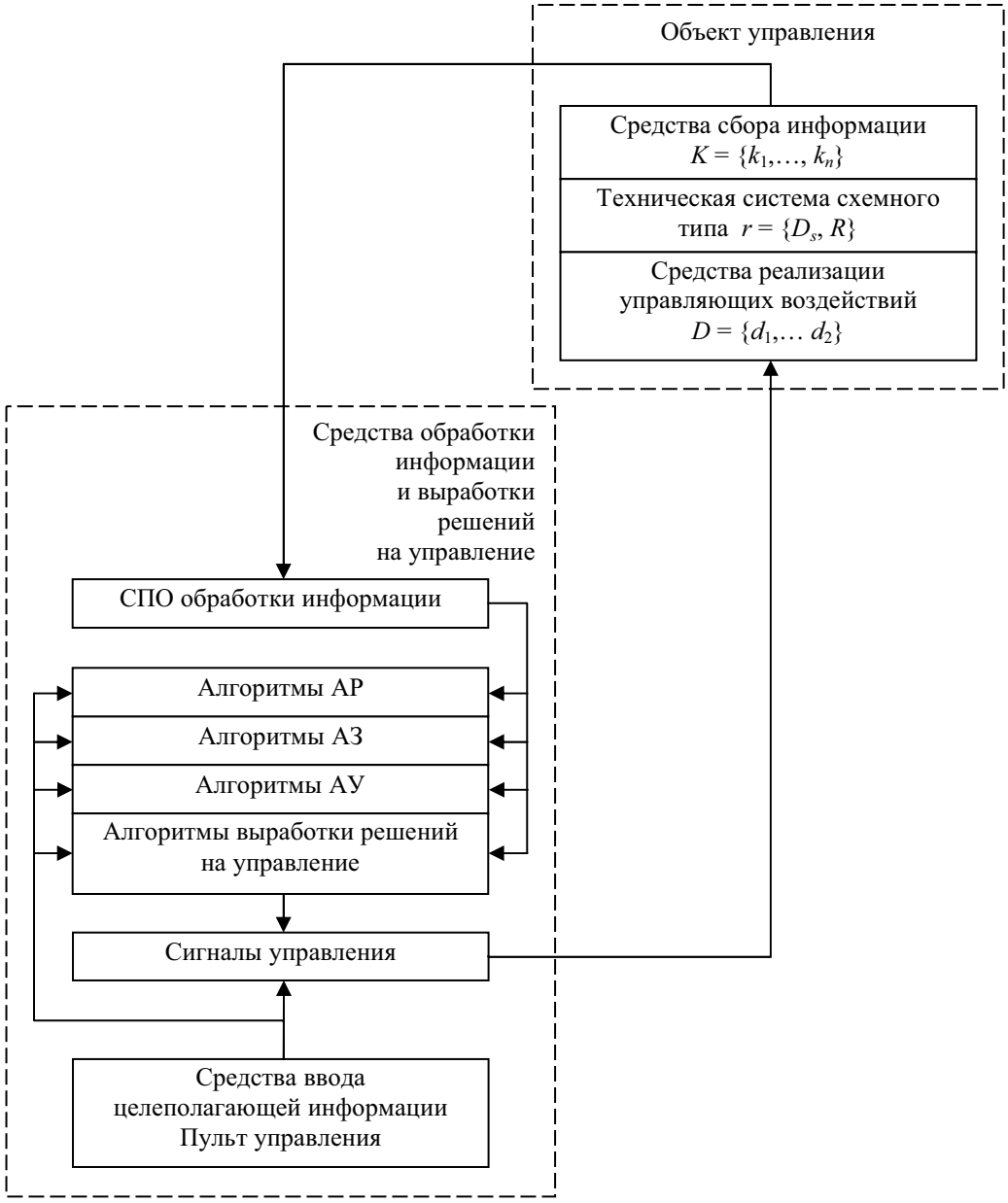



Рисунок 1 – Общая структура системы управления

## 2 Технические системы схемного типа

В качестве ОУ рассматриваются технические системы схемного типа (далее по тексту – «ТС»), которые состоят из функциональных элементов и связей между ними.

К техническим системам схемного типа относятся: электроэнергетические системы; теплогидравлические системы; сложные механические конструкции и т.п.

Пример технической системы схемного типа приведён на рисунке 2.

Функциональные элементы ТС могут быть следующих типов:

- динамические (механизмы, двигатели, генераторы, насосы и т.п.);
- коммутационные и переключающие (клапаны, вентили, электроавтоматы и переключатели, рубильники и т.п.);
- коммуникационные (трубопроводы, электрические кабели, оптиковолоконные и прочие коммуникации);
- ёмкости и аккумуляторы (цистерны, баллоны, электрические батареи и аккумуляторы, конденсаторы и т.п.).

Каждому типу функциональных элементов соответствует свой набор параметров и переменных.

Множество функциональных элементов обозначим:

(2) $A = \{a_1,\ldots, a_z\}$.

Связи между функциональными элементами служат для передачи энергии, рабочих сред, осуществления взаимодействия и могут быть следующих типов:

- энергетические – для передачи энергии (электрические кабели);
- транспортные – для передачи, транспортировки рабочих сред и энергии (трубопроводы газовые и жидкостные);
- механические – для передачи усилий (рычаги, элементы конструкций и т.п.).

Множество связей функциональных элементов обозначим:

(3) $R = \{r_1,\ldots, r_y\}$,

(4) $R \sqsubset A \times A$.

То есть множество $R$ принадлежит декартовому произведению $A \times A$, $R$ – множество ориентированных дуг $(a_i, a_j)$, обозначающих связи между функциональными элементами [3].

При рассмотрении функций управляющей системы, принимаются следующие положения.

***Средства сбора информации*** включают в себя множество датчиков, сигнализаторов, сенсоров, расположенных на функциональных элементах ТС и передающих (каждый по своему каналу) информацию о состоянии ОУ.

Множество указанных информационных каналов обозначим

(5) $K = \{k_1,\ldots, k_n\}$.

***Средства обработки информации и выработки решений на управление*** рассматриваются в программной реализации с необходимой аппаратной поддержкой и включают в себя следующее специальное программное обеспечение (СПО):

- СПО обработки информации о текущем состоянии ОУ и формирование соответствующей модели, отображающей это состояние: $F(K)$;
- СПО целеполагающей информации, которая вводится в модель состояния ОУ через пульты управления (ПУ);
- СПО выработки решений на управление, то есть алгоритмов управления, которые реализуются через сигналы управления.

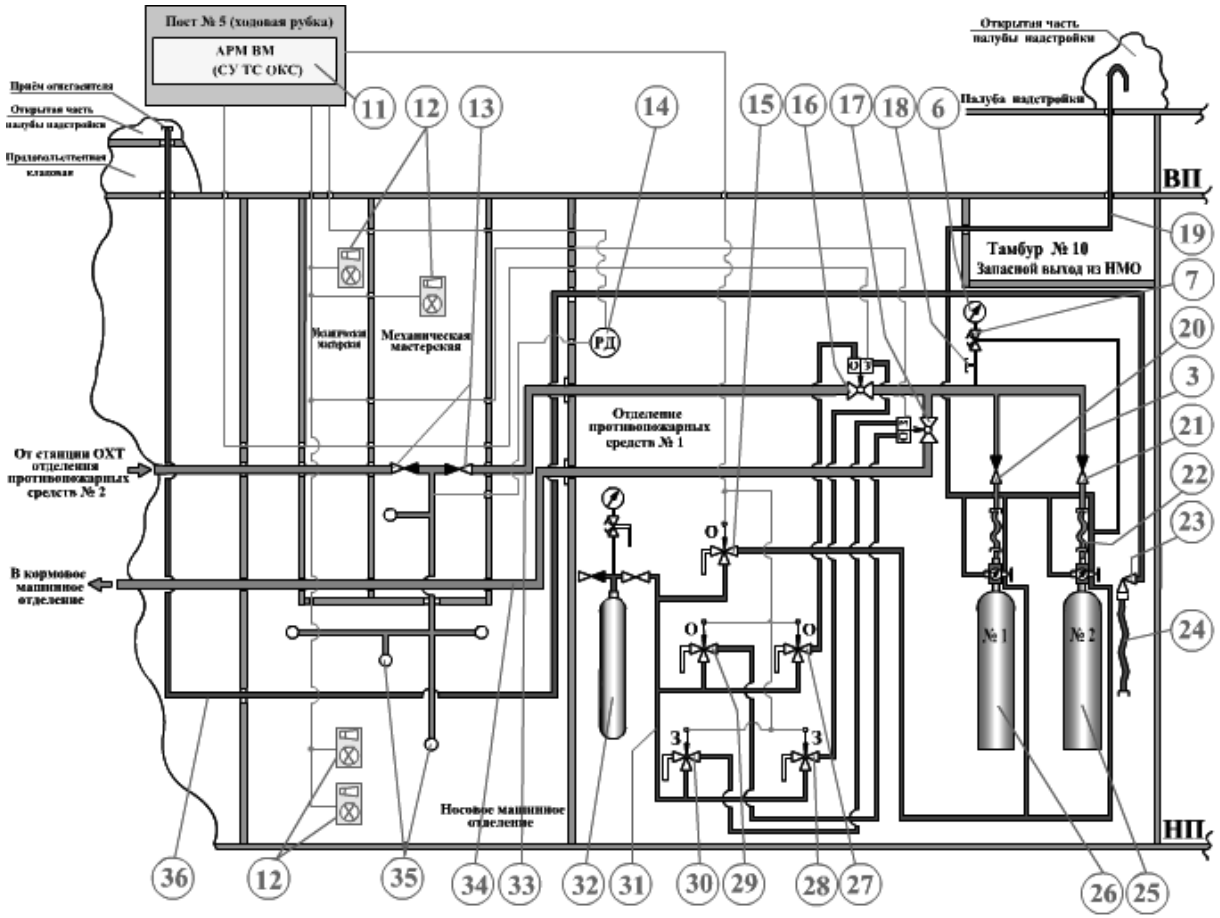



Рисунок 2 – Пример технической системы схемного типа

Как правило, алгоритмы управления техническими системами схемного типа содержат следующие компоненты:

- алгоритмы автоматических регуляторов (АР), то есть регулирование определённых параметров, которые необходимо поддерживать на заданном значении или изменять по заданной программе;
- алгоритмы аварийной защиты (АЗ), которые запускаются при достижении значений «аварийных уставок» защищаемых параметров;
- алгоритмы «дискретной автоматики» (автоматического управления – АУ) запускаются при определённых условиях или по сигналам управления и содержат в себе перечень и порядок необходимых управляющих воздействий и условий;
- алгоритмы дистанционного управления (ДУ), которые реализуются человеком–оператором посредством пульта управления (ПУ) или вручную.
- Множество сигналов целеполагающей информации:

(6) $C = \{c_1,\ldots, c_x\}$.

При этом $C$ принадлежит сумме множеств $D$ и $K$:

(7) $C \subset D \cup K$.

Таким образом, целеполагающая информация в УС ТС вводится и представляется в следующих видах:

- уставки регуляторов – значений регулируемых параметров (устанавливаются «жёстко» при создании системы или с ПУ);
- уставки АЗ – задаются при создании системы или с ПУ;
- алгоритмы дискретной автоматики – закладываются при создании УС и могут корректироваться в ходе эксплуатации системы;
- сигналы управления через органы управления на ПУ или непосредственно с местного поста человеком–оператором.

***Средства реализации управляющих воздействий*** инициируются по сигналам управления, последние формируются автоматически или человеком–оператором через органы управления на ПУ.

Каждое средство реализации управляющих воздействий, как правило, содержит:

- преобразователь–усилитель сигнала управления;
- силовой привод;
- управляющий (регулирующий) орган, непосредственно воздействующий на ОУ.

Множество указанных средств реализации управляющих воздействий обозначим:

(8) $D = \{d_1,\ldots, d_i\}$.

Так как любой управляющий (регулирующий) орган является функциональным элементом, то:

(9) $D \subset A$.

В общем виде для ТС процесс управления заключается в следующем:

1) задаётся цель управления, то есть вводится целеполагающая информация;
2) производится сбор информации о состоянии ОУ и УС;
3) вышеуказанная информация обрабатывается и строится модель текущего состояния ОУ и УС;
4) текущее состояние ОУ и УС сравнивается с заданным, определяется различие между этими отображениями и формируется рассогласование «дельта».

В зависимости от рассогласования вырабатывается «решение» на управляющие воздействия – формируются сигналы управления, которые через средства реализации управляющих воздействий изменяют состояние ОУ [4].

Процесс управления циклически продолжается.

Современные УС содержат управляющие алгоритмы, реализованные аппаратно и программно в виде специального программного обеспечения (СПО). При этом доля программно реализованных алгоритмов управления неуклонно возрастает.

Разработка СУ проходит несколько этапов. Как правило, лишь на завершающих этапах разработки имеется возможность взаимодействия УС с ОУ.

Для разработанной УС требуется отработка и уточнение штатных и аварийных режимов использования СУ в целом.

СПО УС содержится в средствах обработки информации и выработки решений на управление.

Создание СПО УС для ТС процесс трудоёмкий. Причём СПО и УС в целом может отлаживаться и тестироваться, непосредственно работая с ОУ лишь на завершающих стадиях разработки и с определёнными ограничениями.

Поэтому целесообразно создавать имитационные модели ОУ.

## 3 Требования к программным имитационным моделям

Общими требованиями к программным имитационным моделям являются**:**

- ИМ должны быть интерактивными и отображать аспекты процессов управления;
- ИМ должны быть сетевыми, распределёнными.

В состав ИМ должны входить:

- программные средства, реализующие алгоритмическую (процедурную) часть модели;
- базы данных и массивы переменных моделей;
- консоли воздействия на имитационную модель, графические образы пультов управления, функциональных схем и пр., сопряжённые с моделью, посредством которых можно задавать (изменять) значения переменных моделей, а следовательно, и состояние моделей;
- инструментальные средства создания программных имитационных моделей.

Инструментальные средства создания программных имитационных моделей технических систем схемного типа должны включать в себя:

- средства описания функциональных элементов и связей;
- средства формирования и представления графов (топология);
- задание, определение возможных путей на графе;
- задание законов движения по графу и их проверка;
- возможность изменений функциональных элементов и связей.

В качестве ОУ рассматриваются сложные технические системы схемного типа. Особенности управления и декомпозиции таких систем изложены выше и в [2, 4, 5].

Имитационная модель (ИМ) ОУ типа ТС с соответствующими требованиями и допущениями может декомпозироваться на следующие составные части:

- модель средств сбора информации:

(10) $M_k = f(K, M_s)$;

- модель процессов, происходящих в ТС:

(11) $M_s = f(A, R, D)$;

- модель средств реализации управляющих воздействий, каждое из них изменяет состояние функционального элемента, то есть значение соответствующей переменной в имитационной модели (ИМ):

(12) $M_d = f(D, C)$.

Часть имитационной модели ОУ может быть задействована в СПО выработки решения на управление, когда «сравнивается» заданное состояние заданное состояние ОУ с текущим состоянием (отображением) ОУ.

**Заключение**

При создании систем управления сложными техническими объектами разрабатываются имитационные модели (ИМ) для следующих применений:

- в составе СПО УС для заданий целей функционирования и сравнения с текущим состоянием ОУ;
- для моделирования ОУ и отработки алгоритмического, программного обеспечения СПО УС, для анализа различных режимов и ситуаций (в том числе нештатных) и принятия решений;
- для исследовательского проектирования, для автоматизированных систем обучения (АСО) и тренажёров [5].

**Список литературы**


[1] ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005. Государственный стандарт Российской Федерации. Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем

[2] Юсупов Р.М., Заболотский В.П. Концептуальные и научно-методологические основы информатизации. – СПб.: Наука, 2009. – 542 с.

[3] Горбатов В.А. Фундаментальные основы дискретной математики. Информационная математика. – М.: Наука. Физматлит, 2000. – 544 с.

[4] Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 340 с.

[5] Любимов А.Г. Автоматизированные системы обучения и тренировки персонала для управления морскими роботизированными комплексами: Материалы пятой научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Таганрог, 2010.

# РЕДУЦИРОВАННЫЙ ФИЛЬТР КАЛМАНА-БЬЮСИ ДЛЯ ГИБКОГО МАНИПУЛЯТОРА

**В.А. Соболев, М.С. Осинцев**

Самарский государственный аэрокосмический университет имени ак. С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)
443001, Самара, ул Молодогвардейская, 151, ауд. 317, Россия
hsablem@yahoo.com
тел: (846–3) 32-57-86

***Ключевые слова:*** *фильтрация, интегральное многообразие, инвариантное многообразие, сингулярные возмущения, гибкий однозвенный манипулятор*

**Abstract**
We use a geometric singular perturbations method for reducing the model order in optimal estimation problem for single flexible manipulator. The method relies on the theory of integral manifolds, which essentially replaces the original system by another system on an integral manifold.

## Введение

Рассмотрим задачу оптимальной фильтрации для линейной стохастической системы вида

(1) $\varepsilon M\ddot{x} + \varepsilon D\dot{x} + Kx = \varepsilon F\dot{w}$,

где $\dot{w}$ - случайный процесс типа белого гауссовского шума с известной корреляционной матрицей $Q$. Функция наблюдения $z = Cx + \dot{v}$, где $\dot{v}$ - аддитивный белый гауссовский шум в канале наблюдения с корелляционной матрицей $R$. При этом система является сингулярно возмущенной, то есть содержит некоторый малый параметр $\varepsilon$ при некоторых производных, а так же в правой части уравнения [2]-[6].

В настоящей работе для рассматривается вопрос о возможности понижения размерности задачи оптимальной фильтрации для системы (1). При решении этой задачи возникает необходимость отыскания численного решения системы дифференциальных уравнений Риккати для ковариационной матрицы фильтра Калмана-Бьюси $P$ вида:

(2) $\dot{P} = AP + PA^T - PC^T R^{-1} CP + BQB^T$,

где

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{\varepsilon} M^{-1}K & -M^{-1}D \end{pmatrix},\ B = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}F \end{pmatrix}.$$

При этом размерность этой системы может быть достаточно велика, что приводит к необходимости использования значительных вычислительных мощностей при решении этой задачи в реальном времени. Кроме того, ввиду наличия в системе уравнений Риккати сингулярных возмущений, необходима высокая частота снятия выходного сигнала системы для сохранения точности работы фильтра, поэтому для эффективного решения задачи оптимального оценивания необходимо искать численное решение системы дифференциальных уравнений Риккати относительно большой размерности с высокой частотой, что на практике не всегда

возможно. Актуальность этой задачи особенно велика в авиационной и космической технике, где существует значительное ограничение на вычислительные мощности.

В настоящей работе, для понижения размерности задачи оптимальной фильтрации применяется метод интегральных многообразий, который позволяет не только понизить размерность, но и перейти к описанию системы на многообразии медленных движений при отсутствии высокочастотной динамики.

**Гибкий однозвенный манипулятор**

Рассмотрим линейную модель гибкого однозвенного манипулятора, полученную разложением динамики системы на бесконечную сумму гибких мод. Как известно, первые моды представляют собой качественное движение манипулятора, поэтому ограничимся рассмотрением только уравнением, содержащим нулевую и первую гибкие моды [8]:

$$M\ddot{q} + D\dot{q} + Kq = F\tau,$$

где

$$M = \begin{bmatrix} J & 0^T \\ 0 & I \end{bmatrix},\ D = \begin{bmatrix} b & 0^T \\ 0 & 2\zeta\omega \end{bmatrix},\ K = \begin{bmatrix} 0 & 0^T \\ 0 & \omega^2 \end{bmatrix},\ F = \begin{bmatrix} 1 \\ \phi'(0) \end{bmatrix}.$$

Манипулятор представляет собой тонкую легкую штангу, поэтому является достаточно гибким. Собственные частоты $\omega$ достаточно велики, а коэффициенты затухания обычно $\zeta << 0.1$. Введем в систему малый параметр $\varepsilon$ и, сделав соответствующие замены, получим следующие уравнения движения гибкого манипулятора:

$$(3)\quad \begin{cases} \dot{q}_1 = z_1 \\ \dot{z}_1 = -\dfrac{b}{J} z_1 + \dfrac{h}{J}\dot{w} \\ \varepsilon\dot{q}_2 = z_2 \\ \varepsilon\dot{z}_2 = -\hat{\omega}_1^2 - \varepsilon 2\hat{\zeta}_1 z_2 + \varepsilon^2 \phi'_1(0) h\dot{w} \end{cases}$$

Рассмотрим для этой системы задачу оптимальной фильтрации. При решении этой задачи возникает необходимость в отыскании численного решения системы дифференциальных уравнений Риккати вида (2). Построение решения этой системы в явном виде невозможно, в том числе и отыскание этого решения на интегральном многообразии. Возникает необходимость применения различных аппроксимаций, например асимптотического разложения интегрального многообразия $h(x,t,\varepsilon)$ по степеням малого параметра [1]:

$$(4)\quad h(x,t,\varepsilon) = h_0(x,t) + \varepsilon h_1(x,t) + \ldots + \varepsilon^k h_k(x,t) + \ldots$$

Используя этот метод, можно свести отыскание численного решения исходной системы дифференциальных уравнений к уравнениям на многообразии, тем самым понизив размерность исходной задачи до размерности медленной подсистемы [7]. Первоначально необходимо выделить из системы медленную подсистему. Система уравнений для ковариационной матрицы содержит десять уравнений, при этом три первых уравнения не содержат малого параметра $\varepsilon$ при производных. Однако, система уравнений Риккати содержит больше медленных переменных. Для их идентификации нужно рассмотреть уравнения для следующих элементов:

$$\varepsilon \dot{p}_5 = 2p_8 - \varepsilon \frac{1}{r}\left(p_3 + p_5\phi_1(0)\right)^2,$$

$$\varepsilon \dot{p}_8 = p_9 - \hat{\omega}_1^2 p_5 - 2\varepsilon\hat{\zeta}_1\hat{\omega}_1 p_8 - \varepsilon \frac{1}{r}\left(p_3 + p_5\phi_1(0)\right)\left(p_6 + p_8\phi_1(0)\right),$$

$$\varepsilon \dot{p}_9 = -2\hat{\omega}_1^2 p_8 - 4\varepsilon\hat{\zeta}_1\hat{\omega}_1 p_9 - \varepsilon \frac{1}{r}\left(p_6 + p_8\phi_1(0)\right)^2 + \varepsilon^3 \phi_1'(0)^2 h^2 q.$$

Матрица главных членов в правой части выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} 0 & 2 & 0 \\ -\hat{\omega}_1^2 & 0 & 1 \\ 0 & -2\hat{\omega}_1^2 & 0 \end{pmatrix}.$$

Исходя из ее вида, очевидно, что линейная комбинация первого и третьего уравнения должна дать уравнение, в котором не будет малого параметра при производной. Таким образом, сделав замену $p_{10} = p_5 + \frac{1}{\hat{\omega}_1^2} p_9$, получим дифференциальное уравнение для еще одной медленной переменной:

$$\dot{p}_{10} = -4\hat{\zeta}_1 p_9 - \frac{1}{r}\left(p_3 + p_5\phi_1(0)\right)^2 - \frac{1}{r\hat{\omega}_1^2}\left(p_6 + p_8\phi_1(0)\right)^2 + \varepsilon^2 \frac{\phi_1'(0)^2}{\hat{\omega}_1^2} h^2 q.$$

Размерность медленной подсистемы равна четырем, то есть возможно понижение размерности системы Риккати (2), ограничившись рассмотрением движения системы только вдоль интегрального многообразия, с десяти до четырех уравнений. Построим интегральное многообразие, используя асимптотическое разложение по степеням малого параметра с точностью $O\left(\varepsilon^3\right)$.

В этом случае, получим дифференциальное уравнение вида:

$$\dot{x} = f(x, h(x,\varepsilon), \varepsilon),$$

где

$$f(x,h(x,\varepsilon),\varepsilon) = \begin{pmatrix} 2x_2 - \frac{1}{r}\left(x_1 + h_1\phi_1(0)\right)^2 \\ x_3 - \frac{b}{J}x_2 - \frac{1}{r}\left(x_1 + h_1\phi_1(0)\right)\left(x_2 + h_2\phi_1(0)\right) \\ -2\frac{b}{J}x_3 - \frac{1}{r}\left(x_2 + h_2\phi_1(0)\right) + \frac{h^2}{J^2}q \\ -\frac{1}{r}\left(h_1 + h_3\phi_1(0)\right)^2 - 4\hat{\zeta}_1\left(x_4 - h_3\right) - \frac{1}{r\hat{\omega}_1}\left(h_4 + h_6\phi_1(0)\right)^2 + \varepsilon^2 \frac{h^2}{\hat{\omega}_1}\phi_1'(0)^2 q \end{pmatrix},$$

где $h_1 - h_6$ – элементы векторной функции $h(x,\varepsilon)$, описывающей поведение быстрых переменных на интегральном многообразии:

$$h(x,\varepsilon)=\begin{pmatrix} \varepsilon^2\phi_1(0)\left(-\dfrac{x_2x_4}{2r\hat{\omega}_1^2}+\dfrac{x_1x_4\phi_1^2(0)}{16r^2\hat{\omega}_1^2}+\dfrac{x_1x_4\hat{\zeta}_1}{2r\hat{\omega}_1^2}\right) \\ \varepsilon^2\left(\dfrac{h^2q\phi_1^2(0)}{\hat{\omega}_1^2J}-\dfrac{\phi_1(0)x_3x_4}{2r\hat{\omega}_1^2}+\dfrac{\phi_1^3(0)x_2x_4^2}{16r^2\hat{\omega}_1^2}+\dfrac{x_2x_4\phi_1(0)\hat{\zeta}_1}{2r\hat{\omega}_1^2}\right) \\ \dfrac{x_4}{2}+\varepsilon^2\left(\dfrac{3x_4^2\phi_1^2(0)\hat{\zeta}_1}{16r^2\hat{\omega}_1^2}-\dfrac{\phi_1^3(0)\hat{\zeta}_1x_4^2}{16r^2\hat{\omega}_1^4}-\dfrac{x_4\left(1-\hat{\omega}_1^2\right)\hat{\zeta}_1^2}{2\hat{\omega}_1^4}-\dfrac{x_2x_4^2\phi_1^2(0)}{16r^2\hat{\omega}_1^4}\right) \\ \varepsilon\dfrac{\phi_1(0)x_1x_3}{2r} \\ \varepsilon\dfrac{\phi_1(0)x_2x_3}{2r} \\ \varepsilon\left(\dfrac{x_4^2\phi_1^2(0)}{16r}-\dfrac{\hat{\zeta}_1x_4}{2}\right) \end{pmatrix}+O\left(\varepsilon^3\right).$$

Здесь интегральное многообразие медленных движений построено с точностью $O\left(\varepsilon^3\right)$, однако возможно построение и более точного приближения, если это необходимо на практике.

Решая задачу оптимального оценивания для рассмотренной системы, возможно заменить систему сингулярно возмущенных дифференциальных уравнений Риккати десятого порядка системой из четырех обыкновенных дифференциальных уравнений. Так как переменные на интегральном многообразии изменяются медленно, то применение фильтра на интегральном многообразии возможно в условиях, когда временные интервалы между входными сигналами фильтра значительно больше, чем при использовании полного фильтра. Это позволяет не только уменьшить количество алгебраических операций в каждый момент времени, но и уменьшить частоту дискретизации по времени в процессе фильтрации.

На рисунке 1 представлены результаты численного моделирования движения захвата манипулятора в математическом пакете MATLAB. Так же приведены результаты моделирования работы полного фильтра Калмана-Бьюси и фильтра на интегральном многообразии. Как видно из приведенных графиков, результаты работы фильтра на интегральном многообразии с высокой точностью совпадают с результатами работы полного фильтра Калмана-Бьюси.

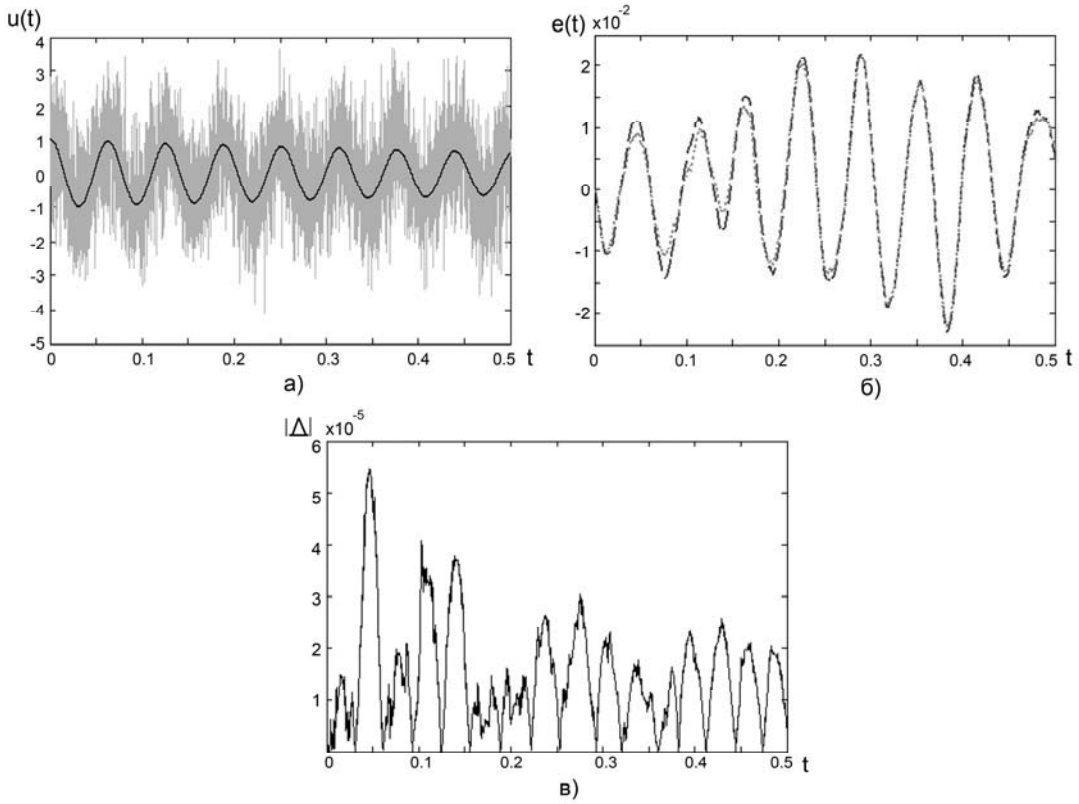



Рисунок 1 – Результаты численного моделирования движения манипулятора и фильтров Калмана-Бьюси: а) движение захвата манипулятора (черный) и выходной сигнал (серым); б) ошибки полного фильтра (серый пунктир) и фильтра на интегральном многообразии (черный пунктир); в) модуль разности между ошибками полного фильтра и фильтра на многообразии

**Заключение**

В работе была рассмотрена задача оптимального оценивания для однозвенного гибкого манипулятора. Показано, что при помощи метода интегральных многообразий возможно понижение размерности задачи оптимального оценивания, путем понижения размерности системы дифференциальных уравнений Риккати для ковариационной матрицы фильтра. Приведены результаты численного моделирования движения системы и работы фильтров Калмана-Бьюси. При этом результат работы фильтра на интегральном многообразии с высокой точностью совпадает с результатом работы полного фильтра Калмана-Бьюси.

**Список литературы**

[1] Воропаева Н. В., Соболев В. А. Геометрическая декомпозиция сингулярно возмущенных систем. М: Физматлит, 2009.
[2] Новожилов И. В. Фракционный анализ. М: Изд-во МГУ, 1991.
[3] Стрыгин В. В., Соболев В. А. Разделение движений методом интегральных многообразий. М:Наука, 1988.
[4] Ghorbel F., Spong M. W. // Int. J. of Non-Linear Mechanics, 2000, 35, 133–155.
[5] Mortell M.P., O'Malley R.E., Pokrovskii A.V., and Sobolev V.A., eds., "Singular Perturbations and Hysteresis", SIAM, 2005.

[6] Naidu D. S., Calise A. J. // Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2001, 24, 1057–1078.
[7] Osintsev M., Sobolev V., Global Invariant Manifolds in a Problem of Kalman-Bucy Filtering for Gyroscopic Systems // Global and Stochastic Analysis: An International Journal, 2011, Vol. 1 No. 1, 103-124.
[8] R.J.M. v.d. Ven Modelling and control of a rotating flexible link - Research project report - Eidhoven University of Technology, 2001.

# ОСОБЕННОСТИ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**М.Н. Ильина[1], Е.И. Кочемасова2, В.Т. Лузинский[1]**

[1]Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики
119454, Москва, просп. Вернадского, 78, Россия
kotchemassov@mirea.ru
тел: +7 (495) 434-9685

[2]Институт прикладной механики РАН
119334, Москва, Ленинский проспект, 32А, Россия

***Ключевые слова**: цифровая фильтрация, цифровые фильтры, тестовые сигнал, микроэлектромеханические систем (МЭМС), имитационное моделирование, временные и спектральные диаграммы, шумовые погрешности (помехи), динамический диапазон цифрового фильтра*

**Abstract:**
The problem of modeling and testing of the digital filters intended for diminution of an error of control systems and systems of an information exchange, including executed on microtechnology (MEMS) is solved.

## Введение

Внедрение в информационно-измерительные и управляющие системы принципиально новой технологической базы на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) позволяет улучшить динамические характеристики и помехозащищенность таких систем с помощью комплексных фильтров, применяемых при цифровой обработке сигналов и цифровой фильтрации. Использование твердотельных пьезогироскопов и микроакселерометров позволяет создавать прецизионные бесплатформенные навигационные системы очень малых размеров. Важно отметить, что радиочастотные, акустические и оптические каналы связи хорошо согласуются с МЭМС, поэтому создание цифрового фильтра для оценки уровня шумовой погрешности сигналов в пределах динамического диапазона, характерного для вышеуказанных систем является очень актуальной задачей. Для проведения имитационного моделирования предложены цифровые фильтры с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтры) при этом фильтрация происходит за счет разработанного рабочего алгоритма с использованием блока эталонного алгоритма фильтрации, а также блока обработки и анализа результатов имитационного моделирования для различных видов тестовых сигналов [1,2].

Целью имитационного моделирования является: проверка общей функциональной работоспособности цифрового фильтра, выборочная оценка на фиксированных частотах синусоидального сигнала соответствия экспериментальных и расчетных значений амплитудно-фазовой характеристики, оценка уровня шумовой погрешности и динамического диапазона цифрового фильтра при синусоидальном и шумовом входных сигналах, оценка спектрального состава сигнала погрешности при синусоидальном и шумовом входных сигналах.

Для решения различных задач имитационного моделирования цифрового БИХ-фильтра, предназначенного для улучшения динамических характеристик и помехозащищенности МЭМС требуются различные виды тестовых сигналов. В данной работе основными видами тестовых сигналов являются синусоидальные сигналы с различными частотами, находящимися как в полосе пропускания фильтра, так и в полосе заграждения и переходной зоне. Эти тес-

товые сигналы позволяют оценить частотные характеристики, как самого фильтра, так и разрабатываемой информационно-измерительной или управляющей системы в выборочных точках, а также оценить погрешности фильтра, обусловленные округлением промежуточных результатов вычислений при выполнении алгоритма. Качественная оценка общего результата фильтрации в информационно-измерительных, управляющих и навигационных системах позволит точнее оценить состояние и параметры подобных систем, выполненных по микротехнологии (МЭМС, MEMS - MicroElectroMechanicalSystems) в условиях случайных внешних возмущений, разброса параметров и ошибок измерительных средств.

## 1 Структура блока имитационного моделирования

Структурная схема блока имитационного моделирования (рис.1) содержит блок генерации тестовых сигналов, блок рабочего алгоритма фильтрации, блок эталонного алгоритма фильтрации, блок обработки и анализа результатов моделирования и блок графического вывода информации [1].

Для решения различных задач имитационного моделирования требуются различные виды тестовых сигналов. В докладе основными видами тестовых сигналов являются синусоидальные сигналы с различными частотами, находящимися как в полосе пропускания фильтра, так и в полосе заграждения и переходной зоне. Эти тестовые сигналы позволяют оценить частотные характеристики фильтра в выборочных точках, а также оценить погрешности (шумовые эффекты фильтра, обусловленные округлением промежуточных результатов вычислений при выполнении алгоритма). Другим видом тестового сигнала, полезного при качественной оценке общего результата фильтрации и шумовых параметров фильтра является случайный белый шум.

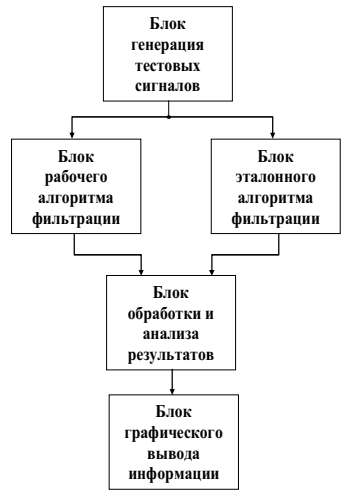



Рисунок 1 – Структурная схема блока имитационного моделирования

При оценке работоспособности и параметров фильтра важно кроме разработанной модели тестируемого фильтра иметь также модель некоторого фильтра, принятого за эталонный. В данном случае в качестве эталонной модели целесообразно использовать модель рабочего фильтра, в которой следует исключить элементы программы, связанные с ограниченностью разрядной сетки процессора с фиксированной точкой, что предусмотрено в рабочем фильтре, а использовать полную разрядную сетку универсальной ЭВМ, используемой при моделировании. Отметим, что при этом следует использовать те же целочисленные коэффициенты передаточных функций каскадов, которые используются в рабочей модели фильтра. Иначе сравне-

ние моделей в ряде случаев (оценка шумовых свойств фильтра) будет не корректной, так как сравниваемые фильтры будут просто разными.

## 2 Проверка общей функциональной работоспособности цифрового фильтра

Под общей функциональной работоспособностью алгоритма цифровой фильтрации подразумевается, прежде всего, его способность принимать входные данные (входную числовую последовательность), выполнять необходимые вычисления, не сталкиваясь с конфликтными ситуациями при извлечении данных из памяти, при работе в циклах и т.д., а также при формировании и выдаче выходных данных. При этом следует контролировать на качественном уровне соответствие результатов фильтрации исходным характеристикам фильтра [2].

Если не принимать во внимание отладочной стадии работы с алгоритмом, то проверку функциональной работоспособности алгоритма следует провести, используя в качестве тестового сигнала случайный белый шум. Анализ спектра входного шума (равномерного в рабочей полосе частот) и спектра выходного сигнала, который должен примерно соответствовать АЧХ фильтра может служить достаточным свидетельством общей работоспособности фильтра.

Для решения данной задачи используется специальный программный блок, содержащий блок генерации белого шума, модель алгоритма цифрового фильтра, блок спектрального анализа входного и выходного сигналов. Программный блок может быть реализован и в программном пакете «Matlab».

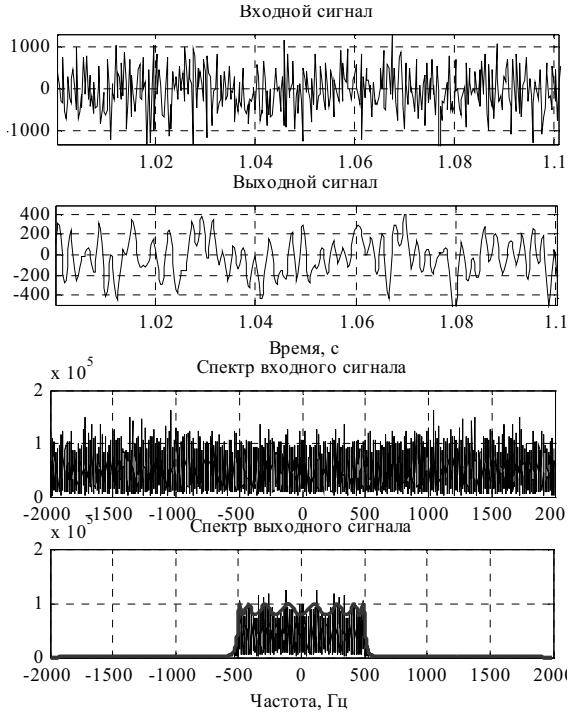



Рисунок 2 – Временные и спектральные диаграммы входного и выходного сигналов

В результате использования этого программного блока получены временные и спектральные диаграммы входного и выходного сигналов, показанные на рис.2. По временным диаграммам видно, что в результате фильтрации выходной сигнал упал по уровню и стал более «гладким» в результате потери высокочастотных составляющих. Это отражается также и на спектральных диаграммах. Если спектр входного сигнала равномерен в рабочей полосе цифровой системы $(-f_d/2, f_d/2)$=(-2, 2) кГц, то спектр выходного сигнала примерно соответст-

вует АЧХ фильтра. Полоса пропускания фильтра соответствует расчетной $f_c$=500 Гц. Таким образом, можно считать, что общая функциональная работоспособность подтверждена.

## 3 Выборочная оценка на фиксированных частотах синусоидального сигнала соответствия экспериментальных и расчетных значений амплитудно-фазовой характеристики

При подаче на вход фильтра вместо шумового, синусоидального сигнала, мы можем получить аналогичные временные и спектральные диаграммы. На рис.3 приведены подобные диаграммы для синусоиды с выбранной частотой 200 Гц. На спектральных диаграммах можно выделить спектральные линии, соответствующие частоте 200 Гц, которые в определенном масштабе определяют комплексные амплитуды синусоид:

- входной синусоиды для фильтров $\dot{U}_d$ (200 Гц),
- выходной синусоиды рабочего фильтра $\dot{V}_d$ (200 Гц).

Исходя из передаточной функции рабочего фильтра [2], можно получить расчетное значение общей передаточной функции каскадного цифрового фильтра для частоты 200 Гц.

Очевидно, должно иметь место равенство

$$W_d(200Гц) = \frac{\dot{V}_d(200Гц)}{\dot{U}_d(200Гц)}.$$

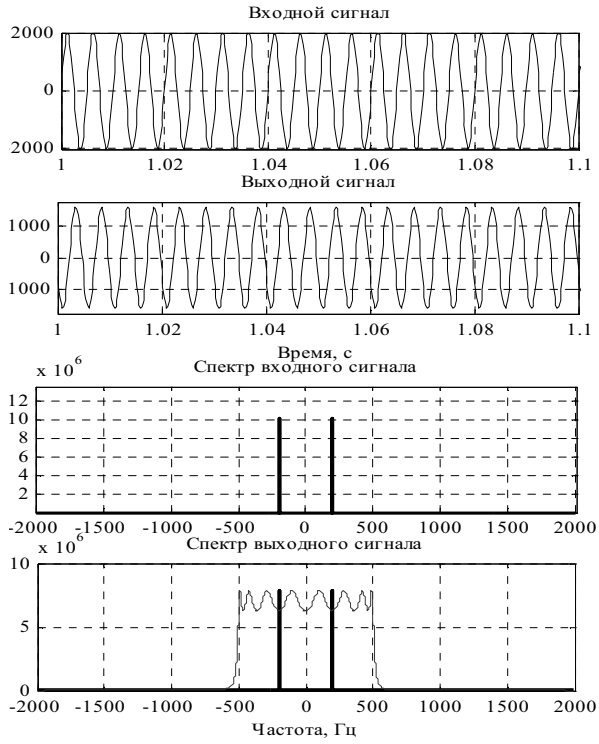



Рисунок 3 – Временные и спектральные диаграммы для синусоиды с частотой 200 Гц

В результате ошибок вычислений в алгоритме фильтрации это равенство выполняется с погрешностью. Амплитудная погрешность определяется как разница между модулем расчет-

ного значения передаточной функции и экспериментальным отношением амплитуд входной и выходной синусоид

$$\left|W_d(200Гц)\right| - \left|\frac{\dot{V}_d(200Гц)}{\dot{U}_d(200Гц)}\right|,$$

а фазовая погрешность – как разность аргумента расчетного значения передаточной функции и аргумента отношения комплексных амплитуд входной и выходной синусоид

$$\mathbf{arg}\left(W_d(200Гц)\right) - \arg\left(\frac{\dot{V}_d(200Гц)}{\dot{U}_d(200Гц)}\right).$$

В докладе приведены оценки экспериментальных отношений амплитуд выходной и входной синусоид для ряда частот, а также расчетное значение фазо-частотной характеристики и вычисленный по экспериментальным данным фазовый сдвиг выходной и входной синусоид. Эти данные, вычисленные для процессоров с числом разрядов $n$=12 и $n$=16, сведены в таблицу 6, в которой приведены следующие данные:

- частота синусоиды F, Гц,
- экспериментальное значение сдвига фазы $\varphi_{эксп} = \mathbf{arg}\left(\frac{\dot{V}_d}{\dot{U}_d}\right)$,
- расчетное значение сдвига фазы $\varphi_{расч} = \mathbf{arg}\left(W_d\right)$,
- экспериментальное значение отношения амплитуд выходной и входной синусоид $\left|\frac{\dot{V}_d}{\dot{U}_d}\right|$,
- расчетное значение АЧХ $\left|W_d\right|$.

Таблица 1 – Таблица для оценки экспериментальных отношений амплитуд и фаз для ряда частот

| n | Разрядность процессора n=12 | | | | Разрядность процессора n=16 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F, Гц | $\varphi_{экс}$ | $\varphi_{расч}$ | \| V/U\| | \| W\| | $\varphi_{экс}$ | $\varphi_{расч}$ | \| V/U\| | \| W\| |
| 50 | -33.67 | -33.73 | 0.86 | 0.86 | -33.32 | -33.34 | 0.88 | 0.88 |
| 100 | -80.26 | -80.23 | 0.98 | 0.98 | -79.47 | -79.50 | 1.00 | 1.00 |
| 150 | -128.35 | -128.40 | 0.86 | 0.86 | -127.88 | -127.92 | 0.89 | 0.89 |
| 200 | -164.42 | -164.36 | 0.77 | 0.77 | -164.14 | -164.13 | 0.79 | 0.79 |
| 250 | 157.21 | 157.31 | 0.87 | 0.87 | 157.41 | 157.42 | 0.90 | 0.90 |
| 300 | 99.21 | 99.19 | 0.95 | 0.96 | 99.18 | 99.16 | 0.98 | 0.99 |
| 350 | 45.73 | 45.83 | 0.78 | 0.79 | 45.80 | 45.78 | 0.81 | 0.81 |
| 400 | -5.73 | -5.88 | 0.89 | 0.89 | -5.84 | -5.82 | 0.91 | 0.91 |
| 450 | -94.89 | -94.96 | 0.83 | 0.83 | -94.77 | -94.80 | 0.85 | 0.85 |
| 500 | 132.46 | 131.91 | 0.75 | 0.77 | 131.69 | 131.54 | 0.79 | 0.80 |
| 600 | 46.74 | 45.92 | 0.01 | 0.01 | 45.91 | 45.85 | 0.01 | 0.01 |
| 800 | 27.17 | 25.95 | 0.0003 | 0.0003 | 25.96 | 25.93 | 0.000240 | 0.0002408 |
| 1000 | -74.05 | 17.63 | 0.0000014 | 0.0000124 | 18.46 | 17.63 | 0.000016 | 0.0000128 |
| 1200 | -26.87 | 12.41 | 0.0000055 | 0.0000008 | 24.43 | 12.43 | 0.000002 | 0.0000008 |
| 1400 | -121.56 | 8.56 | 0.0000194 | 0.0000000 | 62.96 | 8.61 | 0.000002 | 0.0000000 |
| 1600 | 85.61 | 5.41 | 0.0000002 | 0.0000000 | 89.73 | 5.50 | 0.000001 | 0.0000000 |
| 1800 | -81.23 | 2.62 | 0.0000002 | 0.0000000 | 63.03 | 2.86 | 0.000000 | 0.0000000 |

Из приведенной таблицы видно, что в полосе пропускания (до 500 Гц) фазовая погрешность не превышает 0.5°, а амплитудная погрешность менее 0.01, что вполне приемлемо. В полосе заграждения амплитудная погрешность не превышает $2 \cdot 10^{-4} < 74$ дБ, фазовая погрешность, хотя и значительная, но не имеет значения при таких малых уровнях остаточного не подавленного сигнала.

## 4 Оценка уровня шумовой погрешности при синусоидальном и шумовом входных сигналах и динамического диапазона цифрового фильтра

Источником внутренних шумовых погрешностей цифрового фильтра является операция округления накопленной взвешенной суммы в аккумуляторе при вычислении выходного сигнала каждого каскада

$$ad = A_{k1}u_k(q) + A_{k2}usd_{k1} + A_{k3}usd_{k2} - B_{k2}vsd_{k1} - B_{k3}vsd_{k2}\,.$$

Накапливаемые слагаемые представляют собой произведения двух *n*-разрядных операндов. При этом в младших *n* разрядах суммы может скапливаться остаток, округление которого (отбрасывание вследствие ограниченной разрядности процессора) при передаче данных в ОЗУ или на вход следующего каскада, создает некоторый шумовой фон. Эти шумовые компоненты каждого каскада в определенной мере фильтруются следующими каскадами, но частично попадают на выход фильтра [2]. Для оценки уровня этих шумов необходимо определить разность выходных сигналов рабочего фильтра *vd(q)* и эталонного фильтра *v(q)*

$$\varepsilon(q) = vd(q) - v(q)\,.$$

Для оценки динамического диапазона целесообразно использовать отношение максимального значение модуля полезного выходного сигнала и среднеквадратичного значения шума. Эти оценки целесообразно получить при различной разрядности процессора и разных видах входных сигналов. Эти результаты сведены в таблице 2.

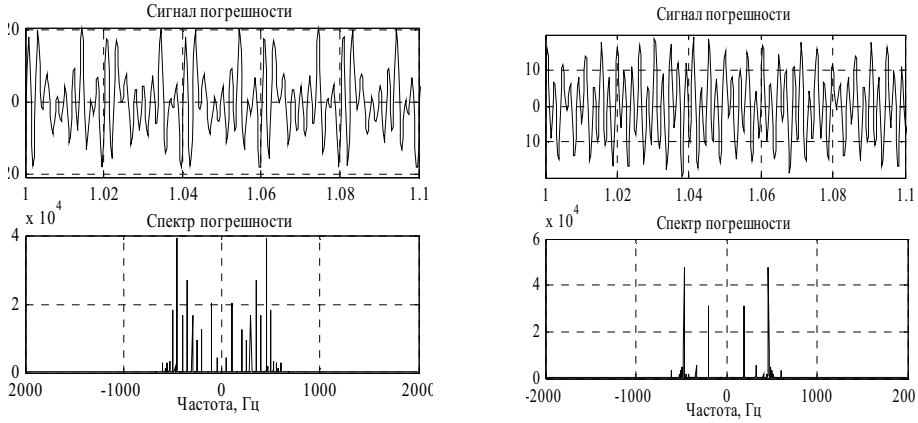
Таблица 2 – Таблица для оценки динамического диапазона цифрового фильтра при различной разрядности процессора

| n=12 | | | n=16 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_\varepsilon$ | $V_m$ | D (дБ) | $\sigma_\varepsilon$ | $V_m$ | D (дБ) |
| 8.9 | 1732 | 46 | 9.5 | 28707 | 69 |
| 9.4 | 920 | 38 | 9.5 | 15007 | 64 |

Результаты этой таблицы в целом ожидаемые: увеличение разрядности процессора снижает уровень шумов и позволяет работать на большем уровне полезного сигнала, и, следовательно, должно повышать динамический диапазон. Кроме того, регулярный синусоидальный сигнал должен при сравнимом уровне шума иметь большую амплитуду полезного сигнала.

Представляет интерес временные реализации шумов и их спектры. На рис.4а показаны временные и спектральные диаграммы сигналов погрешности (шумов) фильтров при синусоидальном входном сигнале предельной для процессора (n=12) амплитудой и частотой 200 Гц. Аналогичные диаграммы для процессора (n=16) показаны на рис.4б.

Очевидно, что операция округления является для сигналов фильтра нелинейной операции и порождает интермодуляционные гармоники, которые к тому же бьются с гармониками частоты дискретизации. Поэтому мы видим, насколько обогащается спектр шумов, порожденных одной синусоидой 200 Гц. Отметим также, что существенные гармоники шума лежат в полосе пропускания фильтра. Еще одна особенность спектра шумов заключается в том, что шумы первых каскадов фильтра частично подавляются следующими каскадами и только шумы последнего каскада проходят на выход фильтра практически не ослабленными. Примерно так же можно прокомментировать спектральную картину шумов при белом шуме на входе фильтра.




а б

Рисунок 4 (а, б) – Временные и спектральные диаграммы сигналов погрешности фильтров при синусоидальном входном сигнале

**Заключение**

Важно отметить, что для решения различных задач имитационного моделирования цифрового БИХ-фильтра, предназначенного для улучшения динамических характеристик и помехозащищенности МЭМС требуются различные виды тестовых сигналов. В данной работе основными видами тестовых сигналов являются синусоидальные сигналы с различными частотами, находящимися как в полосе пропускания фильтра, так и в полосе заграждения и переходной зоне. Эти тестовые сигналы позволяют оценить частотные характеристики, как самого фильтра, так и разрабатываемой информационно-измерительной или управляющей системы в выборочных точках, а также оценить погрешности фильтра, обусловленные округлением промежуточных результатов вычислений при выполнении алгоритма.

Качественная оценка общего результата фильтрации в информационно-измерительных, управляющих и навигационных системах позволит точнее оценить состояние и параметры подобных систем, выполненных по микротехнологии (МЭМС, MEMS - MicroElectroMechanicalSystems) в условиях случайных внешних возмущений, разброса параметров и ошибок измерительных средств.

Проведенное имитационное моделирование подтвердило работоспособность предложенного фильтра и соответствие его качественных показателей заданным, что позволяет оценить общий результат цифровой фильтрации с точки зрения повышения точности реальной и желаемой передаточной функций рассматриваемых информационно-измерительных и управляющих систем, а также позволяет увеличить робастность таких систем для сохранения их устойчивости во всем диапазоне рабочих характеристик, обеспечить высокое подавление спектральных составляющих помех при минимально допустимых искажениях полезного сигнала.

**Список литературы**

[1] А.В. Кочемасов, Е.И. Кочемасова, М.Н. Ильина. Выбор структуры и алгоритмов цифровой фильтрации для прецизионных систем управления с высокой чувствительностью. // Материалы 7-й научно-технической конференции «Мехатроника, Автоматизация, управление» – Спб.: ОАО «Концерн «ЦНИИИ «Электроприбор». – 2010. – с.243-246.

[2] В.Т. Лузинский, Е.И.Кочемасова. Повышение точности информационных и измерительных систем за счет цифровой обработки сигналов. Труды XIII Международной конференции (ПУМСС-2011). – Самара: Самарский научный центр РАН – с. 316-320.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТИПОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С МЕХАТРОННЫМИ ГИБРИДНЫМИ ПРИВОДАМИ

**А.В. Яновская**

Московский государственный технологический университет «Станкин»
127994, Москва, Вадковский пер., 1, Россия
alia_yanovskaya@mail.ru
тел: +7 (916) 303-56-91

***Ключевые слова:*** *мобильный робот, мехатронный гибридный привод, мехатронный силовой агрегат, математическая модель, моментный электропривод, двигатель внутреннего сгорания, типовые режимы, система управления*

**Abstract**
In article the actual problem of analysis of typical modes, construction mathematical model and algorithms for computer control of mobile robots with a hybrid mechatronic drives, providing their performance and profitability, are resulted.

## Введение

Современные мобильные роботы предназначены для выполнения различного круга задач, связанных со способностями к самостоятельному функционированию, ведению наблюдений и перемещению на значительные расстояния. Роботы, которые используются для решения подобных задач, должны обладать повышенной проходимостью, высокой динамикой, экономичностью и самостоятельно выбирать оптимальные режимы работы в процессе движения по заданному маршруту. Этим требованиям удовлетворяют мобильные роботы с мехатронными гибридными приводами, сочетающими в себе преимущества двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и моментного электропривода (МЭП), а также обладающими возможностью гибкого изменения процессов функционирования. Гибридный привод образуется в результате системной интеграции многих компонентов различной физической природы, и представляет собой сложную динамическую систему с компьютерным устройством управления, комплексом датчиков, аккумуляторной батареей, ДВС, МЭП, оснащённые локальными контроллерами [1]. В робототехнике идёт поиск рациональных решений, формирование теории построения и управления гибридными приводами мобильных роботов с учётом особенностей их применения. Поэтому актуальна задача анализа рациональных режимов работы, построения структуры и математической модели мобильных роботов с мехатронными гибридными приводами, обеспечивающими их быстродействие и экономичность.

## 1 Основные режимы работы мехатронных гибридных приводов мобильных роботов

Гибридный привод обладает высокой гибкостью при реализации требуемого момента, позволяя использовать возможности или только ДВС, или отдельно работающего МЭП, или реализуя совместную согласованную работу ДВС и МЭП, что позволяет улучшить динамику при разгоне или торможении робота, а также повысить энергетические показатели приводной установки [2].

Благодаря возможности гибкого согласованного компьютерного управления ДВС и МЭП мобильные роботы с мехатронными гибридными приводами могут функционировать в нескольких режимах. К числу основных режимов относятся режимы повышенной экономично-

сти, интенсивного разгона, движения с малой скоростью за счёт МЭП, а также режим управляемой рекуперации энергии. При движении робота на значительные расстояния без дозаправки топливом важна высокая экономичность привода. Она достигается путём организации такого управления ДВС, при котором снижается удельный расход топлива. В режиме повышенной экономичности может работать только ДВС, создавая момент, соответствующий условию минимума потребления горючего, или происходит одновременная работа ДВС и МЭП. При этом сцепления 1 и 2 обеспечивают связь коленчатого вала с коробкой передач. Первый вариант желателен, но не всегда реализуем, т.к. выполнение требований к скорости движения робота может помешать реализации экономичного режима. Во втором варианте МЭП создаёт дополнительный компенсирующий момент, необходимый для максимально возможного приближения суммарного момента гибридного привода к желаемому моменту и обеспечения при этом работы ДВС в наиболее экономичном режиме. Если МЭП создаёт момент, нагружающий ДВС, то избыточная энергия, создаваемая ДВС, используется для заряда аккумулятора.

В режиме интенсивного разгона ДВС и МЭП развивают наибольшие моменты, которые складываются и обеспечивают предельные значения ускорения. Интенсивность замедления также возрастает, т.к. МЭП может создавать значительный тормозной момент.

В режиме движения с малой скоростью ДВС не может работать устойчиво, т.к. требуемая частота вращения коленчатого вала оказывается меньше частоты холостого хода. Поэтому движение робота осуществляется за счёт МЭП. Сцеплением 1 связь с ДВС разрывается, и он может быть выключен. Особенность этого режима состоит в том, что двигательная установка робота не создаёт излишнего шума.

В режиме управляемой рекуперации энергии речь идёт о совместной работе ДВС и МЭП. МЭП формирует тормозной момент, преодолеваемый ДВС, и тем самым обеспечивается пополнение запасов электрической энергии в аккумуляторной батарее. Следует отметить, что при движении робота по пересечённой местности может происходить чередование этапов суммирования моментов ДВС и МЭП при подъёме робота, когда электроэнергия аккумулятора потребляется электроприводом, и заряда аккумулятора в результате рекуперации при спуске робота.

Для реализации различных режимов работы, подробного анализа энергетических характеристик и динамических свойств роботов с гибридными приводами используются алгоритмы управления, синтезируемые на основе разработанной математической модели и программы компьютерного моделирования.

## 2 Структурная схема и математическая модель мобильного робота с гибридным приводом

Эффективность гибридных приводов мобильных роботов существенно зависит от структуры и алгоритмов его управления. Рассмотрим параллельную структуру мобильного робота с мехатронным гибридным приводом (рис.1). Такая структура состоит из устройства управления, мехатронного силового агрегата и подвижных частей робота. Мехатронный силовой агрегат является управляемым источником момента сил для движения мобильного робота и должна обладать достаточной гибкостью в выборе и реализации различных режимов работы робота. В состав мехатронного силового агрегата входят ДВС, МЭП, два сцепления, управляемая коробка передач, аккумулятор, датчик скорости ДВС (скорости вращения коленчатого вала), датчик скорости вращения вала электродвигателя и устройство управления мехатронным силовым агрегатом. МЭП включает в себя бесконтактный двигатель постоянного тока с датчиком положения ротора, транзисторный инвертор, датчики токов и контроллер, реализующий векторное управление, и представляет собой следящую систему, замкнутую по токам в фазных обмотках электродвигателя.

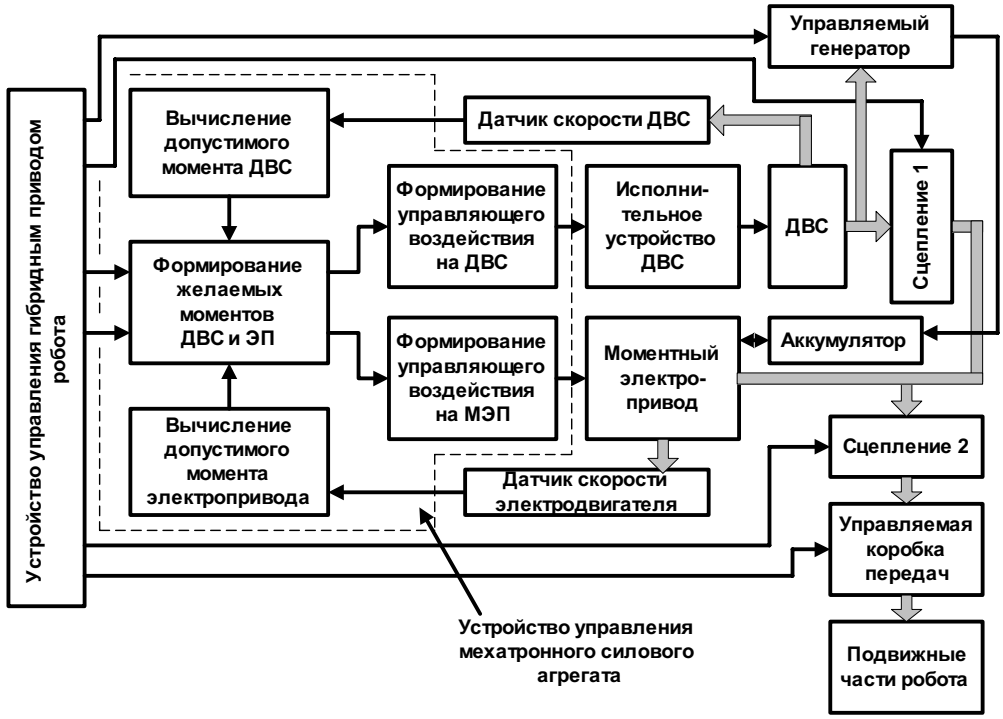



Рисунок 1 – Параллельная структура мобильного робота с гибридным приводом

При реализации совместной согласованной работы ДВС и МЭП удаётся добиться улучшения динамики при разгоне или торможении робота, а также повышения энергетических показателей приводной установки, что положительно сказывается на длительности работы робота до следующей заправки горючим. Устройство управления гибридным приводом робота, анализируя сложившуюся ситуацию и действуя на основании критериев эффективности функционирования робота, формирует управляющее воздействие $\beta$, содержащее сведения о желаемом результирующем моменте гибридного привода, и команду $K_P$, несущую информацию о режиме его работы. Управляющее воздействие и команда поступают на входы устройства управления мехатронного силового агрегата. На другие его входы из устройства управления гибридным приводом подаются команды управления сцеплениями, коробкой передач и генератором. На основании полученного управляющего воздействия устройство управления мехатронного силового агрегата формирует желаемые значения моментов $M_{ДВС.Ж}$ и $M_{МЭП.Ж}$, создаваемых ДВС и МЭП, которые зависят от их возможностей и требуемого режима работы гибридного привода. Определяемые этими возможностями допустимые значения моментов ДВС $M_{ДВС.ДОП}$ и МЭП $M_{МЭП.ДОП}$ вычисляются с учётом текущих значений скоростей вращения валов ДВС $\Omega_{ДВС}$ и электродвигателя $\Omega_{МЭП}$, информацию о которых дают соответствующие датчики скоростей (рис.1). Рассчитанные значения желаемых моментов преобразуются в управляющее воздействие $h_Ж$, поступающее на вход исполнительного устройства ДВС, влияющего на подачу топлива, и в управляющее воздействие $U_Ж$, подаваемое на вход МЭП. Отработка этих воздействий ДВС и МЭП приводит к возникновению фактических

моментов $M_{ДВС}$ и $M_{МЭП}$, образующих суммарный момент $M_{\Sigma}$ гибридного привода. Аккумулятор, служащий источником электроэнергии для электропривода, по мере необходимости подзаряжается от управляемого генератора, связанного с валом ДВС, а в режимах рекуперации получает энергию непосредственно от МЭП.

Математическая модель робота с гибридным приводом (рис.2) состоит из формирователя задающих воздействий, действующего на основе анализа сложившейся ситуации и критериев эффективности функционирования робота, и замкнутой системы регулирования скорости робота с пропорционально-интегральным регулятором.

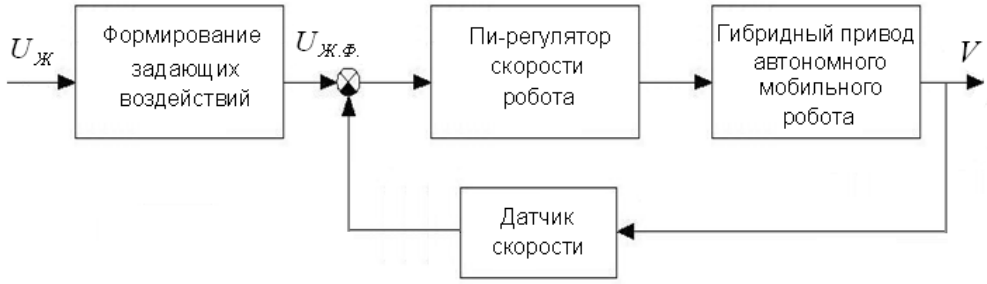



Рисунок 2 – Математическая модель мобильного робота

**Заключение**

Полученные результаты исследования будут полезны, прежде всего, при создании мобильных роботов, предназначенных для решения широкого круга задач, связанных с перемещением роботов на значительные расстояния с большими скоростями, в том числе для движения по пересечённой местности. Мобильные роботы с предложенным вариантом приводной установки будут интересны также при необходимости комбинирования режимов работы. Данные режимы работы могут быть основой для синтеза алгоритмов управления мобильным роботом с мехатронным гибридным приводом.

Управление мобильным роботом с мехатронной гибридной приводной системой будет осуществляться методами искусственного интеллекта с помощью обработки датчиков сенсорной информации, формирования моделей внешней среды, планирования поведений и принятия решений в зависимости от ситуации. Выбор режима работы будет зависеть от конкретного алгоритма управления движением робота, в зависимости от внешней обстановки и задачи, которая в данный момент ставится перед роботом.

**Благодарности**

Выражаю благодарность своему научному руководителю доктору технических наук, профессору Илюхину Юрию Владимировичу.

**Список литературы**

[1] Илюхин Ю.В., Яновская А.В. Управление мехатронным гибридным приводом автономного мобильного робота. Экстремальная робототехника // Труды XXI международной научно-технической конференции – Санкт-Петербург: Из-во «Политехника - сервис».

[2] Илюхин Ю.В., Яновская А.В. Компьютерное моделирование движений мобильного робота с гибридными приводами. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. Специальный выпуск «Специальная робототехника и мехатроника». – Москва: Из-во МГТУ им. Баумана, 2011.

# ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ЦЕХОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**В.Н. Казанцев, А.С. Кондратьев, В.Д. Котенев, В.А. Павлов**

Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК)
194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21, Россия
kazantsev@ipi.neva.ru
тел: +7 (812) 552-46-18, факс: +7 (812) 556-36-92

***Ключевые слова:*** *предупредительный контроль, качество продукции, информационная система контроля качества, оперативная обработка данных, аналитическая обработка данных*

**Abstract**

This paper considers the information system for preventive quality control that support techniques for individual, horizontal and vertical information control of products manufacturing intended for machining workshops of small-scale machine-building factories. The system provides a control and forecasting of products manufacturing quality on CNC tools in real time. Implementation features of quality control business processes ensure an controllability of the technological operations fulfilled at manufacturing workshops and a timeliness of the corrective actions.

## Введение

Предупредительный контроль качества производства продукции строится на концепции информационного контроля технологических процессов, предложенной в работе [1], которая предусматривает индивидуальный, горизонтальный и вертикальный информационный контроль производства продукции.

Индивидуальный информационный контроль должен быть реализован непосредственно на рабочем месте выполнения технологической операции и поддерживать управление условиями, влияющими на качество выполнения операции, а также являться источником данных для других видов информационного контроля. Данному виду контроля присущи высокие риски необъективности из-за возможных компромиссов исполнителей при оценке степени соответствия изготовленной продукции требованиям технологической документации.

Горизонтальный информационный контроль базируется на взаимоконтроле исполнителей при выполнении технологических операций и позволяет обеспечить объективность контроля, снизить уровень дефектов на 80-90% [1, стр. 73] и приблизиться к уровню сплошного контроля.

Вертикальный информационный контроль интегрирует результаты индивидуального, горизонтального и окончательного контроля, поддерживает типовые процессы менеджмента качества механического цеха, диспетчеризацию, анализ и управление качеством технологических и производственных процессов.

Наиболее известным решением, реализующим информационный контроль качества производства продукции, является MES-система Shopfloor-Online [2], которая позволяет регистрировать параметры продукции на рабочих местах операторов производственных участков, управлять контрольными границами контрольных карт параметров с рабочих мест технологов, проводить SPC анализ и автоматизировать формирование отчётных документов. Однако реализованные в системе методы статистического управления качеством предполагают действия

*после* фактов обнаружения отклонений, а для предупреждения отклонений необходимо осуществлять предупреждающие и корректирующие действия *до* их возникновения.

## 1 Состав информационной системы предупредительного контроля

Разработанная в ЦНИИ РТК информационная система предупредительного контроля (ИСПК) состоит из OLTP (online transaction processing) системы оперативной обработки и OLAP (online analytical processing) системы аналитической обработки. OLTP система функционирует в реальном масштабе времени и является источником данных для OLAP системы.

OLTP система построена на основе клиент-серверной архитектуры и включает базу технологических и производственных данных, базу данных измерений размеров деталей, базу данных электронных паспортов номерных деталей, серверные прикладные программы, клиентские прикладные программы компьютеризированных рабочих мест (КРМ) операторов станков, мастеров производственных участков, диспетчера по качеству, контрольного мастера (инженера) БТК цеха, контролёров БТК, технологов цеха и администратора ИСПК.

База данных измерений предназначена для хранения карт обмера деталей после выполнения технологических и контрольных операций с привязкой к дате и времени контроля, деталеоперациям, производственным заданиям, исполнителям и технологическому оборудованию.

База данных электронных паспортов номерных деталей предназначена для хранения данных об окончательных размерах изготовленных с целью их дальнейшего использования в сборочном производстве и при формировании электронных паспортов изделий.

OLTP система включает следующие функциональные подсистемы:

- подсистему регистрации технологических и производственных данных (ПРТП);
- подсистему производственного участка цеха (ППУ);
- подсистему бюро технического контроля цеха (ПБТК).

Подсистема ПРТП предназначена для обеспечения работы подсистем ППУ и ПБТК. Данные могут вводиться непосредственно с рабочих мест исполнителей или конвертироваться из баз данных MES-(MRP-, ERP-)систем.

Подсистема ППУ предназначена для информационной поддержки работы операторов станков и предупредительного контроля качества выполнения технологических операций.

Подсистема ПБТК предназначена для сбора результатов выполнения контрольных операций, контроля качества выполнения технологических операций исполнителями, автоматизации формирования отчётных документов.

Подсистемы ППУ и ПБТК ориентированы на конечных пользователей, не обладающих высокой квалификацией в области вычислительной техники. Клиентские приложения ИСПК имеют простой, удобный, легко осваиваемый интерфейс, предоставляющий конечному пользователю необходимые функции и справочные данные по использованию этих функций.

В OLAP систему входит программное обеспечение КРМ начальника цеха, заместителя начальника цеха по технической части и начальника БТК цеха. OLAP система имеет открытую архитектуру, обеспечивающую ее масштабируемость, и базируется на СУБД Microsoft SQL Server Standard Edition 2008 R2. Предусмотрено сопряжение компьютеризированных рабочих мест OLAP системы с базами данных OLTP системы для мониторинга и управления качеством выполнения технологических и производственных процессов.

## 2 Индивидуальный и горизонтальный информационный контроль в ИСПК

Для автоматизации процесса регистрации измерений КРМ операторов сопрягаются через USB-порт с многоканальным радиоприёмным устройством для приёма данных от электронных измерительных инструментов. Кроме того, предусмотрен ручной ввод значений измерений с клавиатуры компьютера, а также регистрация размеров детали калибрами. Опции клиентского приложения КРМ оператора обеспечивают отображение сменно-суточного задания,

операционного эскиза и данных из операционной карты деталеоперации, необходимых для контроля деталей и расчёта корректировок на размерный износ режущих инструментов.

Регистрируемые измерения автоматически идентифицируются с номером измеряемого размера, проверяются на наличие отклонения и отображаются на контрольной карте размера относительно границ поля допуска (рисунок 1). Для удобства работы оператора номер измеряемого размера отображается в окне с операционным эскизом. Для реализации функций линейного контроля исполнителей предусмотрена возможность многократного обмера каждой детали различными пользователями с формированием новых карт обмера и регистрацией решений о годности изготовленных деталей.

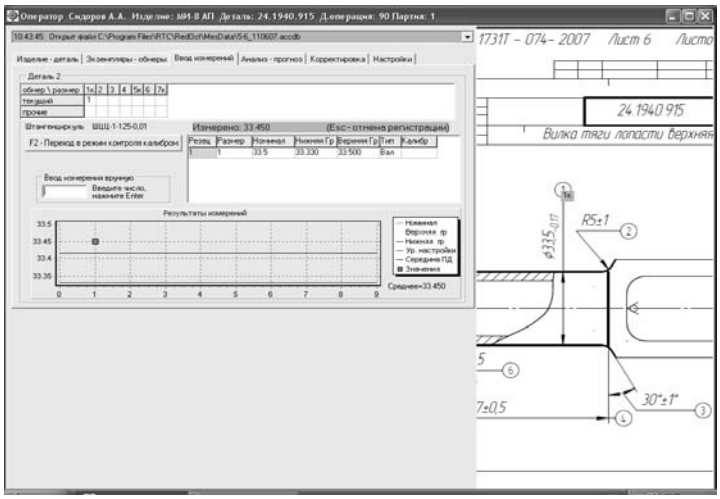



Рисунок 1 – Окно «Ввод измерений» КРМ оператора

Опция предупреждения появления несоответствий ППУ используется при выполнении технологических операций на станках с ЧПУ. Данное ограничение устанавливает необходимость использования одних и тех же режимов обработки при изготовлении всех деталей партии.

На станках с ЧПУ при изготовлении деталей партии после завершения наладки станка оператор контролирует вытачиваемые размеры деталей для своевременного ввода в станок корректировок на размерный износ режущих инструментов или их замены.

Реализованный на клиентском месте оператора алгоритм предупреждения является многоканальным. Количество каналов определяется количеством технологических переходов на операции и количеством координат станка. Каналы являются независимыми. В каждом канале обрабатываются измерения одного и того же размера у деталей в порядке их изготовления на станке для определения оценки вектора состояния размерного износа режущего инструмента для следующей изготавливаемой детали, т.е. решается задача экстраполяции с использованием рекуррентных процедур калмановской фильтрации [3].

Задача решается при следующих условиях. Модель размерного износа режущих инструментов из-за малого объёма партий изготавливаемых деталей принимается линейной. Ошибки наблюдения (геометрическая точность станка, предельно допустимые погрешности измерений) и случайные входные возмущения (влияние на величину размерного износа изменений твёрдости и разброс припусков заготовок между деталями партии) являются некоррелированными и имеют нормальное распределение. В результате решения задачи рассчитываются: значение корректировки для ввода в станок, экстраполированное с учётом размерного износа режущего инструмент значение размера для следующей детали и область (строб) вероятного местонахождения размера относительно границ поля допуска с уровнем значимости 0,05.

В окне «Анализ-Прогноз» КРМ оператора (рисунок 2) отображаются контрольные карты размеров с границами поля допуска. В полосе поля допуска каждой карты отображаются отметки и значения измерений размера последних пяти изготовленных деталей и строб вероятного местонахождения значения размера следующей по порядку изготовления детали. При

пересечении стробом границ поля допуска автоматически выдаётся предупреждение о необходимости корректировки процесса изготовления детали.

Алгоритм обработки адаптирован к пропускам ввода корректировок в станок и к пропускам регистрации размеров изготавливаемых деталей.

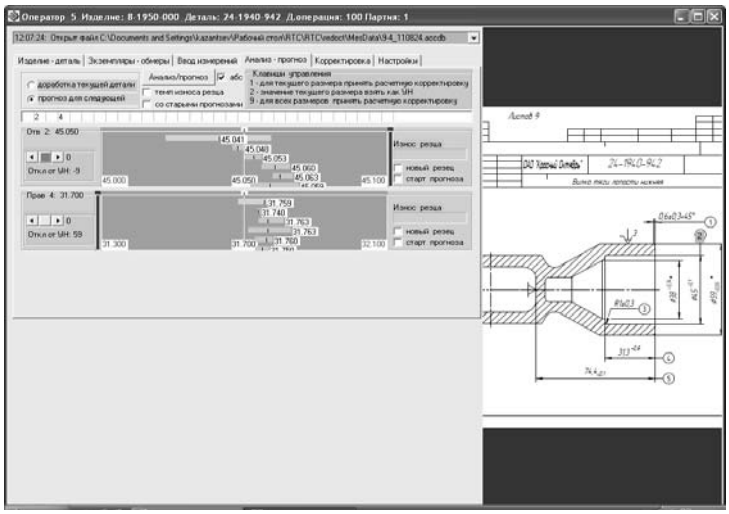


Рисунок 2 – Окно «Анализ-прогноз» КРМ оператора

Процесс функционирования алгоритма разбивается на этапы обнаружения и сопровождения траектории износа. На этапе обнаружения траектории необходимо ввести в КРМ значения одного и того же размера двух-трёх деталей в порядке их изготовления, а также зарегистрировать корректировки, введённые в станок перед изготовлением деталей. На этапе сопровождения с увеличением количества зарегистрированных размеров изготовленных деталей ошибки экстраполяции снижаются, и соответственно уменьшается размер строба. При пропуске измерений размер строба увеличивается.

Для горизонтального информационного контроля КРМ оператора переводится в режим работы «Контроль заготовок», отличающийся от режима контроля изготавливаемых деталей отсутствием опции предупреждения несоответствий. В ИСПК регистрируются только отклонения размеров от КД.

## 3 Вертикальный информационный контроль в ИСПК

Вертикальный информационный контроль в ИСПК выполняется контролёрами БТК цеха, технологами цеха, диспетчером по качеству БТК цеха, руководством цеха и поддерживается подсистемами ПБТК, ПРТП и системой OLTP. Взаимодействие пользователей в ИСПК обеспечивается за счёт реализации в системе следующих сценариев бизнес-процессов управления качеством: контроль предъявления продукции в БТК, принятие решений по отклонениям, контроль выполнения корректирующих мероприятий, контроль технологической дисциплины, летучий контроль исполнителей, контроль оформления электронных карточек актов на брак, контроль оформления электронных карточек технических решений. Логика бизнес-процессов управления качеством настраивается на пользовательском уровне в конфигураторе информационной системы, путём формирования схемы работ и схемы рассылки сообщений. Состояния бизнес-процессов управления прослеживаются и контролируются по задаваемой в конфигураторе продолжительности их выполнения с формированием уведомлений о необходимости выполнения работ.

### 3.1 Подсистема бюро технического контроля цеха

КРМ диспетчера по качеству предназначено для контроля в режиме реального времени деталеопераций, выполняемых на производственных участках цеха, и мониторинга бизнес-процессов управления качеством. Опции клиентского приложения обеспечивают отображение данных об активных компьютеризированных рабочих местах операторов станков, данных об

исполнителях и оборудовании, производственных заданиях, выполняемых деталеоперациях и количестве изготовленных деталей, карт обмера деталей и пропусков в контроле размеров.

В режиме реального времени диспетчеру выводятся сообщения о завершении наладки станка на новую операцию, готовности «первой детали» для предъявления в БТК и приёме «первой детали» контролёром, сообщения исполнителей о деталях, требующих решения, уведомления о необходимости выполнения исполнителями операций бизнес-процессов в соответствии с установленными схемами выполнения работ. Предусмотрен ввод с КРМ диспетчера сообщений о необходимости принятия корректирующих действий и запуск сценариев выполнения бизнес-процессов управления качеством.

Функции КРМ контролёров ПБТК ограничиваются регистрацией результатов контроля продукции и отличаются от КРМ операторов реализацией различных последовательностей обмера деталей, обнаружением и регистрацией ошибок измерения параметров деталей операторами.

Функциональность КРМ инженера по качеству (контрольного мастера) обеспечивает распределение производственных заданий между контролёрами БТК цеха и составление отчётных документов. Отличительной особенностью КРМ является использование графа технологического наследования для определения причин возникновения несоответствий. Конструкторские и технологические рёбра графа задают зависимости окончательных размеров детали от результатов выполнения операций технологического процесса, параметров заготовки, использованного оборудования, оснастки и других влияющих факторов. При обеспечении в цехе прослеживаемости деталей партии, например, по их индивидуальным номерам, появляется возможность идентификации экземпляров оборудования и табельных номеров исполнителей, ответственных за обнаруженные отклонения. Алгоритм анализа графа технологического наследования используется также в OLAP системе для статистического анализа причин появления несоответствий.

### 3.2 Подсистема регистрации технологических и производственных данных

Клиентские приложения ПРТП предназначены не только для регистрации технологических и производственных данных в ИСПК, но и предоставляют начальникам производственных участков (мастерам) и технологам цеха данные о качестве изготовленных деталей и качестве выполнения технологических операций.

Клиентское приложение КРМ начальника производственного участка обеспечивает в режиме реального времени мониторинг качества выполнения производственных заданий операторами станков, отображение сообщений о необходимости ввода данных для принятия решения по выявленным отклонениям, вывод результатов анализа для установления шифра брака, данных о планируемых мерах по предупреждению появления несоответствующей продукции, данных о выполнении корректирующих и предупреждающих действий. Предусмотрена возможность формирования сводного отчёта о результатах работы производственного участка за выбранный промежуток времени.

Интерактивный пользовательский интерфейс КРМ технолога цеха поддерживает операции группирования однородных данных для расчёта интервальных и моментных статистических показателей качества продукции, показателей воспроизводимости Ср, Срк и возможности Рр, Ррк технологических процессов [4], регистрацию решений по выявленным отклонениям, данных о планируемых мерах по предупреждению появления несоответствующей продукции в соответствии с установленной в ИСПК схемой работ.

### 3.3 Система аналитической обработки

OLAP система реализована в форме киоска данных и секционирована по производственным участкам. Функциональные возможности системы обеспечивают быструю детализацию и всестороннее исследование данных на компьютеризированных рабочих местах начальника цеха, заместителя начальника цеха, начальника БТК.

В OLAP системе используются следующие измерения многомерной базы данных: время (гранулированность – смена работы производственного участка), оборудование, продукция, производственная структура, производственный персонал, технологический процесс, несоответствия, причины появления несоответствий, причины внепланового прекращения выполнения производственных заданий, решения, принятые по несоответствующей продукции. В киоске данных регистрируется несколько десятков фактов по выбранным измерениям.

Система аналитической обработки имеет простой и удобный интерфейс для многомерного анализа кубов данных в реальном масштабе времени, создания произвольного набора аналитических выборок и формирования отчетных форм, графиков и диаграмм

Функционал системы содержит как обычные функции анализа данных (анализ изменений за период, ранжировании показателей, расчёт долей в выборке, отклонений от средних значений и др.), так и алгоритмы интеллектуального анализа класса Data Mining. Автоматически выполняется контроль статистически устойчивого состояния регистрируемых фактов по следующим измерениям: оборудование, продукция, производственная структура и производственный персонал с формированием сообщений о необходимости принятия корректирующих мер. Для анализа причин появления несоответствий выполняется поиск и сопоставление аналогий, хранящихся в базе данных [5]. С использованием специальных процедур оптимального вывода формируется минимальный список причин и обоснование принятого системой решения.

**Заключение**

Разработанная информационная система предупредительного контроля интегрирует процессы управления качеством производства продукции механического цеха и может служить базовым программно-аппаратным комплексом для систем менеджмента качества мелкосерийных предприятий машиностроения.

Результаты выполненных исследований могут быть использованы при производстве наукоемкой техники на машиностроительных предприятиях оборонно-промышленного комплекса с целью повышения качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции. Область применения охватывает производство изделий двойного применения, а также нефтегазовой промышленности, энергетики, транспорта и других отраслей.

**Благодарности**

Выражаем признательность сотрудникам Санкт-Петербургского открытого акционерного общества «Красный Октябрь» за возможность реализации пилотного проекта информационной системы предупредительного контроля в механическом цехе предприятия.

**Список литературы**

[1] Сигео Синго Изучение производственной системы Тойота с точки зрения организации производства.- М.: ИКСИ, 2006.
[2] Shopfloor-Online Lighthouse systems (www.lighthouseindia.com).
[3] Балакришнан А. В. Теория фильтрации Калмана. - М.: Мир, 1988.
[4] ГОСТ Р ИСО 21747-2010 Статистические методы. Статистики пригодности и воспроизводимости процесса для количественных характеристик качества. – М.: Стандартинформ, 2012.
[5] А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, И.И. Холод, М.Д.Тесс, С.И. Елизаров Анализ данных и процессов.- СПб.: БХВ-Петербург, 2009.

# РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОМПЛЕКСНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В КОРПОРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

**С.А. Потрясаев[1], Б.В. Соколов[1], Е.Г. Цивирко[2], В.А. Зеленцов[1]**

[1]Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации
199178, Санкт-Петербург, 14 линия, 39, Россия
semp@mail.ru, sokol@iias.spb.su, v.a.zelentsov@gmail.com
тел: +7 (812) 328-01-03, факс: +7 (812) 328-44-50

[2]Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
sokol@iias.spb.su
тел: +7 (812) 328-01-03, факс: +7 (812) 328-44-50

***Ключевые слова:*** *корпоративная информационная система, планирование, катастрофоустойчивость, сложные технические системы, спутниковая система навигации*

**Abstract**
This article discusses the results of solving the problem of constructing a schedule of operations in the corporate information system and evaluation its robustness. Analysis of the obtained solutions provided. Recommendations for use of heuristic algorithms and the configuration of resources in terms of the perturbing effects of the environment at different levels formulated.

## Введение

Решение задачи управления современными организационно-техническими системами стремительно усложняется с ростом числа входящих в их состав подсистем, объектов и внутренних связей. Динамическое изменение целей и задач в указанных системах, воздействие возмущающих факторов внешней среды заставляют решать данную задачу в условиях существенной неопределённости. Для этого необходимо иметь соответствующие инструменты автоматизации управления.

В настоящей статье рассматривается автоматизация планирования работы (как одной из функций управления) корпоративной информационной системы (КИС) – представителя сложной организационно-технической системы [1]. Исходя из того, что заинтересованные лица предъявляют к сложным техническим системам (СТС) разнородные требования, целесообразно проводить комплексное планирование процессов в СТС и распределение её ресурсов, решая многокритериальные задачи выбора [2]. В основе автоматизации планирования работы КИС лежит алгоритм комплексного динамического планирования операций и распределения ресурсов [3]. Для учёта факторов неопределённости был применён алгоритм оценки робастности (нечувствительности плана к возмущающим воздействиям) найденных решений, основанный на построении аппроксимированных областей достижимости динамической системы, описывающей процесс программного управления КИС в пространстве показателей качества планирования, для случая интервально-заданных возмущающих воздействий [3].

## 1 Описание задачи планирования функционирования КИС

На концептуальном уровне рассматривалась динамическая интерпретация процессов выполнения операций в КИС – переход КИС из одного состояния в другое. При этом само состояние КИС характеризовалось заданной совокупностью параметров соответствующих операций.

Для формального описания указанной выше задачи планирования операций и распределения ресурсов в КИС использовалось несколько моделей, отражающих различные аспекты её функционирования [4]:

- программного управления операциями;
- модель программного управления ресурсами;
- модель управления потоками.

На основе указанных частных динамических моделей была сформирована обобщённая динамическая модель процессов функционирования КИС:

$$(1)\quad M=\left\{\begin{array}{l}\vec{u}(t)\,|\,\dot{\vec{x}}=\vec{f}(\vec{x},\vec{u},t);\\ \vec{h}_0(\vec{x}(t_0))\le\vec{O};\vec{h}_1(\vec{x}(t_f))\le\vec{O};\\ \vec{q}^{(1)}(\vec{x},\vec{u})=\vec{O};\vec{q}^{(2)}(\vec{x},\vec{u})\le\vec{O};\end{array}\right\},$$

где $\vec{x}=\left\|\vec{x}^{(o)T}\vec{x}^{(\kappa)T}\vec{x}^{(n)T}\right\|^T$; $\vec{u}=\left\|\vec{u}^{(o)T}\vec{u}^{(\kappa)T}\vec{u}^{(n)T}\right\|^T$ – обобщённые векторы состояния и управления КИС; $\vec{h}_1,\vec{h}_2$ – известные вектор-функции, с помощью которых задаются краевые условия для вектора $\vec{x}$ в моменты времени $t=t_0$ и $t=t_f$; $\vec{q}^{(1)},\vec{q}^{(2)}$ – векторные функции, с помощью которых задают основные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, накладываемые на процесс функционирования КИС.

Векторный показатель системы показателей качества планирования, компонентами которого являются векторы частных показателей качества планирования:

$$(2)\quad \vec{J}_{об}=\left\|\vec{J}^{(o)T}\vec{J}^{(\kappa)T}\vec{J}^{(n)T}\right\|^T.$$

Компоненты обобщённых векторов состояния, управления и показателей качества относятся к записанным ранее моделям.

Применённый алгоритм комплексного планирования операций и распределения ресурсов в КИС основан на принципе максимума Л.С. Понтрягина, методе локальных сечений В.Г. Болтянского и подробно описан в [3].

## 2 Учет факторов неопределенности

Факторы неопределённости в разработанной модели учитывались посредством величин $\xi_j^{(в,1)}$ и $\xi_j^{(в,2)}$, влияющих на ограничения $\vec{q}^{(1)}$ и $\vec{q}^{(2)}$ в модели (1). Величины $\xi_j^{(в,1)}$ и $\xi_j^{(в,2)}$ – это коэффициенты перед максимальной пропускной способностью вычислительных средств и каналов связи, заданные максимальным и минимальным значением. В пространстве двух заданных показателей качества планирования (полнота обработки информации и полнота её передачи) строились аппроксимации областей достижимости рассматриваемой динамической системы на основе четырёх планов с крайними значениями величин $\xi_j^{(в,1)}$ и $\xi_j^{(в,2)}$: обе величины максимальны; $\xi_j^{(в,1)}$ максимальна, $\xi_j^{(в,2)}$ минимальна; $\xi_j^{(в,1)}$ минимальна, $\xi_j^{(в,2)}$ максимальна; обе величины минимальны. Аналогично в этом же пространстве показателей задавалась область, ограниченная минимально допустимыми значениями указанных показателей качества (на основе экспертных оценок или требований, предъявляемых к процессу функционирования КИС). Робастность оценивалась геометрически, путём вычисления площади пересечения аппроксимированной области достижимости и области допустимых минимальных и максимальных значений показателей качества.

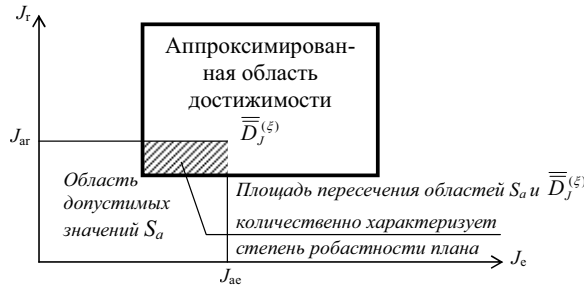



Рисунок 1 – Геометрическая оценка робастности

### 3 Результаты решения задачи оптимизации планирования

На основе рассмотренных выше концепций КИС, моделей и алгоритмов был создан прототип программного комплекса, предназначенный для подтверждения их конструктивности и корректности.

С использованием данного прототипа программного комплекса были проведены экспериментальные расчёты на примере решения задачи комплексного оперативного планирования операций и распределения ресурсов в центре управления полётами (ЦУП) навигационных космических аппаратов (НКА), применяемых для определения местоположения объекта обслуживания беззапросным способом.

Для постановки указанной задачи было введено несколько множеств. Во-первых, множество НКА $A = \{A_i, i \in N\}, N = \{1, \ldots, n\}$, входящих в состав орбитальной системы НКА. Для правильной работы орбитальной системы НКА необходимо постоянно выполнять комплекс операций для уточнения и коррекции навигационной информации, хранящейся в навигационно-временном комплексе каждого НКА. Данную задачу выполняет наземный комплекс управления, в частности, ЦУП, в состав которого, кроме прочего, входят пункты обработки информации и управления. Обозначим их множество $B = \{B_j, j \in M\}, M = \{1, \ldots, m\}$. Кроме того, были введены в рассмотрение еще два множества: множество выполняемых в ЦУП операций $D = \{D_\kappa^i, \kappa \in \Phi^i\}, \Phi = \{1, \ldots, S_i\}$, а также множество потоков $P = \{P_\rho^i, \rho \in \mathrm{P}^i\}, \mathrm{P} = \{1, \ldots, \Pi_i\}$.

С учётом вышеизложенного, на содержательном уровне задача комплексного планирования операций в ЦУП была сформулирована следующим образом: необходимо найти такую допустимую программу управления ЦУП (план его функционирования), в ходе реализации которой будут выполнены своевременно и полностью все операции, входящие в соответствующие технологические циклы управления НКА, а качество обеспечения объекта обслуживания навигационной информацией удовлетворяло бы заданным требованиям. При этом если будет получено несколько допустимых программ управления ЦУП, то необходимо выбрать наилучшую программу (план) с точки зрения принятых критериев оптимальности.

Первым критерием оптимальности плана выбирается своевременность закладки информации на борт НКА. Второй по значимости критерий – точность выполнения краевых условий модели управления операциями (полнота выполнения операций). Третий – равномерность загруженности ресурсов на интервале планирования.

Величина «выигрыша» от применения алгоритма построения оптимального плана зависит от исходных данных, более того, при многократном решении задачи комплексного планирования операций в КИС с различными их вариантами наблюдались определённые закономерности у данной зависимости. Для выявления этих закономерностей было проведено более

1500 экспериментов, что стало возможно благодаря использованию разработанного программного генератора исходных моделей.

В ходе проведённых экспериментов было выявлено, что наибольшее влияние оказывают суммарное количество выполняемых операций на интервале планирования, а также величина, равная отношению среднего арифметического объёмов данных всех операций $a_{cp}^{(n,1)}$ к произведению среднего арифметического объёмов операции $a_{cp}^{(o,1)}$ и среднего арифметического всех интенсивностей обработки операции ресурсом $C_{cp}^{(n,1)}$. Для упрощения записи это соотношение выражено в процентах, названо «плотность операции» и обозначено *P*:

$$P = \frac{a_{cp}^{(n,1)}}{C_{cp}^{(n,1)} \cdot a_{cp}^{(o,1)}} \cdot 100\% . \quad (3)$$

На рисунке 2 приведён график поверхности в пространстве следующих показателей: количество НКА, плотность операции, улучшение обобщённого показателя качества по сравнению с эвристическим планом (FIFO).

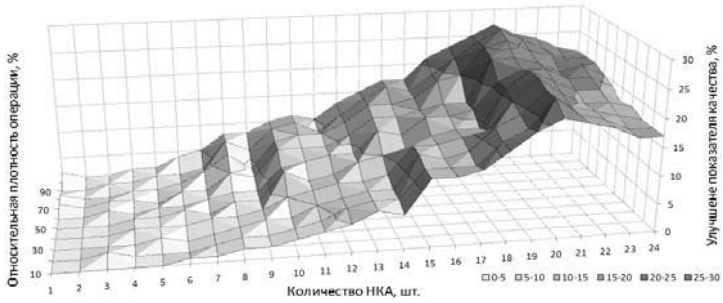



Рисунок 2 – Результаты исследования областей эффективного применения алгоритма динамического планирования

График построен на основе 720 экспериментов. Для каждой точки поверхности решалось три задачи с фиксированием плотности операций и числа НКА, но варьированием других параметров модели (дисперсия объёмов выполняемых операций, соотношение суммарного объёма операций к числу процессов). Итоговая точка по вертикальной оси формировалась как среднее арифметическое улучшений показателей качества трёх решений. Характеристики ресурсов оставались неизменными для всей серии экспериментов.

Улучшение показателя качества («выигрыш») – это отношение разницы обобщённых показателей качества эвристического (FIFO) и оптимального плана к обобщённому показателю качества эвристического (FIFO) плана.

Построенный график справедлив для одного заданного набора исходных данных и при изменении структуры и характеристик указанные на графике значения не применимы. Но, как показал анализ результатов нескольких серий экспериментов, общий вид графика остаётся неизменным. Таким образом, можно обобщить найденные закономерности для ряда схожих задач. При минимальной загруженности ресурсов (занятость каждого ресурса не превосходит $0{,}1 \cdot T$, где $T$ – интервал планирования) использовать алгоритм динамического планирования нецелесообразно, так как улучшение показателя качества не превосходит 3%. Первый значимый эффект от применения динамического планирования наблюдается при занятости ресурсов $0{,}2 \cdot T$ и составляет 5–10%. Далее величина улучшения показателя качества нарастает по закону, близкому к линейному. Наибольший выигрыш, 23–27%, проявляется при занятости ресурсов $0{,}8 \cdot T$. При дальнейшем увеличении загруженности ресурсов (увеличении числа обслуживаемых НКА) происходит постепенный спад величины улучшения показателя качества. При

максимальной загрузке (24 НКА в рассматриваемом примере) данная величина снижается до отметки 17–20%. Так, получив эталонные решения для нескольких опорных точек, соответствующих типовым вариантам исходных данных, можно определить целесообразность использования того или иного эвристического алгоритма вместо алгоритма динамического планирования для повышения оперативности расчёта плана.

Также выявлено, что увеличение числа и производительности доступных ресурсов происходит сдвиг точки наивысшего выигрыша в сторону большего числа НКА.

Практическая ценность данных исследований состоит в возможности повышения оперативности и качества функционирования корпоративной информационной системы за счёт комплексного оптимального планирования операций и распределения её ресурсов, а не за счёт наращивания аппаратных мощностей.

## 4 Результаты решения задачи оценки робастности планов

Вторая серия экспериментов была направлена на выявление зависимости робастности полученного решения от исходных данных. Проведённый на основе результатов экспериментов анализ показал, что в условиях высокой нагрузки на вычислительные ресурсы в большей степени на робастность решения влияет их состав и параметры. Так, планы, реализуемые на однородных (близких по значению параметров) ресурсах, в среднем на 12% более робастны, чем планы, реализуемые на разнородных, поэтому в дальнейших экспериментах рассматривались только однородные ресурсы.

Для проведения вычислительного эксперимента использовались следующие модели: с одним ресурсом, способным параллельно реализовывать $R$ операций, суммарной производительностью $V$ условных единиц; с двумя ресурсами половинной мощности ( $\frac{1}{2}R$ и $\frac{1}{2}V$ ); с тремя ресурсами мощностью $\frac{1}{3}R$ и $\frac{1}{3}V$ ; с шестью ресурсами мощностью $\frac{1}{6}R$ и $\frac{1}{6}V$ . Для каждого варианта конфигурации ресурсов были построены планы реализации технологий в условиях различных сценариев возмущающих воздействий: $0.1 \le \xi^{(\sigma,1)} \le 0.9$ и $0.1 \le \xi^{(\sigma,2)} \le 0.9$ . График зависимости показателя, оценивающего робастность плана, от сценария возмущающих воздействий и конфигурации ресурсов приведён на рисунке 3. Для данного графика большее значение указанного показателя соответствует лучшей робастности полученного плана.

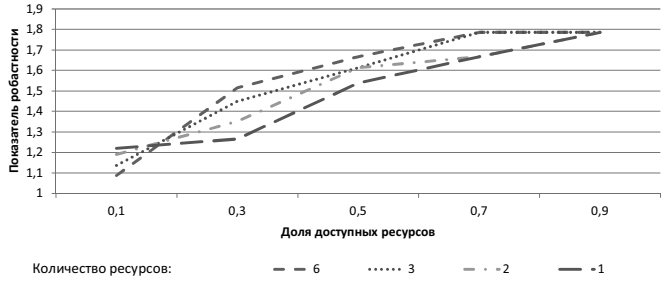



Рисунок 3 – График зависимости показателя робастности от исходных данных

В проведённом эксперименте декомпозиция суммарной производительности ресурсов, то есть использование шести ресурсов с меньшей производительностью вместо одного высокопроизводительного, позволила повысить робастность решения до 24% при 30% доступной мощности ресурсов.

Выявлен ряд других зависимостей, описанных ниже.

При слабых возмущающих воздействиях (доступно 90% ресурсов) конфигурация ресурсов не оказывает влияния на робастность полученного решения.

По мере нарастания возмущающего воздействия внешней среды выигрыш в робастности имеют планы, реализуемые на декомпозированных ресурсах. Чем большее количество ресурсов используется, тем более робастным является решение.

При сильных возмущениях внешней среды (доступно не более 10% ресурсов) наоборот, большую робастность показывают планы, реализуемые на одном производительном ресурсе. Полученный результат объясняется тем, что производительность возмущённых декомпозированных ресурсов становится настолько мала, что ни один из них не способен самостоятельно выполнить некоторые операции реализуемой технологии за отведённое время. В данной ситуации уменьшение числа и повышение производительности ресурсов может повысить робастность плана.

## Заключение

Описанные в статье рекомендации приобретают бóльшую значимость при использовании механизма виртуализации ресурсов. В случае жёстко заданной аппаратной конфигурации отсутствует возможность оперативно изменять структуру и параметры ресурсов. Согласно результатам проведённых экспериментов, необходимость декомпозиции или агрегирования мощностей ресурсов зависит от уровня возмущающих воздействий, которые, в свою очередь, не могут быть заранее точно известны и изменяются в ходе реализации плана. Таким образом, на основе указанных рекомендаций можно на этапе реализации плана проводить целенаправленную реконфигурацию виртуальных ресурсов в зависимости от складывающейся обстановки.

## Благодарности

Междисциплинарные исследования по рассматриваемой тематике проводились при финансовой поддержке РФФИ (гранты 10-07-00311-а, 11-08-01016-а, 11-08-00767-а, 12-06-00276-а. 12-07-00302-а), ОНИТ РАН (проект №2.11), Программы ESTLATRUS: проекты 1.2/ELRI-121/2011/13, 2.1/ELRI-184/2011/14.

## Список литературы

[1] Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов – М.: Наука, 2006. – 410 с.

[2] Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами // Проблемы управления и информатики.-2002.-№5. – с. 103–117.

[3] Потрясаев С.А. Постановка и пути решения задачи комплексного планирования реконфигурации катастрофоустойчивых систем. Труды СПИИРАН / РАН. С.-Петербург. ин-т информатики и автоматизации / Под общ. ред. Р. М. Юсупова. - Вып. 3, т. 2. - СПб.: Наука, 2006. - 406 с. ISBN 5-02-025122-4.

[4] Калинин В.Н., Резников Б.А. Теория систем и управления (структурно-математический подход). – Л.: ВИКИ, 1987.

# АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПОТОКОВЫХ ДИАГРАММ

**Е.В. Горельская[1], А.С. Боровский[2]**

[1]Оренбургский государственный аграрный университет
460000, Оренбург, ул. Челюскинцев, 18, Россия
orensau@mail.ru
тел: +7 (3532) 77-52-30, факс: +7 (3532) 77-52-30

[2]Оренбургский государственный университет
460018, Оренбург ГСП, пр. Победы, 13, Россия
post@mail.osu.ru
тел: +7 (3532) 77-67-70, факс: +7 (3532) 72-37-01

***Ключевые слова:*** *система физической защиты, автоматизированное проектирование, потоковые диаграммы, функциональная модель, структурная модель, критический элемент, привлекательность, уровень защищенности*

**Abstract**

The article provides a method of automating the design phase with the use of standard DFD, which is modified by a given subject area. PPS should begin planning to build a functional model of production and process (business-diagram) of the object based on the DFD-diagrams, followed by the construction of structural and logical object model is also based on the DFD-diagrams. The design process is merged structure - the logical and functional models. As a result, the design obtained by the structural and logical object model showing it potentially - hazardous areas and critical elements, respectively. This stage is the firs tstep in designing a PPS.

## Введение

Проектирование системы физической защиты (СФЗ) потенциально-опасных объектов (ПОО) - это сложный многоуровневый процесс, заключающийся в построении оптимальной системы, способной максимально использовать свои ресурсы. ПОО – это объекты, террористический акт на которых может привести к возникновению чрезвычайной ситуации с социально-экономическими последствиями [1].

Исходными данными для проектирования СФЗ являются результаты анализа уязвимости объекта, цель которого является определение предметов защиты, возможных угроз и составление моделей нарушителей, оценка ущерба от возможной реализации угроз, оценка уязвимости объекта. На практике данный этап является самым сложным и плохо формализуемым, например, само понятие “угроза” четко не определено, а расчет значения вероятности осуществления угрозы не может базироваться на статистическом анализе (из-за отсутствия такового).

Учитывая распространение и степень важности СФЗ, необходимо активно развивать системы автоматизации проектирования (САПР), относящиеся к ним. В настоящее время работы в основном сосредоточены в сторону моделирования уже существующей СФЗ для проверки ее эффективности и устранения ошибок. Однако до сих пор не существует автоматизированной системы не только моделирующей, но и проектирующей СФЗ на всех ее этапах.

Первоначально необходимо создать проект СФЗ с возможностью его оптимизации. Но среди существующих пакетов программного обеспечения такие возможности не реализованы. Сейчас СФЗ проектируются экспертом без специального программного обеспечения (ПО).

Затем модель СФЗ анализируется существующим ПО и выдаются рекомендации по пере строению сегментов или всей СФЗ в целом.

При проектировании СФЗ эксперт может только прогнозировать или предугадывать множественные показатели. Подобные прогнозы представляют собой некоторые лингвистические формы, которыми можно оперировать, используя аппарат нечетких величин. Следовательно, необходимо в системы проектирования вводить интеллектуальные составляющие, позволяющие моделировать рассуждения экспертов.

В статье приводится методика автоматизации данного этапа проектирования с использованием стандарта DFD, который модифицирован под данную предметную область. Начинать проектирование СФЗ необходимо с построения функциональной модели производственно-технологического процесса (бизнес-диаграмма) объекта на основе DFD-диаграмм, затем следует построение структурно-логической модели объекта также на основе DFD-диаграмм. В процессе проектирования происходит слияние структурно – логической и функциональной моделей.

В результате проектирования получается структурно- логическая модель объекта с указанием на нем потенциально – опасных участков и критических элементов соответственно. Данный этап является первым звеном в проектировании СФЗ.

**Основная часть**

Отнесение критических элементов к привлекательным или непривлекательным для совершения ТА проводится с учетом следующих характеристик объекта и его критических элементов:

- доступность критического элемента для совершения по отношению к нему ТА, связанная с условиями функционирования объекта, доступа персонала и других лиц, расположения и других особенностей объекта;
- степень уязвимости конструкции и систем, обеспечивающих безопасность критического элемента (сложность совершения ТА, время на совершение ТА по достижении критического элемента);
- приемлемость риска при совершении ТА из-за ее последствий для самих террористов;
- степень последствий ТА;
- потенциальная опасность критического элемента;
- модель нарушителя**.**

Необходимо понимать, что все эти критерии имеют нечеткую природу. Эксперт не может точно определить значение этих параметров, а может только охарактеризовать их оперирую такими нечеткими понятиями как «высокий», «средний» и «низкий».

Для построения функциональной модели производственно-технологического процесса и структурно-логической модели объекта выбран стандарт DFD, который модифицирован до стандарта ZDFD (Zone DFD). Так как любой объект, элемент или зону объекта можно представить как зону, обладающую определенными характеристиками, то из всех элементов DFD стандарта оставим только внешнюю сущность – «зона».

При построении функциональной модели производственно-технологического процесса к обычным свойствам «зоны» добавим доступность, степень уязвимости, приемлемость риска, степень последствий ТА и потенциальную опасность для принятой модели нарушителя (рисунок 1).

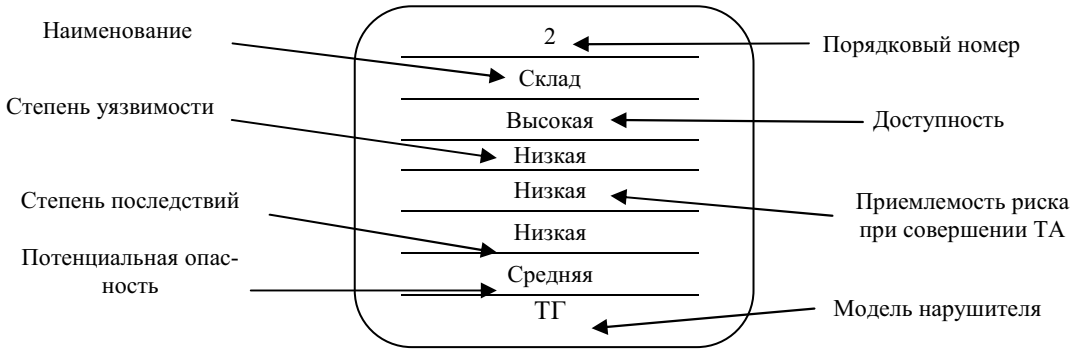



Рисунок 1 – Изображение зоны ZDFD функциональной модели производственно-технологического процесса

При построении структурно-логической модели объекта оставим только обычные свойства «зоны» (рисунок 2).

Рисунок 2 – Изображение зоны ZDFD структурно-логической модели объекта

В процессе проектирования происходит слияние структурно – логической и функциональной моделей. В процессе слияния на основе данных, указанных экспертом, делается вывод о необходимом уровне защищенности каждого критического элемента согласно таблице 1. [1]

Таблица 1 – Зависимость уровня защищенности критических элементов от их потенциальной опасности и важности

| Потенциальная опасность критического элемента | Модель нарушителя | Привлекательность критического элемента для совершения ТА | Требуемый уровень защищенности |
|---|---|---|---|
| высокая | ТГ | привлекателен | I |
| высокая | ТГ, ГН | привлекателен | II |
| высокая | ТГ, ГН, ОН | привлекателен | III |
| средняя | ГН, ОН | не привлекателен | IV |
| низкая | ОН | не привлекателен | V |

При определении требуемого уровня защищенности также необходимо учитывать влияние данной зоны на соседние согласно функциональной модели производственно-технического процесса. При непосредственном влиянии на критический элемент, требуемый уровень защищенности зоны устанавливается на одну ступень выше.

Привлекательность критического элемента для совершения ТА зависит от доступности критического элемента, степени уязвимости, приемлемости риска при совершении ТА и степени последствий ТА для принятой модели нарушителя (эти значения вносит эксперт при построении функциональной модели).

Привлекательность критического элемента с заданной потенциальной опасностью оценивается на основе значения наиболее важного по приоритету для принятой модели нарушителя

критерия. Приоритет критериев для принятой модели нарушителя определяется с помощью метода анализа иерархий Т. Саати. [2] Сутью этого метода являются парные сравнения элементов по отношению к их воздействию на общую для них характеристику.

Используемая шкала оценок метода анализа иерархий приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Смысл экспертных оценок в методе анализа иерархий

| Шкала интенсивности | Качественные суждения |
|---|---|
| 1 | равная важность |
| 3 | незначительное превосходство одного над другим |
| 5 | значительное превосходство одного над другим |
| 7 | явное превосходство одного над другим |
| 9 | абсолютное превосходство одного над другим |
| 2, 4, 6, 8 | соответствующие промежуточные значения |

Первым шагом является построение квадратной матрицы попарных сравнений 4×4. На пересечении строки и столбца двух критериев ставится значение сравнения силы воздействия для критерия, стоящего в левом столбце, по отношению к критерию, стоящему в верхней строке.

Пример матрицы парных сравнений для элемента с высокой потенциальной опасностью при принятой модели нарушителя террористическая группа (ТГ) представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Матрица попарных сравнений для элемента с высокой потенциальной опасностью при принятой модели нарушителя ТГ

| Критерий привлекательности | Доступность | Степень уязвимости | Приемлемость риска | Степень последствий ТА |
|---|---|---|---|---|
| Доступность | 1 | 1/3 | 1/3 | 1/9 |
| Степень уязвимости | 3 | 1 | 5 | 1/9 |
| Приемлемость риска | 3 | 1/5 | 1 | 1/9 |
| Степень последствий ТА | 9 | 9 | 9 | 1 |

Изначально такие матрицы для различных комбинаций значений потенциальной опасности критического элемента и модели нарушителя заложены в базу знаний, но при необходимости эксперт может их редактировать.

Следующим шагом является вычисление вектора приоритетов по данной матрице. [2] Для этого умножим элементы каждой строки и извлечем корень 4 степени. Нормализуем полученные числа. Это и будут значения приоритетов для каждого критерия соответственно.

В результате получается структурно- логическая модель объекта с указанием на ней потенциально – опасных участков и критических элементов с требуемым для них уровнем защищенности соответственно. Структурно- логическая модель объекта представлена в виде графа, где вершины – зоны, а ребра – возможные пути между зонами.

Наиболее приемлемой реализацией данной методики проектирования является параллельное построение функциональной модели производственно-технологического процесса и структурно-логической модели объекта.

Интерфейс ПО состоит из двух графических редакторов. В первом реализована возможность создания функциональной модели производственно-технологических процессов объекта с указанием значения требуемых характеристик для каждой зоны. Эксперт имеет возможность расставлять зоны в рабочей области и связывать их потоками. Во втором редакторе реализована возможность создания структурно-логической модели объекта. Здесь эксперт расставляет зоны и указывает возможные пути перемещения между зонами.

Финальным этапам является структурно-логическая модель объекта с указанием на ней требуемого уровня защищенности для каждого критического элемента соответственно. Она строится автоматически. При этом требуемый уровень защищенности определяется по следующему алгоритму:

1) Определение наиболее важного критерия привлекательности для критического элемента с заданной потенциальной опасностью для установленной модели нарушителя с помощью метода анализа иерархий;
2) Определение привлекательности критического элемента по найденному критерию;
3) Определение требуемого уровня защищенности критического элемента по его привлекательности и уровню потенциальной опасности для заданной модели нарушителя;
4) Уточнение требуемого уровня защищенности критических элементов в зависимости от их влияния на другие критические элементы согласно функциональной модели производственно-технического процесса.

ПО реализовано с помощью объектно-ориентированного языка программирования Python 3.2. Данные обо всех проектах и созданных моделях хранятся в базе данных.

**Заключение**

В связи с широким распространением систем физической защиты и степени их важности необходимо развивать система автоматизированного проектирования в этой области. В настоящее время работы по автоматизации проектирования ведутся в строну моделирования уже существующих СФЗ для устранения ошибок и повышения эффективности их работы. Но в тоже время еще не существует автоматизированной системы, которая проектирует СФЗ.

Проектирование СФЗ необходимо начинать с построения функциональной модели производственно-технологического процесса объекта, параллельно следует построение структурно-логической модели объекта. В процессе проектирования происходит слияние структурно – логической и функциональной моделей в структурно – логическую модель объекта с указание необходимого уровня защищенности его критических элементов.

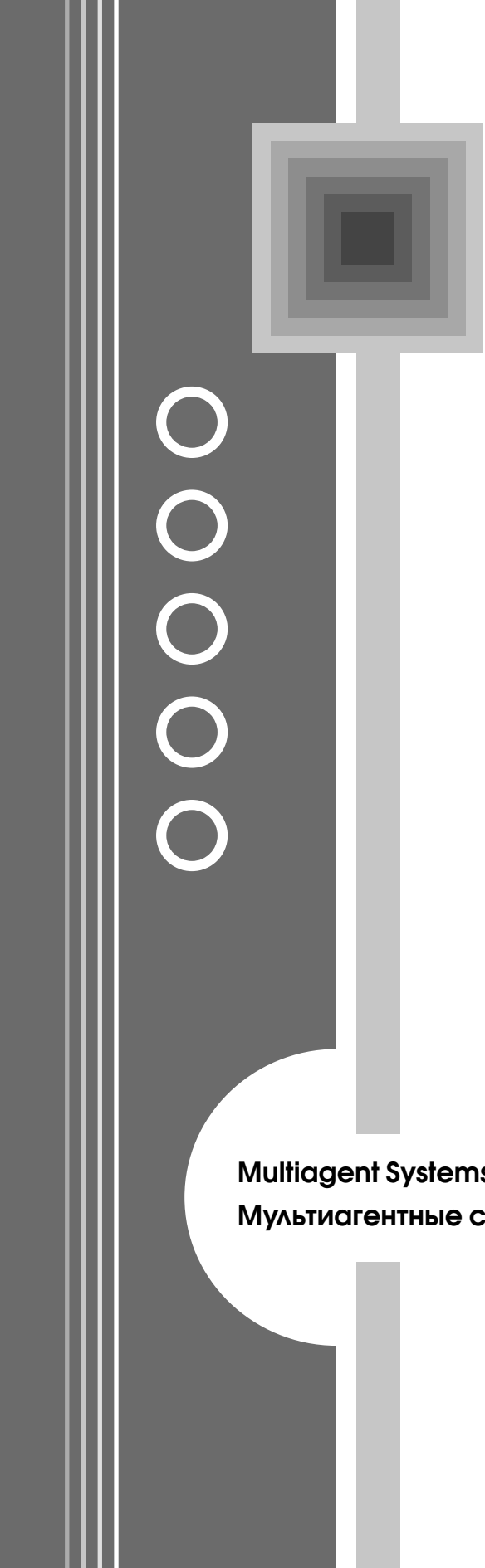
При автоматизации этого процесса:

1) повышается эффективность и качество изучения производственно-технических процессов и выявления потенциально опасных участков и критических элементов объекта;
2) эксперт не устанавливает критические элементы объекта;
3) эксперт не выполняет работу по установлению требуемого уровня защищенности критических элементов;
4) вся собранная информация и построенные модели хранятся в базе данных.

Недостатком автоматизации построения структурно – логической модели объекта с указанием необходимого уровня защищенности его критических элементов является то, что эффективность работы системы зависит от степени наполняемости базы знаний и ее актуальности.

**Список литературы**

[1] Приказ министра промышленности и энергетики РФ от 04.05.2007 №150 «Об утверждении рекомендаций по антитеррористической защищенности объектов промышленности и энергетики».
[2] Саати Т.Л. Взаимодействие в иерархических системах // Техническая кибернетика. 1979. №1. – С. 68-84.



# Multiagent Systems and Technologies
# Мультиагентные системы и технологии

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ МКС И ПОДХОДЫ К ИХ РЕШЕНИЮ В ХОДЕ МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА: ОТ ИЕРАРХИЙ - К СЕТЕВЫМ ПРЕДСТАВЛЕНИЯМ

**М.М. Матюшин**

ОАО «РКК «Энергия»»
Московская обл., Королев, ул. Ленина, 4А, Россия
matushin@scsc.ru
тел:+7 (495) 513-74-97

***Ключевые слова:*** *космический аппарат, управление полетом, группы управления полетом, взаимодействие, онтологический базис управления полетом , распределенное управление, интерсубъективная теория*

**Abstract**
The article deals with the problem of interaction and understanding in the process of distributed flight control of the spacecraft. For this purpose, analyzes the process of the flight control of the International Space Station from the standpoint of the intersubjective theory.

## Введение

Управление полетом любого пилотируемого космического аппарата на некотором участке времени подразумевает реализацию некоторого множества полетных операций. На современном уровне развития космонавтики основанная тяжесть по принятию решений в процессе реализации полетных операций лежит на наземной оперативной группе управления полетом (ОГУ), которая располагается в центре управления полетом (ЦУП). ОГУ комплектуется из специалистов, отвечающих за различные аспекты функционирования космического аппарата, экипажа, наземной инфраструктуры. В процессе управления полетом ОГУ функционирует как единое целое, получая информацию с борта космического аппарата, выдавая на него управляющие воздействия, принимая решения, хотя каждый из специалистов работает в своей области.

В последние годы складывается тенденция построения оперативного управление полетом космического аппарата, в виде территориально распределенного управления. В этом случае оперативное управление отдельными сегментами и/или функциями космического аппарата ведется из территориально разнесенных центров управления, т.е. в процессе оперативного управления участвуют несколько ОГУ.

Наиболее полно особенности распределенного управления начинают проявляться с началом реализации крупных международных программ, таких, например, как Международная космическая станция (МКС). МКС представляет собой наиболее сложную орбитальную систему. В настоящее время, управление полетом МКС ведется из нескольких стран мира (России, США, Франции, Германии, Японии, Канады). В этом случае к большому объему и сложности решаемых задач добавляется необходимость интеграции различных инженерных традиций, особенностей культуры и философии управления полетом КА.

В случае распределенного управления полетом ОГУ различных центров управления полетом хотя и работают в тесном контакте, но не являются монолитным единым целым. У каждого ОГУ существует своя организационная структура, эксплуатационная документация, методики управления и контроля космического аппарата, планы полета и т.д. Таким образом,

корректнее рассматривать совокупность ОГУ не как единый субъект управления полетом, а как совокупность неоднородных акторов совместно выстраивающих процесс управления.

Ход процесса совместного управления полетом, в котором участвуют несколько акторов, во многом зависит от складывающейся полетной ситуации. Наиболее ярко процесс совместного управления полетом акторами проявляется на примере разрешения полетных ситуаций, которые затрагивают все сегменты космического аппарата или даже угрожают его безопасности.

## 1 Управление полетом космического аппарата с Земли в контексте рассматриваемой проблемы

Термин «управление полетом космического аппарата» достаточно широк и в зависимости от направления и задач исследования может нести различное смысловое наполнение. В рамках данной работы будем понимать под оперативным управлением полетом космического аппарата процесс последовательного изменения параметров его состояния в ходе реализации полетных операций, направленный на выполнение планов полета. При этом оперативность такого управления понимается как требование реализации последовательности операций в реальном и/или близком к реальному времени [3].

В ходе сеансов связи с бортом КА, длительность которых зависит от возможностей наземных средств и/или средств спутникового контура, используемых для управления полетом, группа управления полетом оценивает состояние КА. По результатам оценки состояния принимается решение о штатном или нештатном состоянии КА. И если состояние штатное происходит выдача управляющих воздействий на перевод КА в другое состояние в соответствии с планом полета. Если состояние нештатное - происходит процесс выработки рекомендаций и выработки таких 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.

Оперативное управление подразумевает реализацию обобщенной технологии управления полетом, которая состоит в последовательном выполнения следующих этапов: планирование, реализация плана, контроль и анализ результатов, принятие решения по результатам контроля.

Остановимся на этих этапах подробнее. 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.

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 даль-

нейшем 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 и т.д.

Степень корректировки плана полета может быть самой различной. В простейшем случае она сводится только к частичному изменению плана выдачи управляющих воздействий, без изменения состава и последовательности выполнения ранее запланированных полетных операций. При этом выдача управляющих воздействий по скорректированному таким образом плану должна обеспечить либо восстановление нормального запланированного состояния КА, либо перевод его в другое состояние, позволяющее продолжать полет по прежнему плану.

В более сложных случаях может потребоваться существенное изменение плана полета, от переделки отдельных его частей до формирования всего плана заново. При этом, если срыв ранее выполнявшегося плана вызван влиянием внутренних возмущающих воздействий, например, отказов бортовых систем КА, обязательно принимаются меры по их устранению: отключение, ремонт отказавших приборов, переход на резервные комплекты или по компенсации их действия.

В наиболее сложных ситуациях возможен даже отказ от достижения первоначально заданной цели полета, с разработкой соответствующего нового плана. Например, при аварии, делающей невозможным выполнение поставленных задач, единственной целью полета может стать возвращение экипажа на Землю с помощью средств спасения.

Нужно заметить, что при оперативном управлении полетом необходимо реагировать не только на те отклонения в состоянии КА или внешней полетной обстановки, которые уже представляют непосредственную угрозу выполнению задач полета и безопасности экипажа. Должна быть обеспечена также своевременная реакция и на отклонения, которые хотя и находятся в допустимых пределах, но свидетельствуют о тенденции к выходу из них через некоторый промежуток времени. Такая реакция может быть реализована не только как воздействие на бортовые системы КА, но и путем своевременного изменения самой системы управления полетом.

## 2 Онтологический базис управления полетом космического аппарата

Успешная реализация процесса оперативного управления полетом требует наличия у актора (акторов) некоторого множества знаний о космическом аппарате, о возможностях, ограничениях и ресурсах самого процессе управления, о средствах управления полетом и т.д. Необходимо отметить, что подобные знания не являются неизменной данностью, а имеют тенденцию к постоянному изменению, т.е. эволюции.

Так, например, состояние бортовых систем пилотируемого космического аппарат меняется во времени с одной стороны из-за деградации и старения, с другой стороны из-за ремонта и модернизации отдельных узлов и программного обеспечения. Изменению состояния ботовых систем соответствует и изменение методов их управления и т.д. Кроме того, наблюдаемость космического аппарат ограничена информационными возможностями системы управления полетом, поэтому, в процессе полета космического аппарат, знания могут изменяться не только из-за изменения его состояние, но эти знания и могут уточняться, например, путем набора и анализа определенной статистики.

Для того чтобы знаниями можно было успешно пользоваться, они должны быть определенным образом структурированы. К сожалению, не всегда возможно четко и однозначно описать структуру таких знаний. Предложим один из путей обобщенного описания онтологического базиса управления полетом КА. Под онтологическим базисом [1] будем понимать совокупность разнородных эволюционирующих баз знаний, "отслеживающих" динамику изменений, происходящих в системе управления полетом космического аппарата.

Для описания онтологического базиса управления полетом КА разделим базы знаний на несколько групп:

1) Базы знаний, характеризующих объект управления – космический аппарат. К данной группе относятся:
   1.1) Базы знаний состояния объекта управления, такие как базы знаний состояния бортовых систем и базы знаний состояний экипажа – эти базы знаний описывают доступный для анализа в текущий момент информационный образ фазового состояния космического аппарата с помощью заранее определенного вектора параметров;
   1.2) Базы знаний управляющих воздействий на объект управления, такие как базы знаний управляющих воздействий выдаваемых из ЦУПа на борт КА для непосредственного управления работой бортовых систем КА (в том числе и систем, входящих в бортовой контур автоматического управления (БКАУ), базы знаний управляющих воздействий, переменных, режимов, планов полета и т.д., передаваемых из ЦУПа в БКАУ для организации управления бортовыми системами КА со стороны БКАУ, базы знаний управляющих воздействий, выдаваемых из БКАУ на бортовые системы для их управления., базы знаний указаний для экипажа, которые может выдать ЦУП, базы знаний управляющих воздействий для управления бортовыми системами КА со стороны экипажа, – данная группа баз знаний описывает средства изменения идентифицированного информационного образа фазового состояния космического аппарата;
   1.3) Базы знаний внешних воздействий на объект управления, такие как базы знаний внешних наблюдаемые возмущающие воздействия на технические системы КА, базы знаний внешних наблюдаемые возмущающие воздействия на экипаж, базы знаний ненаблюдаемые возмущающие воздействия на технические системы КА, базы знаний ненаблюдаемые возмущающие воздействия на экипаж, – данная группа баз знаний описывает факторы, потенциально влияющие на идентифицированный информационный образа фазового состояния космического аппарата;
   1.4) Базы знаний состояния бортовых ресурсов, такие как базы знаний ресурсов боровых систем, базы знаний ресурсов экипажа, –данная группа описывает ресурсы для изменения идентифицированного информационного образа фазового состояния космического аппарата.
2) Базы знаний, характеризующих автоматизированную систему управления полетом – центр управления полетом и средства управления. К данной группе относятся:
   2.1) Базы знаний планов полета полетом – данная группа описывает развертку во в времени требуемого информационного образа фазового состояния космического аппарата;
   2.2) Базы знаний технологий (методик) управления полетом КА, такие как базы знаний технологий контроля полета КА, которые включают знания, отраженные в методиках контроля состояния бортовых систем и внешней среды, процедурах оценки результатов деятельности экипажа, рекомендациях по осуществлению контроля, базы знаний технологий управления полетом КА, которые включают знания, отраженные в методиках, процедурах, рекомендациях управления бортовыми системами, процедурах, радиограммах и рекомендациях для экипажа и т.д. – данная группа баз знаний описывает технологии деятельности системы управления полетом по изменению идентифицированного информационного образа фазового состояния космического аппарата;

2.3) Базы знаний состояния автоматизированной системы управления полетом –данная группа баз знаний описывает доступный для анализа в текущий момент информационный образ состояния автоматизированной системы управления полетом;
2.4) Базы знаний возмущающих воздействий на автоматизированную систему управления полетом – данная группа баз знаний описывает факторы, потенциально влияющие на функционирование автоматизированной системы управления полетом;
2.5) Базы знаний ресурсов автоматизированной системы управления полетом –данная группа баз знаний описывает ресурсы необходимые для организации работ по управлению полетом КА из ЦУП.

Необходимо отметить, что для разных акторов - ЦУПов, даже управляющих одним и тем же космическим аппаратом, как например для ЦУП-М и ЦУП-Х в случае МКС, структура и наполнение баз данных будет различным. Однако для успешного совместного выполнения полетных операций в процессе взаимодействующие акторы вырабатывают общую онтологию на базе собственных онтологических базисов и с использованием средств интерсубъективной теории. Остановимся подробнее на описании подобного распределенного управления.

## 3 Основные принципы управления полётом МКС

В процессе разработки проекта МКС международными партнёрами были достигнуты соглашения по основным принципам, которые послужили базой для создания технологии и организационной структуры совместного управления полётом этого космического комплекса.

МКС состоит из двух сегментов – российского (РС) и американского (АС). В РС МКС помимо российский кораблей и модулей, интегрируется европейский корабль ATV. АС МКС включает в себя, кроме американских, европейский («Колумбус») и японский («Кибо») модули, а также ряд элементов, разрабатываемых канадским агентством и организациями других стран. Обслуживание МКС осуществляется в настоящее время космическими кораблями, входящими со станцией в единый комплекс: «Союз» (российское федеральное космическое агентство – ФКА; доставка на станцию и возвращение с неё на землю экипажей и грузов), «Прогресс» (ФКА; доставка на станцию грузов и ракетного топлива), ATV (Европейское космическое агентство – ESA; доставка на станцию грузов и ракетного топлива), HTV (Японское космическое агентство – JAXA; доставка на станцию грузов). До июля 2011 года в число кораблей, обслуживающих МКС, входили и корабли космического агентства США (NASA) «Спейс шаттл», ныне снятые с эксплуатации.

В соответствии с принципами управления полетом МКС, каждый партнер, участвующий в программе МКС, управляет полетом «своего» сегмента станции и «своих» кораблей. Так, до 2008 года управление полетом МКС осуществлялось двумя Центрами управления: ЦУП–М, расположенным в городе Королев, Россия (управление российским сегментом МКС и кораблями «Союз» и Прогресс»), и ЦУП-Х, расположенным в Хьюстоне, штат Техас, США (управление американским сегментом МКС и кораблём «Спейс шаттл»). С появлением в составе станции модуля «Колумбус» и началом полетов грузового корабля ATV, к управлению подключились два европейских Центра управления полетом – ЦУП-Col (Оберпфаффенхофен, Германия) и ЦУП-ATV (Тулуза, Франция). После стыковки к МКС модуля «Кибо» к процессу управления подключился также и японский Центр управления полетом – ЦУП-JAXA (Цукуба, Япония).

Каждый партнер для управления своим сегментом станции и своими кораблями использует собственные наземные и бортовые средства. Так, например, бортовой контур управления состоит из двух взаимосвязанных частей: американской системы системой управления и передачи данных (C&DH) и российской бортовой вычислительной системой (БВС), объединенных с помощью согласованных интерфейсов. Российская и американская стороны используют каждая «свои» наземные и спутниковые контура управления.

Кроме того, каждая сторона самостоятельно выполняет все компоненты управления полетом, такие, как планирование и подготовка выполнения операций, их реализация, анализ состояния бортовых систем и хода выполнения операций, принятие решений.

В случае необходимости для каждой из сторон предусмотрена возможность управления полетом «своим» сегментов используя наземные и бортовые средства партнера. Подобная возможность используется и как средство резервирования в случае какой-либо нештатной ситуации, и как средство, расширяющее возможности управления полетом.

Необходимо отметить, что при разделении управления по сегментам, экипаж МКС является единым целым. Он состоит из граждан стран-участниц МКС и работает под руководством командира МКС, назначаемого заранее из российских или американских членов экипажа. Связь с экипажем может вестись из любого ЦУПа, но, в основном, с экипажем контактируют ЦУП-Х и ЦУП-М, используя при этом либо собственные средства связи, либо, по договоренности, средства связи партнера.

Для координации работ на МКС и экипаж и все центры управления полетом работают по единому, заранее разработанному и согласованному всеми плану полета. Этот план интегрирует предложения, требования и ограничения от каждого участвующего в управлении ЦУПа.

## 4 Взаимодействие групп управления при оперативном управлении полетом МКС

Участие в управлении полетом МКС нескольких ЦУПов приводит к необходимости взаимной координации действий, в том числе затрагивающих модули партнеров; составления интегрированных планов полета МКС; автоматизированного обмена телеметрией, командами и другой значимой с точки зрения управления полетом информацией.

Для взаимодействия ЦУПов создана специальная наземная информационная сеть, которая включает в себя линии связи (внешние интерфейсы) между российскими, европейскими, японскими и американскими наземными комплексами, а также ряд внутренних интерфейсных средств, работающих в рамках каждой наземной системы и служащих для передачи и приема различных данных.

Внутренние интерфейсы позволяют каждому из ЦУПов обрабатывать и контролировать содержание и формат данных, а также последовательность обмена данными. По внешним интерфейсам ЦУПы обмениваются следующими 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, группы управления в каждом из ЦУПов при выполнении операций управления МКС достаточно активно ведут информационный обмен. Однако при детальном рассмотрении процесса управления полетом МКС становится достаточно очевидно, что не все аспекты взаимодействия групп управления полетом можно свести только к обмену информацией.

Хотя МКС и разделена на сегменты и зоны ответственности, хотя при выполнении тех или иных полетных операций приоритет управления имеет тот или иной ЦУП, но станция всегда остается единым сложным техническим объектом. Различные системы и функции этого объекта связаны сложным образом, поэтому управление МКС возможно только согласованными управляющими воздействиями, что подразумевает под собой последовательность принятия согласованных всеми акторами решений. В данном случае под «акторами» будем понимать как некие коллективные субъекты в группах управления полетом различных ЦУПов, ответственные за обмен информацией и принятие решений, так и экипаж.

Многие вопросы управления полетом МКС достаточно полно регламентированы документацией (и внутренней для каждого ЦУПа и международной), но основой для принятия ка-

ждого решения является складывающаяся текущая ситуация, в которой ведется управление. Например, в качестве крайнего проявления этого обстоятельства можно привести правило, которое говорит о том, что руководитель полета под свою ответственность имеет право оперативно принимать решения, отличные от указанных в документации.

Вполне естественно, что каждый из акторов – и группы управления полетом в ЦУПах и экипаж – может по-разному оценивать складывающуюся ситуацию управления полетом МКС. У каждого из акторов есть свои интересы, планы, требования и ограничения. Однако необходимость принятия совместного решения обуславливается несколькими факторами.

1) Как правило, при выполнении ответственной полетной операции ни один из ЦУПов не в состоянии выполнить ее самостоятельно, используя только «свои» наземные и бортовые средства.
2) ЦУПы в своем функционировании достаточно автономны, то есть отсутствует ярко выраженная подчиненность и иерархия. ЦУП-Х играет роль интегратора, но эта интеграция больше сводится к созданию единого информационного поля, а не директивному управлению партнерами.
3) Экипаж работает как единое целое и ЦУПы проявляют достаточно много усилий, чтобы не разделить экипаж, противопоставляя его членов разной национальной принадлежности.
4) Определенные действия на МКС должны быть выполнены за определенный ограниченный интервал времени, т.е. уйти от точки принятия решений или постоянно сдвигать ее вдоль временной оси невозможно из-за объективных требований функционирования МКС.

Все эти факторы являются причиной того, что управление полетом МКС ведется в рамках сложившейся полетной ситуации на основе согласованных решений, разрабатываемых и принимаемых в процессе информационного взаимодействия акторов. Практически такие решения делают возможными постоянно протекающие процессы самоорганизации оперативного управления полетом МКС, в которых по мере необходимости участвует то или иное количество акторов. Такие процессы невозможны без «платформы знаний» общей для всех акторов. Для описания подобной «платформы» воспользуемся инструментарием интерсубъективной теории.

## 5 Использование интерсубъективной теории для описания управления полетом МКС

Практически каждый из международных партнеров, участвующих в управлении полетом МКС, к моменту начала эксплуатации МКС имел опыт управления полетами сложными объектами космической техники. Так, собственные пилотируемые программы были до МКС и у США и в России (СССР), Европа и Япония достаточно разрабатывали программы беспилотных космических аппаратов и т.д.

Это явилось причиной значительных различий в инженерных нормах, культуры и философии управления полетом, которым придерживаются каждый из международных партнеров в программе МКС. Поэтому, в процессе разработки и согласования совместного решения, принимаемого в ходе оперативного управления полетом МКС, выступает именно рационально обоснованная аргументация, а не привычки, мнения, традиции.

Однако, рациональная аргументация должна быть основана на единой для всех партеров «платформы знаний», которая безусловно существует и постоянно используется в процессе оперативного управления полетом МКС. Одним из возможных способов представления этой «платформы» является описание ее виде проявления тех или иных типов интерсубъективности [2]. Рассмотрим пять типов интерсубъективности (нормативную, семантическую, эмпирическую, логическую, операционную) в приложении к процессу оперативного управления полетом МКС.

«Нормативная интерсубъективность предполагает общепринятость норм и правил поведения или оценки.» Заранее до проведения операций, разрабатываются и согласовываются всеми участвующими в процессе оперативного управления полетом международными партнерами нормы и правила выполнения тех или иных полетных операций (действий на борту МКС). В этих правилах содержатся ограничения и возможные действия каждого из партеров, влияющие на реализацию операций. При необходимости приводится обоснование того или иного действия или ограничения, а также последствия их невыполнения. Благодаря согласованию правил все стороны могут быть уверены, что их ограничения известны и правильно понимаются партнером. Правила издаются в виде международного документа, который так и называется «Правила полета» ("Flight rules").

«Семантическая интерсубъективность предполагает ясность и общее согласие относительно понятий и построенных из них суждений.» Проблема одинакового понимания терминологии всеми участниками процесса управления полетом МКС с самого начала программы МКС усугублялась использованием разных языков ЦУП-М и ЦУП-Х – соответственно русского и английского. Для того, что бы избежать непонимания был сформирован специализированный словарь - "ISS Russian-English/English-Russian technical Lexicon", в котором согласовывалась русская и английская терминологии. Общение между специалистами ЦУП-М и ЦУП-Х в голосовых каналах связи было организовано с помощью специально подготовленных и сертифицированных переводчиков. Изначально при управлении полетом МКС предполагалось перейти полностью на английский язык в голосовых каналах в 2003 году, однако, до сих пор управление ведется с использованием и русского и английского языков. Одними из определяющих факторов для такого состояния дел являются с одной стороны предпочтительность использования специалистами управления полетом «своего» языка в сложных полетных ситуациях, с другой необходимость наличия сертифицированных переводчиков для обеспечения единообразия используемой терминологии.

«Эмпирическая интерсубъективность подразумевает, что высказывания, опирающиеся на эмпирические факты, принимаются за рационально обоснованные.» Помимо собственно средств управления полетом своего сегмента (оборудования) МКС, как правило, каждый из международных партнеров имеет собственные средства моделирования. Подобные средства моделирования включают в себя как физические модели агрегатов, приборов, оборудования, бортовых систем и даже целых модулей, так и математические модели процессов функционирования МКС и полетной обстановки. Большая часть этих моделей формально или неформально верифицирована соответствующими специалистами партнеров в ходе совместных работ. Поэтому результаты моделирования, как эмпирическое подтверждение выводов о возможной полетной ситуации, вполне принимаются группами управления других ЦУПов. При этом всегда подразумевается, что подобные результаты партнер всегда имеет возможность проверить на «своих» средствах моделирования.

«Операциональная интерсубъективность исходит из воспроизводимости образцов действия или рассуждения.» Хотя, как указывалось выше, до начала программы МКС международные партнеры имели разные подходы к организации отдельных частей управления полетом пилотируемых космических станций, однако, общая последовательность и логика в подготовке и проведении операций по управлению полетом космического аппарата была и остается единой для всех, сам процесс диктует определенные последовательности действий, которые необходимо выполнить в тех или иных случаях. Управление бортовыми системами МКС как техническими системами подразумевает реализацию определенной последовательности действий независимо от того кто эти действия выполняет. Все участники процесса выработки совместного решения примерно представляют объем и последовательность действий необходимых для выполнения партнеру той или иной операции.

«Логическая интерсубъективность считает рационально обоснованными такие высказывания, которые являются результатом логического вывода.» Специалисты в ЦУПах партнеров,

вовлеченные в процесс выработки и принятия решения, имеют высшее инженерное образование, похожую специализированную подготовку, а также опыт ежедневного оперативного управления полетом МКС, что обуславливает производство схожих выводов из схожих предпосылок независимо от принадлежности группе управления того или ирного ЦУПа.

## 6 Особенности оперативного управления полетом МКС как процесса постоянной самоорганизации

Хотя группы управления ЦУПов международных партнеров оказываются достаточно сильно взаимосвязанных в процессе управления полетом МКС, необходимо еще раз подчеркнуть, что они ни в коем случае не превращаются от этого в единое целое.

Каждый из ЦУПов имеет свою собственную позицию в процессе оперативного управления полетом, собственные оценки полетной ситуации, собственные задачи и собственные ресурсы для решения этих задач. Кроме того, средства, которыми пользуются группы управления полетом в различных ЦУПах – различны. Достаточно сложно сравнивать, например, ЦУП-М, ЦУП-Х и ЦУП-ATV, поскольку они представляют собой различные организационно-технические системы. Даже выделение самих оперативных групп управления полетом в разных ЦУПам приходится делать исходя из разных допущений.

Необходимо также отметить то, что принцип единоначалия и директивного управления не нашел выражения в организации управления полетом МКС. Как уже указывалось, есть ЦУП-Х, который играет роль интегратора деятельности по управлению полетом МКС. Однако в данном случае термин «интеграция» используется строго по прямому назначению и отражает идею «сплочения, объединения (от лат. *integrum – целое*; лат. *integratio* – восстановление, восполнение)», а не навязывание своей воли остальным партнерам.

Также широко используется понятие – «ведущий ЦУП», т.е. ЦУП, который в зависимости от проводимых операций отвечает за безопасность станции в целом. Так в процессе стыковок транспортных кораблей (в прошлом корабля «Спейс шаттл», в настоящем японского корабля HTV) к американскому сегменту МКС ведущим является ЦУП-Х. При стыковки транспортных кораблей (российских «Союзов» и «Прогрессов», европейского - ATV) к российскому сегменту МКС ведущим является ЦУП-М. Однако, даже находясь в роли ведущего, ЦУП не имеет право единолично распоряжаться всеми возможностями и ресурсами станции.

Все это позволяет рассматривать процесс оперативного управления полетом МКС как процесс постоянной реорганизации, направленный на достижение устойчивых состояний в условиях требований достижения поставленных целей и влияния возмущающих факторов. Основную роль в этом процессе играют согласованные действия неоднородных акторов, участвующих в оперативном управлении. Неоднородность проявляется как в трудности сравнения ЦУПов – акторов между собой, так и в разном «грузе» ответственности, которые несут отдельные ЦУПы. Так, например, европейский ЦУП-ATV отвечает за один корабль ATV, российский ЦУП-М за 9 кораблей и модулей в составе МКС. Сам состав акторов, участвующих в процессе оперативного управления, может динамическим образом изменятся в зависимости от условий реализуемых операций и складывающейся полетной ситуации, так как возникновение новых обстоятельств может потребовать большего участия тех или иных акторов.

Согласованные действия вырабатываются на основе решений, принятых и одобренных всеми активно вовлеченными на текущий момент в процесс управления полетом сторонами. Как правило, при выработке таких решений используются достаточно полно возможности «платформы знаний», задействуя в той или иной мере практически все типы интерсубъективности.

В полнее естественно, что управление полетом МКС основано на реализации предварительно согласованных всеми сторонами и утвержденных планов полета различного уровня. Однако, по мере сужения горизонта планирования и увеличения детализации, планы полета

все больше превращаются из списка целей в целостный образ требуемой полетной ситуации. И фактически оперативное управление представляет собой воплощение этого образа в жизненные реалии. Возмущающие факторы, действующие на МКС и наземные средства, также оказывают влияние на полетную ситуацию в целом. Хотя теоретически вполне возможно выделить определенную точку влияния этих факторов, однако, практически, из-за их воздействий, меняется в целом образ текущей полетной ситуации.

Все это просто вынуждает акторов, участвующих в процессе управления, в реальном масштабе времени реагировать на изменение образа полетной ситуации, а это в свою очередь означает, что согласованные решения также должны вырабатываться в темпе развития ситуации. Поэтому практически невозможно заранее жестко расписать все роли и обязанности акторов, а приходиться постоянно выстраивать взаимодействие на базе имеющейся «платформы знаний».

**Заключение**

В заключении необходимо отметить, что, наверное, невозможно однозначно положительно оценить саму необходимость управления полетом сложным объектом космической техники несколькими неоднородными акторами. По сравнению с управлением из одного центра возрастают затраты на коммуникацию с партнерами, появляется необходимость учета целей и задач, решаемых партнером, использование собственных ресурсов в интересах партнеров, само установление удовлетворительной коммуникации является достаточно непростым процессом.

Однако в условиях резкого увеличения информационных потоков между Землей и бортом пилотируемого космического аппарата и увеличением сложности самого космического аппарата, управление из единого центра становится крайне затруднительным. Так даже в рамках даже одного ЦУПа приходится создавать группы управления полетом отдельными кораблями и модулями. Например, приемлемые показатели оперативности принятия решений при управлении полетом достигаются в этих условиях только при условии относительной автономности и персональной ответственности групп управления отдельными сегментами (модулями) сложного объекта космической техники. Наличие нескольких альтернативных средств управления бортовыми системами существенно повышает надежность управления полетом.

Кроме того, пример МКС наглядно показывает возможность мобилизации ресурсов практически всех развитых стран Земного шара для решения задач прикладной пилотируемой космонавтики, поскольку даже самой богатой стране США в одиночку реализовать такой проект было бы слишком дорого.

Все это позволяет сделать следующий вывод. Несмотря на все отрицательные стороны, по-видимому, в условиях развития пилотируемой космонавтики управление полетом космических комплексов будет строиться на принципах совместного (согласованного) управления несколькими неоднородными акторами.

При этом можно выделить две достаточно трудные для решения задачи:

1) образование единого коммуникативного пространства, поддерживающего взаимодействие большого количества разнородных акторов - элементов системы управления полетом;
2) обеспечение эффективной координации разных групп управления полетом внутри этого пространства.

Использование интерсубъективной теории и принципов построения самоорганизующихся систем для описания (моделирования) подобной распределенной системы управления полетом видится достаточно обоснованным и перспективным средством для помощи в решении этих задач.

## Список литературы


[1] Виттих В.А. Организация сложных систем. Самара, Самарский научный центр РАН, 2010.

[2] Виттих В.А. Управление ситуациями в сложных развивающихся системах с применением интер-субъективных теорий. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. №12.

[3] Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полётами. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009.

# ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПАРИРОВАНИЯ НЕШТАТНЫХ И АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА МКС

**М.М. Матюшин[1], Н.Н. Черленяк[1], О.В. Волков[1]. П.О. Скобелев[2], И.А. Сюсин[2], В.П. Карбовничий[2], А.В. Соллогуб[3], А.В. Царев[2], Е.В. Симонова[2]**

[1]ОАО «РКК «Энергия»»
Московская обл., Королев, ул. Ленина, 4А, Россия
тел: +7-985-960-05-20

[2]ООО «НПК «Разумные решения»»
443080, Самара, ул. Санфировой, 95, литера 4, офис 416, Россия
info@smartsolutions-123.ru
тел: +7 (846) 222-01-72, 222-91-73

[3] ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ - Прогресс»
443009, Самара, ул. Земеца, 18, Россия
csdb@samtel.ru
тел: +7 (946) 992-66-36

***Ключевые слова:*** *космический аппарат, ресурсы, надежность, живучесть, нештатная и аварийная ситуация, прогнозирование, мультиагентные технологии, ПВ-сеть, реальное время*

**Abstract**
This paper describes the problems and methods of providing emergency diagnostics on International Space Station's (ISS) which require fast reaction on events on early stages of problems recognition. Intelligent system for decision making support is proposed which designed with the use of on-board systems ontology management tools and multi-agent technology.

## Введение

С первого полета аппарата, созданного человеком, в открытый космос, появилась мечта запустить корабль с экипажем на борту. Однако выяснилось, что это не такая простая задача – космическое пространство оказалось весьма враждебной средой по отношению как к живым организмам, так и к технике. Одним из основных факторов негативного воздействия является космический вакуум – совокупность физических явлений (таких как сильная разреженность, низкая температура окружающей среды и др.), влияющих как на живые существа, так и на аппаратную часть [1]. Кроме того, существует множество других разрушающих воздействий, специфичных для космической среды [2]. Методом проб и ошибок, ценой неудач и аварий (порой с человеческими жертвами и потерями дорогостоящих космических аппаратов) были определены основные принципы проектирования, разработки и проверки техники, готовящейся к отправке в космос, а также к обеспечению жизнедеятельности экипажа:

- Для пилотируемых аппаратов основной и безусловной задачей в любых ситуациях является спасение жизни экипажа.
- Приборы, аппаратура и другие технические устройства, отправляемые в космос, должны быть максимально надежными даже во вредной и разрушительной среде.
- Важные технические элементы должны иметь двукратное и трёхкратное дублирование.
- Для человека необходимо обеспечить условия жизнедеятельности, по возможности, приближенные к земным.

Эти принципы были заложены в концепцию построения Международной космической станции (МКС), которая более десяти лет беспрерывно функционирует в штатном режиме и

по степени надежности, применению передовых технологий, сложности ни в чем не уступает (а во многом и превосходит) такие сложнейшие конструкции, как атомные подводные лодки и новейшие самолеты. Однако чем сложнее и современнее техника, тем больше времени, ресурсов и усилий требуется для поддержания ее в рабочем состоянии. За спиной любого космонавта, стартовавшего с Земли на МКС, стоят тысячи специалистов в самых разнообразных областях, которые готовятся к полету в течение нескольких лет не менее интенсивно, чем сам экипаж, во время полета в режиме реального времени следят за всеми параметрами техники, состоянием экипажа и в любой момент готовы использовать все имеющиеся средства для оказания поддержки и помощи при наступлении нештатной (НШ) или аварийной ситуации (АС). Особенно это характерно для специалистов Центра управления полетами (ЦУП), которые круглосуточно управляют полетом МКС и кораблей, направляющихся к ней, ведут переговоры с экипажем.

Специалисты ЦУП подготовлены к работе в процессе парирования рассмотренных нештатных и аварийных ситуаций и готовы действовать решительно при появлении малейших признаков угрозы здоровью или жизни космонавтов.

**Постановка задачи**

Самым опасным типом нештатной ситуации на МКС является аварийная ситуация, поскольку она угрожает жизни членов экипажа. В настоящее время накоплен ряд разработанных и прошедших апробацию методических указаний, пособий и инструкций, регламентирующих действия экипажа и специалистов ЦУП в условиях возникновения АС, таких как разгерметизация МКС, пожар, выброс токсичных веществ в атмосферу станции.

Однако в руководствах и инструкциях физически невозможно отобразить всю многогранность складывающейся полетной ситуации, поэтому экипаж и ЦУП нуждаются в средствах, учитывающих текущее изменение ситуации и работающих в дополнение к эксплуатационно-технической документации.

На практике, как правило, возникновению НШ и АС всегда предшествует множество первых признаков или симптомов грядущей проблемы (НШ и АС). Своевременное выявление этих признаков может существенно повысить эффективность работы экипажа и ЦУП по парированию такой ситуации.

Кроме того, изготовитель каждой подсистемы, блока, прибора или узла на станции обязан проработать различные нештатные ситуации, которые могут возникнуть на станции в связи с применением его устройства. Однако сохранить в памяти или в инструкциях такое множество знаний далеко не всегда представляется возможным, особенно при различных комбинациях использования этих устройств. В результате, при почти 100% надежности каждого узла в отдельности, вся система станции, как собранного вместе искусственного объекта в целом, может быть очень ненадежной в связи с непредвиденными проблемами взаимных влияний, согласования сигналов, разнообразных режимов работы и т.п. [2]

Наконец, даже при высокой надежности всех компонент станции она может в некоторых ситуациях иметь невысокую живучесть, не позволяя быстро выполнить замену, и в итоге зависеть от одного узла, при выходе из строя которого экипаж и станция могут пострадать, если не предусмотрены возможности удобного, быстрого и гибкого перераспределения нагрузки и замены ресурсов узлов и агрегатов в критических ситуациях. И, наоборот, даже при низкой надежности всех элементов и звеньев, если обеспечивается высокая живучесть станции в целом, то в любой конфигурации и при любом стечении обстоятельств возможно успешно выходить из возникающих проблемных ситуаций.

Таким образом, эффективный подход к разрешению НШ и АС должен состоять в том, чтобы не доводить дело до факта наступления указанных ситуаций, а как можно раньше прогнозировать и выявлять самые первые их признаки и своевременно реагировать, в корне пре-

дупреждая саму возможность появления и развития ситуации адекватными мерами воздействия, с использованием доступных ресурсов и других средств.

Такой подход требует сбора, формализации, интеграции и использования разнородных полипредметных знаний специалистов о подсистемах станции для построения моделей ее устройства и функционирования, а также специальных подходов и методов раннего прогнозирования и выявления НШ и АС и динамического планирования мероприятий по их профилактике, предупреждению и устранению.

**Предлагаемый подход к решению проблемы**

Решение поставленной задачи предлагается осуществлять на основе мультиагентной технологии и технологии представления и обработки знаний [3-4].

Для начала представим себе, что каждой подсистеме или узлу станции в соответствие поставлен программный агент, который действует от его имени и по его поручению. Такой агент представляет собой автономную программу, которая может реагировать на события, принимать решения и взаимодействовать с другими агентами или пользователями, не требуя внешних инструкций, а реализуя внутренний встроенный цикл управления.

Следуя работе [5] введем два основных класса агентов: агентов потребностей (заказов) и агентов возможностей (ресурсов), которые находятся в постоянном поиске друг друга. Цель агента потребности - найти для себя наилучшую по заданным параметрам возможность для реализации, а цель агента возможности – максимальная эффективность использования своего ресурса. Агенты возможностей и агенты потребностей представляют собой находящиеся в постоянном взаимодействии сущности, как «инь» и «янь» мира станции, которые в зависимости от ситуации могут переходить от конкуренции, когда на одну потребность претендуют две возможности (и наоборот, две потребности борются за одну возможность), к кооперации, когда для удовлетворения одной большой потребности может быть необходимо несколько возможностей (и наоборот). В случае, если некоторой потребности наилучшим образом в текущий момент времени подходит определенная возможность, а этой возможности – данная потребность, эти агенты заключают договор и устанавливают связь «нуждается-в» между собой. Образующуюся сеть потребностей и возможностей, отражающую установившиеся в ходе переговоров связи между указанными агентами, для краткости будем называть сетью потребностей и возможностей (ПВ-сетью), хотя в ней могут быть агенты, еще не нашедшие себе второй «половинки», как свободные радикалы в химии, еще не имеющие связей, что соответствует для них состоянию начального хаоса.

Например, устройству для биологического эксперимента может быть сопоставлен агент потребности (заказа) на электроэнергию, которая может предоставляться определенным ресурсом – например, основным источником электроэнергии на станции. Если биологическому эксперименту лучше всего подходит именно основной источник питания (например, по удобству подключения или другим параметрам), а этому источнику, встречно, наилучшим образом подходят сроки эксперимента (с учетом скорости его разрядки и деградации), эти два агента могут «договориться» о сотрудничестве и заключить «договор» о взаимодействии, запланировав использование источника на определенный период времени, при этом в мире станции возникнет связь между ними, которая может быть доступной для обозрения, анализа и принятия решений для всех других агентов мира станции.

Пусть исходный теоретический график деградации мощности P рассматриваемого основного источника в зависимости от срока его эксплуатации T представлен на рисунке 1.

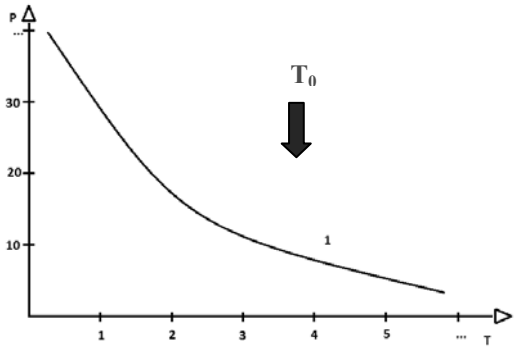



Рисунок 1 – Теоретический график деградации (разрядки) рассматриваемого источника (момент времени $T_0$)

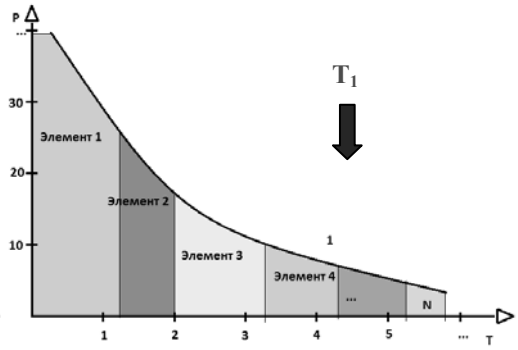



Рисунок 2 – Сложившееся распределение мощности источника между потребителями – в зависимости от плана нагрузки график может изменяться (момент времени $T_1$)

Предположим, что в ходе переговоров, на начальном этапе или в ходе некоторой предыстории, ресурс источника оказался распределен плановым образом по времени между N элементами системы станции в соответствии с их текущими потребностями (рисунок 2).

Однако в зависимости от различных внешних и внутренних факторов эксплуатации источника график фактического потребления ресурса отклоняется от планового (рисунок 3).

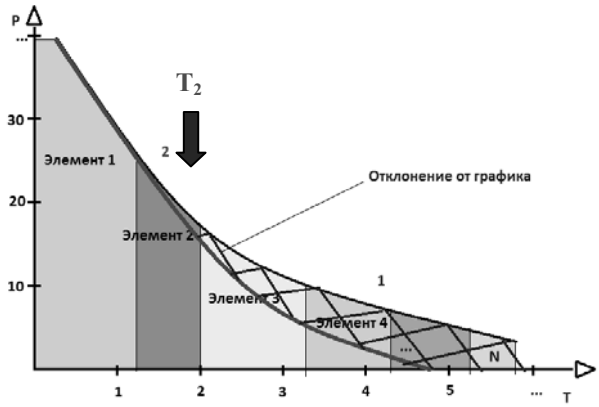



Рисунок 3 – Расхождение между «планом» и «фактом»: возникает угроза потери источника для части потребителей, начиная с 3 и 4 элементов (в момент $T_2$)

В результате отклонения от плана, некоторые элементы (например, 3 и 4) не смогут получить необходимое количество ресурса, что может привести к сбою в работе этих элементов и катастрофическому каскаду нарастающих отказов для всей системы.

Основные задачи агентов в данном случае:

- как можно ранее сигнализировать об отклонении потребления ресурса от планируемых значений;
- спрогнозировать дальнейший уровень деградации ресурса, отличающийся от планируемого уровня;
- выяснить, насколько критичным является отклонение для потребителя;

- если событие критичное, то перераспределить потребление ресурса между элементами системы в соответствии с их приоритетами для обеспечения работоспособности системы в целом;
- по возможности обнаружить и устранить причину отклонения, действуя при этом по такому же принципу, что и при перераспределении ресурса.

Ниже представлен пример концептуальной модели станции в виде ПВ-сети, определяющей возможные взаимодействия агентов системы.

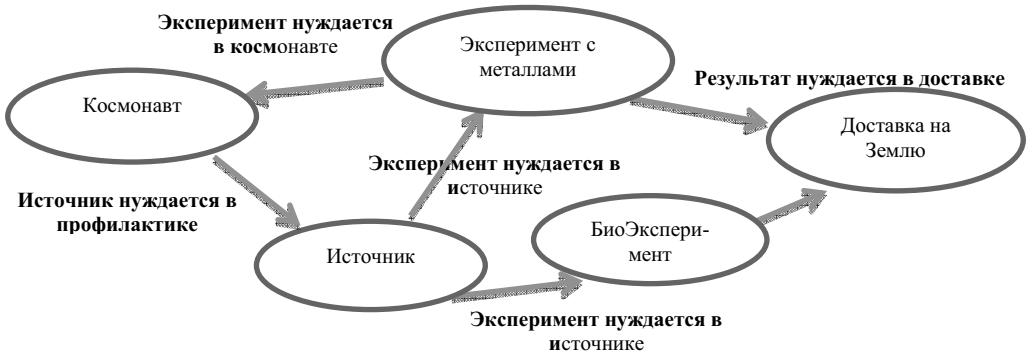



Рисунок 4 – Фрагмент концептуальной модели станции в форме ПВ-сети

Из анализа этой ПВ-сети агенту заказа энергии для био-эксперимента становится ясно, что другого источника нет и он может лишь сократить сроки эксперимента. Аналогичным образом могут поступить и другие потребители: эксперимент с металлами и т.д.

Если всем агентам удается сократить свои сроки с соответствующим сокращением потребления энергии, то график перераспределения нагрузки на данный ресурс может иметь следующий вид (рисунок 5).

Заметим, что если по каким-то причинам с источником питания вновь случается важное событие, например, вновь изменился прогноз деградации, то согласованные сроки могут быть заново пересмотрены (кривая 3 на рисунке 6).

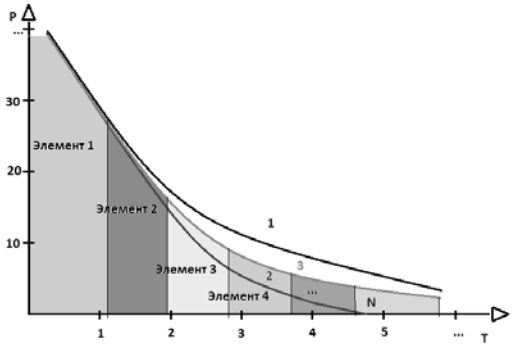



Рисунок 5 – График перераспределения нагрузки между потребителями энергии

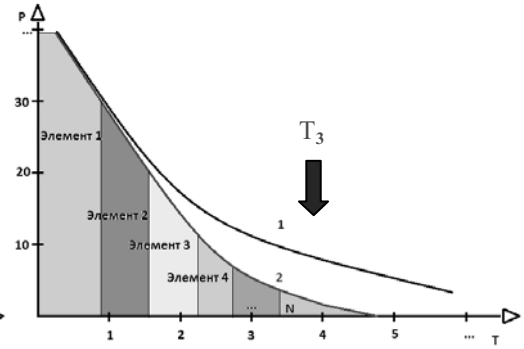



Рисунок 6 – Новое событие – изменение прогноза деградации источника энергии

Агент возможности при этом должен решать, готов ли он распределить свой ресурс равномерно между всеми потребителями на основе приоритетов либо других стратегий или параметров. Очевидно, что его решение вызовет «волну» пересмотров решений у других аген-

тов, причем длина этой волны будет заранее неизвестна, но позволит смоделировать и увидеть всю цепочку последствий принятого решения, что особенно важно для лиц, принимающих решения.

Отметим, что на рисунке 4 показана ограниченная концептуальная модель станции, использующая лишь один тип отношений «нуждается в», характерных для ПВ-сетей, хотя подклассов таких отношений может быть выделено много (нуждается постоянно или периодически, как часто, с каким расходом и т.д.). В дальнейшем спектр концептов и отношений такой семантической сети может быть существенно расширен структурными и функциональными, логическими и временными отношениями, которые могут строиться на основе онтологий предметных областей, причем могут предусматриваться вызовы модулей моделирования работы отдельных узлов, численных расчетов и т.п.

Агент возможности (ресурса) по своему характеру (роли) должен постоянно заботиться о своем ресурсе, который может быть разовым или возобновляемым. Так, если это агент основного источника, то он должен знать график своей теоретической деградации и реальный факт своей разрядки, для чего может периодически обращаться к данным телеметрии, если имеется соответствующий датчик, или даже выходить на связь и просить космонавта проводить регулярный профилактический осмотр и измерения параметров разрядки источника с вводом этой информации в систему, фактически, в базу знаний данного агента. В случае, если данный агент обнаружит существенное расхождение между планом и фактом в своей работе, данный агент должен идентифицировать тревожную ситуацию, сообщить об этом космонавтам и в ЦУП и попытаться выяснить, как данный факт повлияет на работу станции как можно раньше.

В рассматриваемом примере данный агент должен будет немедленно связаться с агентом биологического эксперимента, с которым у него установлена связь и которому по «договору» была обещана электроэнергия на ближайшее время, и выяснить, насколько критична для него новая ситуация. По соответствующему сообщению агент биологического эксперимента будет «разбужен» и проинформирован о случившемся. Теперь он должен проанализировать свою ситуацию, возможно, эксперимент уже успешно заканчивается раньше срока и тогда нет никакой проблемной ситуации, или наоборот затянулся, и ситуация становится для него критической. Во втором случае эксперименту, возможно, придется разорвать связь с первым элементом, начиная с определенного момента времени, и начать искать и бронировать себе другой источник энергии, а если такой возможности нет – предложить отложить или полностью отменить эксперимент, и соответственно, отложить завоз биологических объектов на ближайшем корабле.

Из этого примера видно, что если агент возможности по своему характеру более «материальный», заботящийся о текущем состоянии и продлении срока работы своего ресурса, то агент потребности более «идеалистический», который знает точно, что ему требуется и в какие сроки, т.е. живет больше будущим и постоянно планирует и перепланирует свою работу для реализации заданной цели, например, проведения рассматриваемого эксперимента.

Логика взаимодействия потребностей и возможностей во многом зависит от того, является ли заказ разовым или периодическим, разделяемым или неделимым, а также является ли ресурс разовым, пополняемым или воспроизводимым, разделяемым между несколькими потребностями или неделимым и т.д.

Таким образом, предлагаемая система представляет собой сообщество программных агентов, каждый из которых реализует полный цикл управления своим объектом (подсистемой, узлом, прибором и т.д.):

1) настраивается на заданную цель (задачу);
2) выбирает сценарии для достижения цели или выполнения задачи;
3) реагирует на события (изменения) в ситуации (сцене);
4) планирует и перепланирует свою деятельность, устанавливая и изменяя связи с другими агентами в случае возникновения непредвиденных событий;

5) взаимодействует с другими агентами или пользователями - информирует о своем состоянии, предлагает решения, согласовывает свои действия, устанавливает или разрывает связи, дает встречные предложения, спрашивает и отвечает на запросы других агентов и пользователей;
6) прогнозирует свое поведение на горизонт планирования;
7) ведет мониторинг и контроль исполнения намеченного плана;
8) выявляет расхождение между планом и фактом и инициирует перепланирование для его устранения;
9) обучается (в будущем) из опыта.

Данный полный цикл управления оказывается присущим любому автономному организму, начиная от простейшей клетки, что и позволяет рассматривать данную систему как интеллектуальную. В результате, и вся система в целом реализует указанный цикл управления по всей станции как композицию множества идущих квазипараллельно и асинхронно циклов работы отдельных агентов.

Чем более удовлетворены агенты своими связями – тем сильнее связи – тем в большем равновесии находится все система. Но при возникновении непредвиденных событий часть связей обрывается, и элементы начинают немедленно искать возможности – существующие связи начинают пересматриваться. Система постепенно проходит состояние хаоса и переходит в новое равновесие, соответствующее новому распределению потребностей и возможностей, или новым планам использования ресурсов станции.

Таким образом, первой задачей системы является выявление возможной грядущей проблемы из потока разнородных данных: телеметрической, параметров, замечаний космонавтов, наблюдений операторов ЦУП, отвечающих за работу подсистем станции, и других участников процесса эксплуатации станции.

В рассматриваемой системе эту задачу предлагается решать на основе создания специализированных компьютерных средств представления и интеграции знаний: предметных онтологий и концептуальной модели станции на основе ПВ-сетей, которая описывает основные ресурсы и помогает прослеживать связи основных подсистем станции на уровне потребностей и возможностей отдельных узлов, показывающих взаимные зависимости между ними.

Второй задачей системы является динамическое планирование своевременных профилактических мероприятий для выявления состояния ресурсов станции и перепланирование имеющихся ресурсов в случае появления первых признаков и возникновения угрозы появления НШ и АС.

Эту задачу предлагается решать на основе создания мультиагентной системы, где каждый агент отвечает за определенную подсистему, блок или узел станции.

**Ожидаемые результаты**

- Решение сложной задачи прогнозирования и предупреждения НШ и АС на ранних стадиях в условиях неопределенности;
- Обеспечение оперативной и гибкой реакции на непредвиденные события и изменения в ситуации на станции;
- Повышение надежности и живучести в обеспечении жизнедеятельности МКС;
- Заблаговременное прогнозирование, обнаружение и выработка возможных решений по предотвращению возникновения НШ и АС;
- Снижение сложности и трудоемкости работы персонала ЦУП и космонавтов;
- Повышение эффективности использования бортовых средств в процессе парирования НШ и АС;
- Возможность моделирования и предсказания различных вариантов возникновения, протекания и развития НШ и АС;

- Возможность обучать специалистов ЦУП действиям по прогнозированию, предупреждению и парированию НШ и АС.

**Заключение**

Создание непилотируемого, а тем более, пилотируемого аппарата, способного выполнять поставленные задачи и обеспечивать нормальную жизнедеятельность экипажа (например, на МКС) – сложная и комплексная задача. Для ее решения необходимо предъявлять высокие требования не только к надежности отдельных узлов, агрегатов и модулей, но и к живучести всей системы в целом. Для обеспечения одного из аспектов живучести предлагается разработать автоматизированную систему на основе мультиагентных технологий. Цель создания рассматриваемой системы – как можно более раннее выявление и предупреждение угроз возникновения и развития нештатных и аварийных ситуаций (НШ и АС) на борту МКС и использование (перераспределение) имеющихся ресурсов станции для парирования указанных ситуаций, обеспечения выживания экипажа и сохранения работоспособности самой станции, а также скорейшего возврата МКС и экипажа к нормальной штатной работе.

**Список литературы**


[1] Нусинов М. Д. Космический вакуум / и надежность космической техники. – М.: Знание, 1986. – 64 с, ил. – (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 6).

[2] Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В. Проблемы обеспечения сбое - и отказоустойчивости бортовой аппаратуры КА дистанционного зондирования Земли от воздействия излучений космического пространства. – «Мехатроника, автоматизация, управление». №11, 2009.

[3] Bonabeau E., Theraulaz G. Swarm Smarts. What computers are learning from them? // Scientific American. – 2000. – Vol. 282, N 3. – P. 54–61.

[4] Wooldridge M. An Introduction to Multi-Agent Systems. – JohnWiley&Sons, 2002. – 340 p.

[5] П.О. Скобелев. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской школы мультиагентных систем. – «Мехатроника, Автоматизация, Управление», №12, 2010. – с. 33-46.

# РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ И ОКР РКК «ЭНЕРГИЯ»

**А.Л. Феоктистов[1], Е.М. Клейменова[1], П.О. Скобелев[2], И.А. Сюсин[2], В.А. Ларюхин[2], А.В. Царев[2], Е.В. Симонова[2]**

[1]ОАО «РКК «Энергия»»
Московская обл., Королев, ул. Ленина, 4А, Россия
тел:+7 (495) 513-86-20

[2]ООО «НПК «Разумные решения»»
443080, Самара, ул. Санфировой, 95, литера 4, офис 416, Россия
info@smartsolutions-123.ru
тел: +7 (846) 222-01-72, 222-91-73

***Ключевые слова:*** *Задачи управления, НИР и ОКР, человеческие ресурсы, сетецентрический подход, холоническая система, онтологии, мультиагентные технологии, сети потребностей и возможностей (ПВ-сеть), реальное время*

**Abstract**
The paper describes the problems of computer-based designing and implementation of innovative aerospace systems. Distributed network-centric and holonic-based multi-agent solution for real time resource management for coordinated scheduling of research & design activities of corporate departments is proposed. Key principles of designing such solution for supporting creative team work are developed and discussed. Solution will be integrated with traditional ERP system Windchill to support full life cycle of aerospace systems.

## Введение

Управление деятельностью любой крупной современной корпорации, а в особенности, управление проектами научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИР и ОКР), является одной из сложнейших задач, решение которой на начальном этапе требует построения как можно более реалистичных планов, а в дальнейшем – постоянной доработки и координации планов подразделений на всех уровнях в реальном времени.

Однако, современные методы и средства распределения, планирования и оптимизации ресурсов преимущественно работают в пакетном режиме, когда число заказов и ресурсов предприятия или организации заранее известно и не меняется в ходе решения [1]. В условиях же априорной неопределенности спроса и предложения и высокой динамики их изменений в современной бизнес-среде, эти методы и средства работают плохо или не работают вовсе, в особенности, в реальном времени [2], когда одновременно с планированием по вновь поступающим событиям осуществляется мониторинг, контроль и учет выполнения задач, план постоянно «подправляется» фактом и приводит к перепланированию, что позволяет говорить о постоянно изменяющемся «скользящем» расписании корпорации, подразделений, групп и, наконец, отдельных сотрудников.

В настоящей статье предлагается создание интеллектуальной распределенной системы для управления крупными предприятиями на основе применения мультиагентных технологий, позволяющих согласованно, гибко и эффективно планировать сложные работы на всех уровнях, от уровня руководства – до уровня рядовых сотрудников.

**Современные системы автоматизации управления в корпорации**

Для решения задачи автоматизации управления деятельностью в ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева (далее – Корпорация) внедрена комплексная система Windchill, которая является основной и единой информационной средой для работы над всеми проектами и задачами.

Система позволяет управлять жизненным циклом изделия (PLM), а также его построением (PDM), и решает ряд других актуальных задач. Для конструктора система Windchill предоставляет возможность управлять проектом от идеи до воплощения, позволяя строить 3D модели сложных изделий с использованием САПР Pro/Engineer и вовлекая в процесс разработки множество специалистов различных профилей. Построенная в корпорации единая информационная среда из связки различных информационных систем: Windchill – Pro/Engineer, Microsoft Project, Oracle e-Business Suite, Oracle e-Business Intelligence, EMC Documentum и других, уже сегодня во многом позволяет решать задачи корпорации в части проектирования и реализации новых изделий.

С точки зрения управления работами в модуле Windchill ProjectLink имеются следующие возможности:

- Формирование и разработка плана решения задач для определенного проекта.
- Назначение исполнителей на выполнение планируемых работ.
- Исполнение работ проекта с привязкой результатов работ (электронных документов) к планам работ.
- Контроль выполнения работ и реагирование на возникающие трудности.
- Учет выполнения операционной деятельности сотрудников, не связанной с основным проектом.
- Формирование отчетности по выполнению плана-работ проекта.
- Управление рисками проектов.
- Управление ресурсами в самом общем виде.
- Основные проблемы системы Windchill PrijectLink с точки зрения *планирования:*
- Иногда проекты рассматриваются отдельно друг от друга, хотя они имеют тесную взаимосвязь и общий пул ресурсов.
- При планировании работ по проектам необходимо учитывать, что часть ресурсов предприятия уже используется на других проектах.
- Различные проекты и работы взаимосвязаны и реализуются в отделах, интересы и загрузку которых необходимо также учитывать.
- «Оптимальный» план проекта «до исполнителя» возможен только при согласовании его этапов с каждым из участвующих в реализации отделов и сотрудников, т.е. нужно строить согласованный «гармоничный» план, отвечающий балансу интересов подразделений, а не оптимизирующий один из показателей одного из подразделений.
- Планы работ могут по-разному строиться на различном уровне иерархии предприятия (уровень подразделения, научно-технического центра, отделов), и у каждого уровня, как и каждого подразделения, есть свои предпочтения и ограничения.
- По результату исполнения задач повторное планирование обычно не осуществляется, хотя именно на этом этапе есть возможность предупредить риски, связанные со срывом сроков и т.-д.
- Ситуация часто меняется, возникают события, влияющие на план работ в целом и его любые части, поэтому необходимо постоянно осуществлять перепланирование и координацию работ между проектами и внутри проектов в реальном времени.
- При планировании работ не учитываются содержательные особенности задач и квалификация исполнителей.

Игнорирование этих особенностей может приводить на практике к тому, что сроки изготовления изделий Корпорации оказываются несопоставимыми со сроками предприятий-конкурентов, растет себестоимость исполнения проектов, увеличиваются риски и появляется ряд других проблем.

Таким образом, имеющиеся в Windchill ProjectLink возможности по *динамическому планированию* весьма ограничены и сводятся к использованию традиционных механизмов, подобных MS Project, не располагающего возможностями согласованного динамического планирования подразделений Корпорации, тем более, в реальном времени.

Это обстоятельство и вынуждает искать новые методы и средства *динамического планирования,* которые могли бы быть надстроены над Windchill ProjectLink для согласованного распределенного планирования работы подразделений в реальном времени.

**Предлагаемый подход**

Основной идеей предлагаемого нами подхода к динамическому планированию является реализация такой многоуровневой мультиагентной системы [5], которая позволит осуществлять согласованное планирование работ в режиме реального времени на всех «этажах» предприятия, с учетом происходящих событий, к числу которых могут быть отнесены появление или отзыв (приостанов) работы, появление новых/удаление/временная недоступность ресурсов, задержка проекта, поступление или задержка финансов или других ресурсов и т.д.

Ввиду особенностей Корпорации необходимо разрабатывать систему, способную планировать работы с учетом сложной иерархии и множества показателей, по которым оценивается состояние проектов и планируются управляющие воздействия. При планировании следует на практике учитывать, что на конечный план влияют не только задачи, которые ставятся «сверху», но и, не в меньшей степени, особенности их исполнения «снизу», желания сверху должны быть подкреплены возможностями снизу. Кроме того, как бы ни был хорошо заранее построен план, но на этапе исполнения всегда возникают трудности или обнаруживаются несогласованности и происходит множество других событий (появилась новая идея, заболел ключевой сотрудник, выяснилась необходимость переделать часть работы и т.д.). Ввиду этого факта построение системы с одним глобальным монолитным планировщиком, решающим за всех и на всех уровнях, что надо делать каждому, представляется в принципе невозможным при реализации.

Вместо этого предлагается разрабатывать систему как сеть постоянно активных, автономных, но координирующих свои работы планировщиков для каждого подразделения. Открытая, гибкая и адаптивная p2p сеть таких планировщиков должна строиться по принципам «каждый с каждым» и «равный с равным» (вместо привычных «ведомый-ведущий»), чтобы давать возможность этим планировщикам согласовывать свои работы напрямую как по вертикали, так и по горизонтали, на основе принципов сервисной архитектуры с общей шиной данных, что может быть реализовано на основе сетецентрического подхода с построением холонической «матрешечной» структуры системы [6].

В этом подходе, представленном на Рис. 1., вся Корпорация представляется многоуровневой сетью планировщиков:

- Стратегический планировщик Корпорации в целом, работающий на значительный горизонт планирования (месяцы, годы), оперирующий укрупненной структурой изделий и экспертными оценками нормо-часов на разработку (на основе принципа аналогии);
- Тактический планировщик подразделения корпорации (в свою очередь, состоящий из планировщиков отделов, проектов или групп сотрудников), работающий на близком горизонте (день-неделя-месяц-квартал-год);

- Оперативный личный планировщик сотрудника корпорации, оперирующий с использованием как персонального компьютера, так и сотового телефона или планшета на горизонте день-час-минуты (если корпорация хочет знать положение дел по проектам с точностью до минуты).

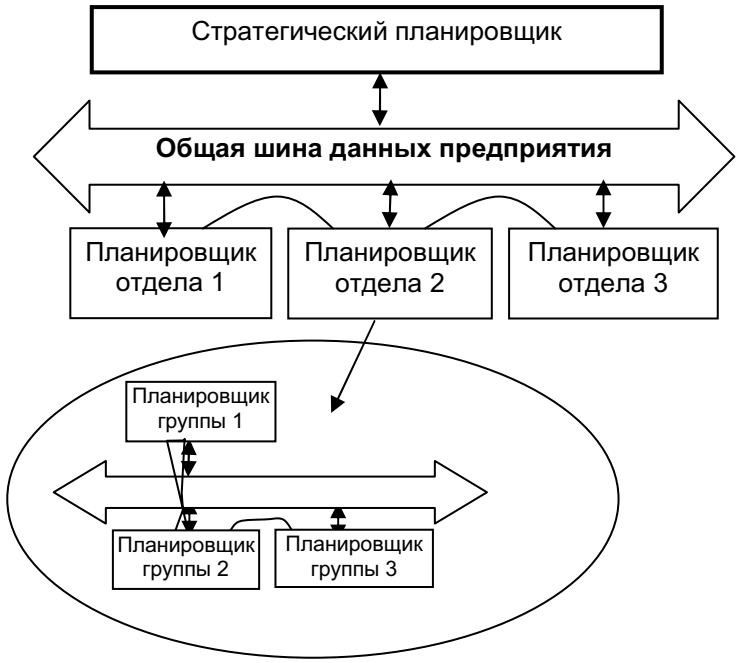



Рисунок 1 – Архитектура адаптивной p2p сети планировщиков

Данная сеть планировщиков должна быть тесно взаимоувязана с корпоративной системой *исполнения* проектов Windchill ProjectLink.

Каждый планировщик отдела сможет работать автономно, реагируя на возникающие события, а при необходимости сможет взаимодействовать с планировщиками других отделов через общую шину данных предприятия.

При этом каждый такой планировщик работает на сервере непрерывно, в реальном времени, и при этом никогда не останавливается и пытается добиться указываемых целей, реализуя полный цикл управления, включающий цикл управления любого живого организма:

- реакцию на непредвиденные события;
- динамическое планирование (перепланирование) ресурсов «на лету»;
- оптимизация плана для улучшения показателей (если есть время);
- согласование планов между постановщиками задач и их исполнителями в диалоге с пользователями;
- мониторинг и контроль исполнения планов;
- в случае расхождения плана и факта вырабатывается соответствующее событие и инициируется автоматическое перепланирование.

Однако, если выясняется, что отдел сам по себе также представляет собой слишком большую» систему (много сотрудников, групп и т.д.), он может быть декомпозирован на такую же вложенную p2p сеть планировщиков подразделений, групп и т.д.

Данная рекурсивная «матрешечная» организация, при которой каждый планировщик может размещаться физически на своем сервере, в особенности необходима с ростом

сложности задачи планирования и требуемой производительности вычислений, что решается за счет распараллеливания работы рассматриваемых систем предприятия.

С другой стороны, такой подход может распространяться не только вниз, например, на подразделения Корпорации, но и вверх, интегрируя между собой «свертки» планировщиков работ в Корпорации в целом.

**Как это выглядит глазами пользователей?**

На верхнем уровне Корпорации будет создаваться интерактивный стратегический планировщик, показывающий изменяющийся план реализации основных государственных и коммерческих заказов, который может быть доступен на больших экранах для руководства Корпорации.

Любые изменения в данном плане на верхнем уровне вызывают автоматический пересмотр планов на нижних уровнях – но, равно как и наоборот, прогресс или проблемы внизу изменяют стратегический план работы Корпорации наверху, причем могут подсвечиваться изменения за день-неделю-месяц и т.д.

После утверждения план работ верхнего уровня передается на исполнение в систему Windchill ProjectLink.

В частности, такой план до уровня подразделений уже сегодня имеется по направлениям Космических Аппаратов (КА), в системе Windchill ProjectLink. Этот план (Генеральный план-график проекта) может передаваться в планировщики более нижнего уровня для осуществления оперативного планирования работ до уровня исполнителей Корпорации в целях выполнения стратегических задач подразделения.

Покажем, как этот подход может работать на уровне отдельного сотрудника:

- При входе пользователя в систему в верхней части расписания на день появляется новая задача или задача, которая ранее была менее приоритетной, срочность которой вызвана произошедшими изменениями;
- Задача вступает в диалог с пользователем и просит разрешения войти в его расписание или изменить порядок (приоритет) выполнения работ;
- Пользователь сообщает, что пока не готов к выполнению данной работы, и ее выполнение потребует подготовки;
- Задача запрашивает оценку, сколько времени у исполнителя потребуется на ее выполнение?
- Если исполнитель просит два-три дня, задача просит разрешения согласовать вопросы перепланирования с другими участниками и руководством (при этом могут запрашиваться сведения о причинах такой задержки, что в будущем уточняет спецификацию задач);
- Задача перепланирует другие задачи у данного исполнителя на других сотрудников, выявляет, нет ли отрицательных последствий от задержки работы, согласовывает со всеми заинтересованными лицами и возвращается к исполнителю с согласованным решением;
- Исполнитель дает подтверждение на работу и приступает к ее выполнению;
- Задача периодически запрашивает прогресс или автоматически обнаруживает его по размещенным сотрудниками документам;
- В результате обеспечивается согласованное информационно-коммуникационное планирование и выполнение проекта в многопроектной среде предприятия.

Таким образом, такое планирование будет связано с выработкой взаимопонимания в интерсубъективной среде [7], т.е. с постоянным взаимным информированием, выдачей и принятием предложений, согласованием сроков, разбором конфликтов, выдачей встречных предложений, проверкой и согласованием решений и другими коммуникационными актами на уровне каждого конкретного сотрудника Корпорации в обеспечение и с осуществлением контроля выполнения сроков генерального план-графика проекта или этапа проекта.

В этом случае пользователь получит возможность сам выставлять время выполнения задачи, но при этом данное время должно накапливаться и сверяться с историческими данными по времени выполнения подобной задачи специалиста схожей квалификации, чтобы не допускать произвола в оценке задач, и в случаях больших расхождений эскалировать согласование вопроса на руководителя.

Для реализации такого подхода может быть организована база знаний классов задач Корпорации и нормативов по решению этих задач, которую можно использовать для оценки квалификации специалистов и предоставления экспертной оценки как по трудоемкости и времени выполнения, так и по стоимости работы.

Такой подход открывает новые возможности для роста производительности труда в Корпорации, повышения интереса к конечному результату и стимулирования работы специалистов, передачи знаний между сотрудниками, повышения качества работ, сокращения сроков и рисков проектов и т.д.

## Заключение

В работе рассмотрены задачи управления проектами НИР и ОКР в ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева и предложен подход к созданию распределенной многоуровневой мультиагентной системы согласованного планирования и исполнения планов работ подразделений в единой корпоративной информационной среде..

Рассмотрены основные виды планировщиков, включая стратегический, тактический и операционный уровни, входящие в состав системы, и основные особенности предлагаемого холонического подхода к ее устройству, позволяющего создавать вложенные (рекурсивные) сети планировщиков («матрешки») любого уровня, используя универсальную сервисную архитектуру с общей шиной данных.

Показаны перспективы развития подхода, обеспечивающего открытость, гибкость, эффективность, масштабируемость, производительность и надежность решения.

## Список литературы


[1] Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis / Ed. J. Y-T. Leung. – Boca Raton: Chapman & Hall, 2004.

[2] Stefan Vos Meta-heuristics: The State of the Art // Local Search for Planning and Scheduling / Ed. A. Nareyek // ECAI 2000 Workshop, Germany, August 21, 2000. – Springer-Verlag, Germany, 2001.

[3] Bonabeau E., Theraulaz G. Swarm Smarts. What computers are learning from them? // Scientific American. – 2000. – Vol. 282, №3. – P. 54-61.

[4] Wooldridge M. An Introduction to Multi-Agent Systems. – JohnWiley&Sons, 2002. – 340 p.

[5] П.О. Скобелев. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской школы мультиагентных систем. – «Мехатроника, Автоматизация, Управление», №12, 2010. – с. 33-46.

[6] Скобелев, П.О. Сетецентрический подход к созданию больших мультиагентных систем для адаптивного управления ресурсами в реальном времени / П.О. Скобелев, А.В. Царев // Труды международной научно-практической конференции «Управление большими системами-2011» (УБС’2011). Т.3. – М.: ИПУ РАН, 2011. – с.263-267.

[7] В.А.Виттих. Интерсубъективные системы как объекты постклассической науки. Препринт ИПУСС РАН, Самара, 2011. – 9 с.

# СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ОАО «РЖД» НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**А.Б. Шабунин[1], В.А. Чехов[1], П.О. Скобелев[2], Н.А. Кузнецов[3], Е.В. Симонова[2], И.О. Бабанин[2], С.С. Кожевников[2], М.Е. Степанов[2], А.В. Царев[2], С.В. Сазуров[4], Е.В. Курбатов[4], Д.В. Дмитриев[4]**

[1]ОАО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте»
109029, Москва, ул. Нижегородская, 27, стр.1, Россия
a_shabunin@hotmail.com
тел: +7(495) 967-77-01, факс: +7(495) 262-74-43

[2]ООО «НПК «Разумные решения»»
443080, Самара, ул. Санфировой, 95, Россия
at@anarun.net
тел: +7 (846) 332-21-01

[3]Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
125009, Москва К-9, Моховая, 11, кор. 7, Россия
kuznetsov@cplire.ru
тел: +7 (495) 629-30-05

[4]ООО «ПрограмПарк»
127018, Москва, ул. Сущевский вал, 16, стр. 5, Россия
kurbatov@programpark.ru, sazurov@programpark.ru, dmitriev@programpark.ru
тел: +7 (495) 660-32-95

***Ключевые слова:*** *сетецентрический подход, интеллектуальные системы, мультиагентные технологии, онтологии, адаптивное планирование*

**Abstract**
The article describes the network-centric approach for building intelligent systems of resource management of the railway divisions based on autonomous multi-agent planners integration of separate units into a single adaptive P2P self-organizing systems network ("the system of the systems"). Multi-agent technology is proposed for building intelligent systems of resource management of the railway.

## Введение

Железнодорожный транспорт является основополагающим для организации перевозочного процесса в России, т.к. выполняет 84,3 процента общего грузооборота, осуществляемого всеми видами транспорта [1]. Его системное взаимодействие с другими видами транспорта позволяет решить основную задачу обеспечения перевозок пассажиров и грузов в соответствии с принципами «точно в срок» и «от двери до двери». Стратегические направления научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 г. [2] и Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г. [1] требуют опережающего интенсивного инновационного развития научно-технической и технологической базы систем управления производственными процессами РЖД на основе передовых мировых достижений и прорывных технологий, в числе которых следует особо выделить:

- разработку принципиально новой, адаптивной технологии работы транспорта, соответствующей высокой динамике рыночной экономики, в том числе анализ соответствия суще-

ствующей технологии новым требованиям рыночной экономики – обеспечению динамичных экономических связей надежными и эффективными транспортными связями,

- разработку научных основ гибких форм организации работы транспорта (для железнодорожного транспорта – вариантный план формирования, гибкий график движения поездов, вариантные технологические процессы).

## 1 Особенности задачи управления ресурсами ОАО «РЖД»

Система управления производственными процессами ОАО «РЖД» представляет собой сверхсложную систему, характеризующуюся большим разнообразием и количеством взаимодействующих элементов с конфликтными интересами – в частности, для обеспечения грузоперевозок требуется согласованно планировать и учитывать пути, вагоны, локомотивы, составы, бригады машинистов, бригады ремонтных рабочих и другие ресурсы.

В современных условиях основой системы транспортной логистики железнодорожного транспорта должна стать интеллектуальная сеть грузовых сортировочных станций, рассматриваемых как логистические центры, глобальной задачей которых является ускорение продвижения материальных потоков, снижение суммарных затрат отправителей и получателей грузов. Согласно предварительным оценкам, решение данной задачи обеспечит повышение эффективности транспортной системы минимум на 5-10%, а по отдельным участкам и на 20%, без дополнительных инвестиций в транспортную инфраструктуру. Одним из ключевых факторов оптимизации должна стать возможность не только более точного планирования отгрузки, но и гибкой системы корректировки планов всех участников транспортной системы. Это позволит снизить фактор дефицита вагонов за счет уменьшения простоя подвижного состава в узких местах. Разработка графика движения грузовых поездов должна осуществляться в тесной увязке с системой организации вагонопотоков на всех этапах, в том числе, с учетом возникающих возмущений (сбой в расписании движения и погрузочно-разгрузочных работ, усложнение дорожной обстановки, ухудшение метеорологических условий и др.) [2, 3].

Однако, сложность и взаимозависимости в этой сети станций таковы, что даже небольшие проблемы, возникающие на одной станции, могут распространяться по сети станций и неожиданно многократно усиливаться, внезапно «ударяя» совершенно в другом месте, порождая «пробки», задержки и срывы в поставках, простои или холостой пробег вагонов и т.д. Причины такого рода «нелинейных» процессов при управлении производственными процессами в сети сортировочных станций железной дороги состоят в следующем:

- Неопределенность: трудно предсказать изменения спроса и предложения.
- Событийность: часто случаются события, требующие оперативного изменения планов, решений в реальном масштабе времени (поломки, отказы, задержки и т.д.).
- Ситуативность: решение надо принимать по ситуации.
- Оперативность, гибкость и эффективность: требуется высокая оперативность, гибкость и эффективность в принятии решений, чтобы не потерять «момент» в принятии решений.
- Многофакторность: много различных критериев, предпочтений и ограничений.
- Высокая связность: принятие оперативного решения на одном участке (станции) требует согласования и учёта принятых или планируемых решений на связанных участках (станциях), что может вызывать изменение решений многих других участников.
- Индивидуальность: заказчики, диспетчеры, машинисты, бригады и другие участники требуют все более индивидуального подхода.
- Конфликты: все больше участников с противоречивыми интересами.
- Трудоемкость: множество вариантов для расчета последствий принимаемых решений.

Управление технологическим процессом грузовой железнодорожной станции в настоящее время характеризуется значительным разнообразием автономно функционирующих систем, ориентированных преимущественно на информационное обеспечение оперативных ра-

ботников, связанных между собой проводными или беспроводными каналами технологической связи для передачи речевых сообщений. Последовательность выполнения технологических операций, формирование и исполнение команд управления обеспечивается должностными цепочками, включающими множество исполнителей, что снижает эффективность использования вагонов и маневровых локомотивов, приводя к возрастанию суммарного времени их простоя и малой скорости движения.

Все эти особенности требуют новых современных подходов, методов и средств автоматизации управленческой и производственной деятельности для поддержки принятия согласованных решений в реальном времени [3].

## 2 Сетецентрический подход к разработке распределенных систем управления ресурсами ОАО «РЖД»

Задача эффективного управления ресурсами такой крупнейшей национальной компании, как ОАО «РЖД» слишком сложна, чтобы ее можно было решить с помощью одной глобальной, централизованной, монолитной и последовательной системы, вырабатывающей оптимальные решения. Повышение эффективности использования ресурсов, обеспечение безопасности движения и т.д. должно быть основано на согласованном управлении ресурсами РЖД.

Представление сети грузовых сортировочных станций как сложной структуры, состоящей из автономно функционирующих и взаимодействующих между собой элементов, требует принципиально новых методов и средств построения распределенных систем управления, планирования и оптимизации производственных, технологических, ремонтных, кадровых, финансовых и других ресурсов в реальном времени. Фактически необходимо создать «систему систем» планировщиков реального времени, обеспечивающую согласованное поведение и взаимную «увязку» планов всех подсистем в целом при решении поставленных задач.

В этой связи решение сложных задач грузовых перевозок представляется целесообразным с самого начала рассматривать на основе сетецентрического подхода [4], получившего развитие для моделирования боевых действий, в совокупности совместной согласованной работы всей сети станций: «так локально, как только возможно, и так глобально, насколько это требуется для успешного решения задачи» (as local as possible and as global - as required), по аналогии с взаимодействием подразделений родов войск в крупных боевых операциях. Это означает на практике для РЖД, что все предвидеть и рассчитать заранее в таких сложных системах невозможно, и решение возникающих проблем должно осуществляться, прежде всего, во взаимодействии автономных подсистем станции, но если это не удается, то должно начинаться урегулирующее взаимодействие с соседними станциями, от них «волна» взаимодействий может развиваться к «соседям соседей» еще дальше и т.д. Но также при этом всем станциям должна быть доступна общая глобальная информация о состоянии сети в целом, которая должна использоваться интеллектуальными системами каждой станции для выбора направлений взаимодействий и переговоров, принятия и согласования решений.

Сетецентрический подход предопределяет организацию управления сложными процессами в распределённой коммуникационной инфраструктуре, реализующей максимальную ситуационную осведомлённость каждого узла (Situational Awareness) и переход к работе каждого узла в режиме самоорганизации на достижение поставленных задач. Успешное решение задач управления всей организацией в рамках сетецентрического подхода складывается из успешного выполнения своей задачи каждым узлом во взаимодействии с другими смежными узлами. В результате взаимодействия узлов друг с другом происходит динамическое перепланирование действий каждого узла под контролем особого узла (диспетчера командного штаба), имеющего стратегический обзор ситуации. Эти узлы, в свою очередь, также могут образовывать связанную сеть взаимодействующих узлов.

Процесс управления базируется не на традиционном иерархическом принципе, а на достижении результата за счёт согласованного выполнения задач управления с учетом реально складывающейся обстановки. Важным условием является самосинхронизация, под которой понимается возможность обеспечения наибольшей эффективности, как своих действий, так и действий других систем на основе их взаимного согласования. В качестве основного условия для достижения требуемой самосинхронизации рассматривается необходимость наличия единых правил согласования действий и единого языка (протокола) взаимодействия. Такой принцип управления обеспечивает повышение оперативности реакции на изменившуюся ситуацию или параметры окружающей среды, возможность реализации адаптивного поведения каждого узла системы и, как следствие, революционный сдвиг в эффективности деятельности.

Сетецентрический подход может рассматриваться как развитие таких известных концепций управления организациями, как C2 (command and control) и, более современной, EC2 (Enterprise command and control) и может в будущем найти широкое применение практически во всех направлениях и отраслях деятельности, как в военной сфере и крупном бизнесе, так и в государственных институтах, крупных корпорациях и т.д.

Предлагаемая концепция сетецентрических систем для ОАО «РЖД» может быть реализована на основе создания асинхронных многоуровневых адаптивных p2p сетей мультиагентных систем (Рисунок 1), где p2p (peer-to-peer) означает для этих систем возможность работы по принципам «каждый с каждым» и «равный с равным» через общую шину данных.

Рисунок 1 – Сетецентрическая архитектура системы управления производственными подразделениями ОАО «РЖД» в реальном времени

В предлагаемой концепции каждая система представляет собой вложенную «матрешку» сети составных систем для планирования отдельных ресурсов станции. Каждый уровень такой «матрешки» представляет собой адаптивную p2p сеть подсистем, каждая подсистема может работать с каждой другой. Например, планировщик дороги декомпозируется в планировщики станций, планировщики станций декомпозируются в сети планировщиков локомотивов, вагонов, бригад и т.д. В архитектурном плане такая система может иметь различные реализации с использованием достаточно отработанных принципов сервисной организации SOA (Service-Oriented Architecture) и ESB (Enterprise Service Bus) [5]. В результате такая система может ра-

ботать на одном сервере, а при необходимости быстро развернута на разные сервера, обеспечивая открытость к росту сложности, высокую производительность, надежность, живучесть, масштабируемость приложений.

Важно отметить, что возможность создания такого рода систем во многом обеспечивается за счет применения рассматриваемых ниже мультиагентных технологий для адаптивного планирования ресурсов – фактически, в предлагаемом сетецентрическом подходе речь идет о ко-эволюции нескольких самоорганизующихся мультиагентных систем (в отличие от более привычных отношений «мастер-ведомый» между системами), обменивающихся сообщениями и данными между собой и с пользователями в реальном времени для согласования или координации адаптивно изменяющихся планов [5 - 7].

Для реализации сетецентрического подхода требуется интеграционная платформа. Это программно-аппаратная инфраструктура, позволяющая организовать обмен данными между распределёнными приложениями и информационными системами для поддержки, мониторинга и управления производственными и бизнес-процессами предприятия. Необходимо создавать и исполнять приложения самого широкого назначения, в том числе для автоматизации работы диспетчерских служб, задействованных в различных технологических и производственных процессах, комплексных систем безопасности, мониторинга и паспортизации объектов. В рамках единой интеграционной платформы должна быть обеспечена интеграция существующих промышленных систем и баз данных станции, комплексной автоматизации производственных бизнес-процессов и обеспечения доступа к данным для специализированных мультиагентных и других систем управления ресурсами подразделений станции в реальном времени.

В предлагаемом подходе для построения интеграционной платформы для комплексной автоматизации станции предлагается развитие промышленной платформы «Вектор», в основе которой лежит принцип построения систем на основе «Data-driven model» (систем, управляемых данными), прошедшей успешную апробацию в нефтегазовой отрасли [8,9].

Данный подход является новым и весьма перспективным для создания сложных систем управления такими крупными предприятиями, как РЖД («систем систем»), работающих в реальном времени и функционирующих как единый организм для обеспечения высокой согласованности, продуктивности и эффективности использования ресурсов.

## 3 Мультиагентные технологии для создания распределенных систем управления ресурсами ОАО «РЖД»

Мультиагентные технологии, использующие онтологии для описания знаний о предметной области, позволяют построить адаптивные методы и средства распределения ресурсов, планирования, согласования, мониторинга и контроля исполнения планов в реальном времени, когда планы не строятся заново всякий раз, а лишь постоянно корректируются и перестраиваются по мере их выполнения [10, 11].

Для использования в мультиагентных системах (МАС) управления ресурсами требуются специализированные онтологии и средства поддержки их построения, позволяющие учитывать особенности решаемой задачи и специфику предметной области ОАО «РЖД» при обнаружении и разрешении конфликтов для поиска баланса интересов всех участников процесса согласованного планирования.

Онтология РЖД представляется в виде семантической сети, которая образуется классами понятий и отношений, играющих роль связей. Ниже приведены примеры классов понятий и отношений:

- Классы понятий: «Груз», «Транспортное средство», «Поезд», «Вагон», «Бригада».
- Примеры свойств: Цистерна «Может перевозить» нефть.
- Примеры процессов: Груз «доставляется» потребителю, Поезд «формируется» из вагонов.

- Примеры отношений: Груз «находиться» на поезде, груз «забронировал» вагон.
- Примеры атрибутов поезда: «Плановая дата отбытия», «Длительность движения», «Станция назначения», «Скорость движения».

На рисунке 2 представлен фрагмент онтологии ОАО «РЖД», представленной в виде дерева концептов и семантической сети.

С использованием онтологии можно специфицировать конкретные факты и строить модели ситуаций (сцен), задающие исходные условия для начала работы агентов.

Рисунок 2 – Представление онтологии ОАО «РЖД» в виде дерева и семантической сети

В предлагаемой мультиагентной технологии, развивающей предложенный ранее метод сопряженных взаимодействий [12], каждой потребности или возможности реального мира РЖД в соответствие может быть поставлен программный агент, способный действовать от его лица и по его поручению, которые формируют сети потребностей и возможностей (ПВ-сети) станции. При динамическом планировании моделируется процесс распределении ключевых ресурсов ОАО «РЖД» (состав, локомотив, вагон, машинист, путь и др.) и построения сложных расписаний через сопряженное взаимодействие участников этого процесса, которые по определению имеют различные цели, предпочтения и ограничения.

В перечень основных агентов входят:

- агент расписания, соответствует расписанию движения поезда по заданному маршруту в целом;
- агент строки расписания, соответствует расписанию движения поезда по участку маршрута между двумя станциями;
- агент поезда;
- агент ресурса станции (диспетчера, локомотива, машиниста, ремонтного рабочего и т.п.);
- агент элемента пути;
- агент окна для выполнения работ на участке пути;
- агент временного слота.

Потребность в выполнении технологических операций по расписанию или потребность в выполнении окон раскладывается на подпотребности, соответствующие строкам расписания. Агенты соответствующих потребностей взаимодействуют с агентами временных слотов. Агенты временных слотов резервируют ресурсы. Агенты временных слотов в процессе переговоров проактивно ищут другие слоты, которые используют тот же самый ресурс. Если агенты временных слотов обнаруживают конфликт, они должны разрешить его, после чего агент временного слота связывается с потребностью.

Ниже кратко описаны принципы предлагаемого решения:

- каждый технологический участок пути, локомотив, сотрудник или любой другой ресурс получает своего программного агента, у которого ведется свое расписание;
- под каждую требуемую операцию технологического процесса создается свой агент заказа, который получает требования и ограничения на планирование;
- агент заказа начинает планирование путем поиска необходимых ему ресурсов в сцене, которая описывает текущую ситуацию выполнения работ, т.е., какой ресурс какое расписание исполняет;
- если подходящие ресурсы (исполнители) заняты, то фиксируется конфликт, и начинаются переговоры по его разрешению путем подвижек и освобождений нужных слотов времени на ресурсах;
- в ходе переговоров возможны варианты: новая операция уйдет на менее подходящий ресурс (исполнителя), предыдущая или следующая операция уйдет или сдвинется;
- даже после решения своей задачи каждый агент не останавливается и продолжает пытаться улучшить свое положение.

При планировании задач (операций) в расписании каждого ресурса могут применяться различные стратегии, например:

1) планирование точно-в-срок (JIT – Just In Time) – задается плановая дата завершения технологического процесса (ТПР) и на этой основе вычисляется дата начала работ первой технологической операции (ТОП) проекта и составляется план;
2) планирование как можно раньше (ASAP – As Soon As Possible) – выполнение каждого вида операций планируется на ближайшее доступное время, а наиболее ранняя дата завершения последней операции технологического процесса определяется как дата окончания технологического процесса и т.д.

Переход к реальному времени в управлении ресурсами позволяет значительно повысить эффективность работы, избежать «затоваривания» или, наоборот, дефицита ресурсов, обеспечить прозрачность и согласованность работы всех звеньев производственного процесса в транспортной сети, дает новые возможности для оптимизации и контроля, быстрой реакции на непредвиденные события (террористические атаки, изменения дорожной обстановки, метеорологические условия) и т.д.

Основные компоненты интеллектуальной МАС управления ресурсами ОАО «РЖД» представлены на Рисунке 3.

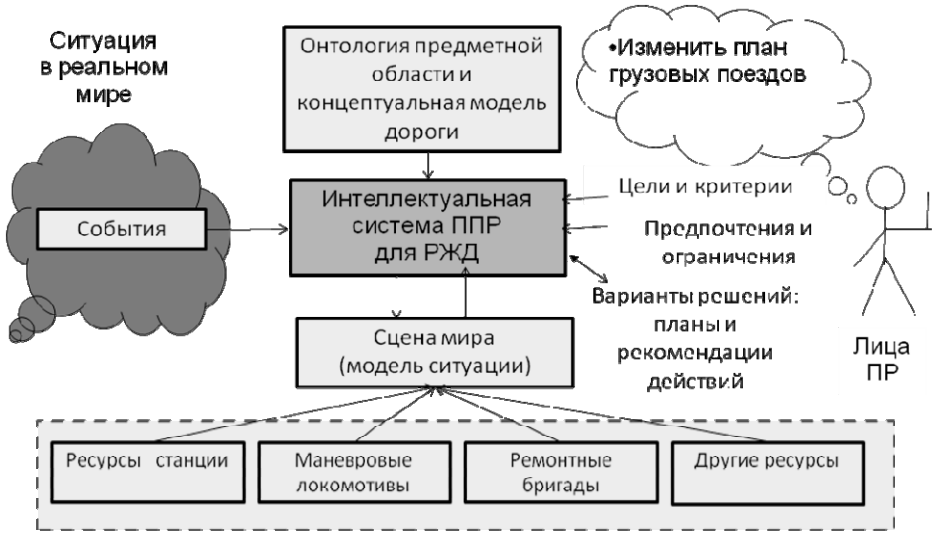



Рисунок 3 – Основные компоненты интеллектуальной МАС управления ресурсами ОАО «РЖД»

## 4 Пример решаемых задач маршрутизации и консолидации вагонов при формировании грузовых поездов

Типичной задачей при осуществлении станционной деятельности является формирование грузовых поездов и консолидация/деконсолидация вагонов. Рассмотрим логику мультиагентной маршрутизации железнодорожных грузовых перевозок с консолидацией/деконсолидацией заказов. Предполагается, что используется новый подход РЖД к хождению грузовых поездов по расписаниям, которые планируются на основании статистики, но формируются из коммерческих заказов динамически. Таким образом, если на некоторый грузовой поезд не найдется заказов, он может быть отменен, а если на него уже запланированы некоторые заказы, но поезд остается существенно нерентабельным, эти заказы могут быть перераспределены динамически на другие более ранние или поздние грузовые поезда для более эффективного перемещения грузов, если это возможно по условиям контрактов с клиентами.

Общая логика работы системы является событийной – каждое новое событие вызывает инициацию соответствующих агентов, от которых начинает распространяться волна переговоров. В частности, создается новый заказ на перевозку грузов, который начинает рассчитывать для себя варианты. Существующие заказы должны, сохраняя текущие связи, промоделировать расчеты по появляющимся новым опциям на фоне уже имеющегося принятого варианта, который должен отыскиваться с минимальными затратами или отклонениями от существующего положения, реализуя принцип экономии мышления. Если найти новый вариант для уже размещенного заказа среди его ближайших «соседей» не получается, круг его поисков может расширяться, если в системе нет других неразмещенных заказов, которым должен быть передан приоритет управления

Пусть задана модельная транспортная сеть грузовых сортировочных станций, представленная на Рисунке 4. Здесь кружками показаны сортировочные грузовые станции, а прямоугольниками – большие грузовые и пассажирские станции. Пусть в системе последовательно появляются новые заказы, о направлениях, объемах и сроках поступления которых системе заранее ничего неизвестно. Тем не менее, известно, что в новой концепции движения грузовых поездов по расписаниям планируется поездка грузовых поездов из C в G и из B в X в нужные моменты времени, и объем этих составов не должен превышать 24 вагона.

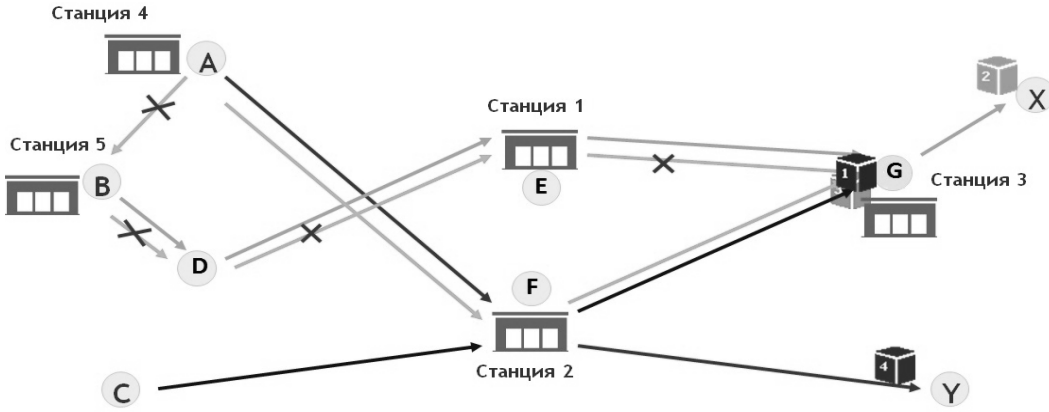



Рисунок 4 – Пример планирования консолидаций вагонов в сети грузовых станций

Пусть первым приходит Заказ 1 на 5 вагонов, который следует из C в G по маршруту M1: C – F – G. Требуемые 5 вагонов планируются в Поезд 1. Далее приходит Заказ 2 на 3 вагона, который следует из B в X по маршруту M2: B – D – E – G – X, который планируется в Поезд 2. Далее появляется большой Заказ 3, который следует из A в G, на 15 вагонов. Пусть из A в G нет прямого поезда и тогда у Заказа 3 остается вариант доехать до ближайшей Станции 5 (пункт B) и там консолидироваться с вагонами Поезда 2, если есть поезд по расписанию из A в B, предположим, что такой поезд имеется (Поезд 4). Таким образом, чтобы консолидироваться с Заказом 2, Заказу 3 необходимо добраться до Станции 5, где произойдет консолидация Заказа 2 и Заказа 3 в Поезде 2. Пусть Заказ 3 успевает доехать до Станции 5 к моменту отправления Поезда 2. В Поезде 2 теперь будет 3 + 15 = 18 вагонов (из 24 возможных), что уже делает выгодным поезд и поездку. Далее Заказ 2 и Заказ 3 совместно проследуют по участку B – D – E – G, затем на Станции 3 произойдет деконсолидация Заказа 2 и Заказа 3. Заказ 2 проследует далее в X, а Заказ 3 останется в пункте назначения G, при этом требуемое время доставки обеспечено. Для Заказа 3 в системе формируется маршрут M3: A – B – D – E – G.

Пусть теперь в системе появляется Заказ 4, который следует из A в Y по маршруту M4: A – F – Y. Имеется Поезд 3, который запланирован и свободен для данного заказа. Этот факт радикально меняет ситуацию для Заказа 3, который теперь «пробуждается» и должен заново оценить складывающуюся обстановку. Агент Заказа 3 анализирует возможность консолидироваться с другими заказами, чтобы избежать одиночной перевозки по отрезку пути A – B, и видит, что может теперь консолидироваться с Заказом 4 до Станции 2 (при этом в Поезде 3 окажется 20 вагонов), после чего проследовать совместно с Заказом 1 до Станции 3 на Поезде 1, в котором также будет 20 вагонов. Заказ 3 прибывает на Станцию 2 так, что успевает до отправления Поезда 1. На Станции 2 произойдет деконсолидация Заказа 3 и Заказа 4 и последующая консолидация Заказа 3 и Заказа 1. Требуемое время доставки заказов при этом также обеспечивается. Таким образом, в системе формируется маршрут M5: A – F – G.

Необходимо сравнить два возможных маршрута Заказа 3 и оценить, какой из них принесет системе максимальную прибыль, т.е. оценить два варианта маршрутов в системе: Вариант 1 –M1 + M2 + M3 + M4 и Вариант 2 – M1 + M2 + M5 + M4. На участках консолидации заказы разделяют себестоимость перевозки единицы груза на один километр пропорционально числу вагонов в заказе, т.е. требуется больше вагонов – больше плати за перевозку. В результате расчетов оказывается, что Вариант 2, включающий маршруты перевозок M1, M2, M5 и M4, приносит большую прибыль. Таким образом, Заказ 3 следует консолидировать с Заказом 4 на участке A – F и с Заказом 1 на участке F – G.

## Заключение

Получены следующие результаты:

1) В качестве подхода к решению поставленной задачи эффективного управления производственной деятельности подразделений ОАО «РЖД» и обеспечения поддержки принятия решений в реальном времени предлагается сетецентрический подход к построению «системы систем» управления производственными подразделениями железной дороги в реальном времени на основе мультиагентных технологий.
2) Разработаны агенты базовых ресурсов транспортной сети и характерные для них алгоритмы принятия решений, а также протоколы переговоров между агентами для обнаружения конфликтов и поиска компромиссов для динамического адаптивного планирования ресурсов железной дороги в случае возникновения непредвиденных событий (опозданий, ремонтов и т.д.).
3) Показана возможность построения мультиагентных систем для адаптивного планирования различных ресурсов железной дороги, обеспечивающих грузовые перевозки по коммерческим заказам по расписанию, а также особенности мультиагентной логики маршрутизации железнодорожных грузовых перевозок с консолидацией/деконсолидацией заказов.
4) Разработана базовая онтология ресурсов железной дороги для поддержки принятия решений по управлению ресурсами ОАО «РЖД», а также принципы создания и редактирования онтологий и сцен, содержащих оперативную информацию о ситуации на железной дороге, в виде семантических сетей.
5) Разработаны принципы построения интеграционной программной платформы комплексной автоматизации планирования ресурсов ОАО «РЖД» на базе универсальной промышленной платформы российского производства «Вектор».

Предлагаемый проект направлен на создание интеллектуальных систем управления грузовым движением РЖД, что является одним из актуальных и значимых направлений развития автоматизированных систем управления железнодорожным транспортом будущего.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку в рамках гранта №11-07-13119-офи-м-2011-РЖД.

## Список литературы

[1] Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. – Режим доступа: http://rosavtodor.ru/information/Osnovnye_dokumenty/transportnaya_strategiya_rf_na_period_do_2030_goda.html.
[2] Белая книга ОАО «РЖД». – 2010. – 54 с.
[3] Матюхин В.Г., Шаров В.А., Шабунин А.Б. Управление железной дорогой онлайн. – Пульт управления, 2012, №1. – Режим доступа: http://pult.gudok.ru/archive/detail.php?ID=420035.
[4] Сетецентрическая война: Материалы Научно-исследовательского центра Военной ордена Ленина Краснознаменной ордена Суворова академии Генерального Штаба Вооруженных Сил Российской Федерации. – М., 2010. – 331 с.
[5] Шабунин, А.Б. Сетецентрический подход к разработке системы управления производственными процессами ОАО «РЖД» / А.Б. Шабунин, А.В. Чехов, Д.В. Дмитриев, Е.В. Курбатов, С.В. Сазуров, П.О.Скобелев, Е.В.Симонова, А.В.Царев, М.Е.Степанов // Труды международной научно-практической конференции «Управление большими системами-2011» (УБС'2011). Т.3. – М.: ИПУ РАН, 2011. – с.222-225.
[6] Иващенко, А.В. Мультиагентные технологии для разработки сетецентрических систем управления / А.В. Иващенко, О.В. Карсаев, П.О. Скобелев, А.В. Царев, Р.М. Юсупов.– Известия ЮФУ. Технические науки.– 2011, №3 (116). – с.11-23.

[7] Скобелев, П.О. Сетецентрический подход к созданию больших мультиагентных систем для адаптивного управления ресурсами в реальном времени / П.О. Скобелев, А.В. Царев // Труды международной научно-практической конференции «Управление большими системами-2011» (УБС'2011). Т.3. – М.: ИПУ РАН, 2011. – с.263-267.
[8] Скалинов С.А., Зырин Н.В., Шабунин А.Б. Вектор автоматизации. Автоматизированная информационная система управления «Вектор». – Нефть и газ, 2005, №1, с. 64.
[9] Автоматизированная информационная система управления «Вектор. – Режим доступа: http://www.programpark.ru/vector.
[10] Скобелев П.О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем. – Мехатроника, автоматизация, управление (МАУ), 2010, №12. – с.33-46.
[11] Skobelev P. (Invited talk). Multi-Agent Systems for Real Time Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling: Industrial Application. / Petr Skobelev.- In Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, HoloMAS 2011, Tolouse, France, August 2011. – Springer Verlag, Berlin: 2011. – pp.1-14.
[12] Виттих В.А. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном времени / В.А. Виттих, П.О. Скобелев – М.: Автометрия. – 2009, №2. – с.78-87.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ ЦЕХОМ ОАО «ИЖЕВСКИЙ МОТОЗАВОД – АКСИОН ХОЛДИНГ»

**И.Ю. Тюрин[1], А.С. Вылегжанин[1], М.В. Андреев[2], Э.В. Кольбова[2], П.О. Скобелев[2], Я.Ю. Шепилов[2]**

[1]ОАО «Ижевский мотозавод «Аксион-холдинг»»
426000, Удмуртская Республика, Ижевск, ул. М. Горького, 90, Россия
aksioninstr@mail.ru
тел: +7 (3412) 56-08-99

[2]ООО «НПК «Разумные решения»»
443080, Самара, ул. Санфировой, 95 лит.4, офис 416, Россия
technology@smartsolutions-123.ru
тел/факс: + 7 (846) 222-91-72, 222-91-73

***Ключевые слова:*** *мультиагентная система, оперативное планирование, реальное время, результаты внедрения, перспективы*

**Abstract**
This paper describes results of development and delivery of real time multi-agent scheduling and controlling system in Axion Holding company.

## Введение

Разработка мультиагентных систем для оперативного управления ресурсами цехов промышленных предприятий в реальном времени является новой инновационной сложной задачей и потому особо большое значение имеет практический опыт освоения и внедрения такого рода систем, позволяющий на практике оценить преимущества подхода и его перспективы.

Разработанный подход к созданию и реализации указанных систем подробно рассмотрен в работах, также как и их функциональные возможности, особенности взаимодействия с пользователями и т.д. [1-5].

В настоящей статье рассматриваются полученный опыт и результаты выполнения проекта по созданию и внедрению мультиагентной системы оперативного управления ресурсами в Инструментальном цехе №11 на ОАО «Ижевский мотозавод «Аксион-холдинг», крупнейшем предприятии России по выпуску электронной продукции, реализованного в тесном творческом сотрудничестве специалистов завода и разработчиков рассматриваемых систем.

Приобретенный опыт позволяет оценить объем и трудоемкость решаемых задач, сроки выполнения проекта разработки и внедрения рассматриваемых систем, основные проблемы и трудности, с которым сталкиваются разработчики и пользователи рассматриваемых систем, и, наконец, дать оценку эффективности разработки и наметить перспективы развития и использования системы.

## 2 История проекта

Рассмотрим основные этапы проекта, которые представляются характерными для проектов подобной сложности:

### 2.1 Разработка Технического задания на доработку базовой системы (ТЗ): март – июнь 2010 (3 месяца)

Проект был начат в марте 2010 года с разработки уточненного Технического задания, которая позволила в течении 3 месяцев относительно точно специфицировать все требования к доработке системы, изначально разработанной для одного из цехов ФГУП «ЦСКБ-Прогресс» и далее внедренной на ОАО «СызраньТяжмаш» [1-2].

### 2.2 Создание специализированной версии системы для управления инструментальным цехом: июль – декабрь 2010 (6 месяцев)

На основе созданного ТЗ в течении следующих 6 месяцев развернулись работы по доработке системы, которые включали создание и наполнение справочников системы, развитие самой подсистемы планирования (в первую очередь, в части поддержки правил выбора рабочих на операции по специальным тегам, показывающим, в дополнение к разрядам, их уровень квалификации и умений для конкретных операций), создание необходимых дополнительных автоматизированных рабочих мест пользователей (АРМов), интеграцию с системой «Адем», дающей состав изделий и порядок выполнения технологических операций, и АСУ предприятия, построение требуемых отчетов.

### 2.3 Внедрение системы: январь – август 2011 (7 месяцев)

Внедрение системы началось с тотального оснащения цеха необходимым оборудованием и большими усилиями руководства цеха, направленными на перевод конструкторской и технологической документации из бумажной – в электронную форму, составляющими важную часть входных данных для планирования работы цеха. Фактически, одновременно с внедрением мультиагентной системы на заводе форсированным образом пошло обучение работников цеха основам компьютерной грамотности. Кроме того, постоянно уточнялись требования к системе, прежде всего, в части удобства работы пользователей, а также на больших объемах конкретных производственных данных выявлялись и устранялись ошибки программирования, неизбежно возникающие в столь сложных проектах, что в целом привело к задержке завершения проекта почти на 4 месяца против исходного срока.

Причины такой задержки проекта связаны в первую очередь с инновационным характером разработки (нет прямых аналогов в мире), и потому часть требований выяснялась, изменялась и уточнялась в ходе работы (в общей сложности за время создания и внедрения системы получено 352 замечания, из них 221 – новые требования для доработки системы), что, с другой стороны, позволило максимально удовлетворить требованиям конкретного производственного цеха.

### 2.4 Доработки системы по итогам внедрения: сентябрь – декабрь 2011 (4 месяца)

По результатам внедрения было подготовлено дополнительное ТЗ на новые функциональные возможности системы, необходимость в которых выявилась непосредственно в ходе создания системы, что в основном касалось поддержки работы с архивом, дополнительных функций АРМов (например, распределителей работ ПДБ – для более удобного учета выполненных работ), процессов учета брака и перепланирования соответствующих работ, учета матрицы транспортировки, частичной сдачи заказа, ускорением работы системы и т.д.

Созданная система была доработана «на ходу» без остановки ее ежедневного использования в цехе.

## 3 Результаты внедрения

В настоящее время около 30 пользователей используют систему ежедневно в своей работе и любой даже небольшой сбой может вызвать нарушение бизнес-процесса работы цеха.

В числе основных пользователей: руководство цеха, ПДБ, нормировщики, мастера, технологи, контролеры и ряд других сотрудников цеха и предприятия в целом.

В ходе внедрения системы были получены следующие основные результаты:

- Полный переход от бумажной - к электронной технологии управления цехом.
- Прозрачность работы цеха – достигла около 100%, что позволяет наладить контроль и оптимизировать работы.
- Введенные данные по объектам и технологическим процессам используются повторно, что приводит к росту производительности труда технологов и нормировщиков.
- Система цеха полностью интегрирована в информационное пространство предприятия: заказы импортируются в МАС из ОУП предприятия, заработная плата рабочим начисляется на основе данных МАС и передается в 1С.
- Благодаря интеграции с ОУП предприятия снижается нагрузка на ПДБ цеха и увеличивается оперативность (скорость реакции) на поступление новых заказов, что в свою очередь ускоряет производство новых изделий.
- В системе поддерживается полный цикл управления: от ввода событий – к планированию и контролю результатов через отметки факта выполнения работ и анализу план против факта.
- План работы цеха может теперь в любой момент перестраиваться и пересчитываться быстро, гибко и с учетом индивидуальных особенностей каждого заказа и ресурса.
- Принимаемые решения становятся более надежными, обоснованными и точными, избавленными от ошибок людей.
- Автоматизированы все основные рутинные операции, что снижает трудоемкость управления: например, ССЗ формируется автоматически, но могут быть удобно и просто доработаны в любом направлении.
- Стратегическое планирование также становится более простым, быстрым и удобным: АРМ «Мастер план» строит производственное расписание на горизонт до 2 лет за время около 10-15 минут.
- Важные субъективные знания мастеров о станках, технологиях и рабочих (плохо формализуемые) становятся объективными и могут быть использованы для повышения качества планирования.
- Создана платформа для развития производственных ресурсов цеха без роста численности управленческого персонала.

По мнению руководства завода и цеха главными результатами проекта стало достижение полной прозрачности в планировании деятельности цеха, что позволяет с опережением видеть «узкие места» производства и своевременно, гибко и оперативно перераспределять ресурсы и планировать работу цеха в реальном времени, что приводит к значительному повышению эффективности управления работой цеха.

Изначально, для руководства предприятия данный цех во многом представлял собой закрытый «черный ящик», по вине которого регулярно срывались сроки важных заказов, но оплата была относительно высока в силу наличия очень высококвалифицированных рабочих. Переход к оперативному планированию позволил выявить и высветить ряд проблем, включая диспропорцию между структурой заказов и квалификацией существующего персонала, сузить возможности для «приписок», сокращать простой и дефицит ресурсов и т.д.

Наиболее важные преимущества для руководства цеха, начальников участков и смен, мастеров, которые уже сегодня могут быть выражены в цифрах:

- За счет использования системы стало возможным повысить объем валовой продукции цеха на 5-10%.

- Сокращение «беготни» по коридорам между ПДБ, Тех. Бюро, БТиЗ и участками в поисках документов. До внедрения системы этим занимались 7 человек по 2 часа ежедневно. Экономия – 14 нормо-часов рабочего времени ежедневно.
- Сокращение затрат на коммуникацию и поиск информации по заказам и изготовленным изделиям для анализа готовности работ по заказу. До внедрения системы на этого тратился в среднем не менее 1 часа времени зам начальника цеха по производству.
- Появилась возможность анализа срока сдачи заказа в поле всех заказов. В результате стало возможным более четко оценивать риски и получать прогнозы на несколько месяцев вперед – 128 нормо-часов в месяц для всех участников.
- Появилась возможность анализа ТП и его норм в любое время без поиска бумажных документов - 23 нормо-часов в месяц.
- Появилась возможность анализа цикла производства (когда работа по заказу «застревала»: когда выдали технологию, пронормировали, пришел материал и выдали в работу, когда сдали заказ) - 256 нормо-часов в месяц.
- Появилась возможность осуществлять анализ загруженности и производительности труда рабочих – 48 нормо-часов в месяц.
- Автоматическое формирование ССЗ на месяц вперед. До внедрения системы этот процесс отнимал 2 рабочих дня 4х человек. Экономия – 64 нормо-часов рабочего времени ежемесячно.
- Автоматизированы все основные рутинные операции, что снижает трудоемкость управления (например, расценки считаются автоматически, автоматически подсчитываются объемы незавершенного производства ССЗ формируется автоматически), но могут быть удобно и просто доработаны в любом направлении – 528 нормо-часов в месяц.
- Появилась справка по планам загрузки по основным видам работ, что дало опережающую возможность анализа потребности в рабочих той или иной специальности - 36 нормо-часов в месяц.

В результате экономия от внедрения для одного цеха составляет не менее 1163 нормо-часов в месяц, или 7 чел-месяцев в месяц, что соответствует 84 * 40 т.р.= 3 360 000 руб. в год (без учета выпуска дополнительной продукции при той же численности работников цеха).

## 4 Перспективы развития системы

Созданная в ходе проекта система «скользящего планирования» в реальном времени уже сегодня существенно отличается от известных на рынке, обеспечивая адаптивное планирование по любым непредвиденным событиям в сочетании с контролем исполнения планов, когда отметки о выполненных работах также приводят к изменению и уточнению сменно-суточных заданий рабочим в реальном времени.

Кроме того, в систему с перспективой заложен ряд таких новых функциональных возможностей, которые пока на сегодня опережают потребности «обычного» производства, но могут быть легко развернуты так, чтобы на самом деле превратить цех и все предприятие в настоящую «фабрику будущего»:

- Сенсорные экраны рабочих и планшеты (айпады) мастеров, большой экран в цехе, отражающий ход работ на местах в динамике – рабочий может получать не целиком сменно-суточное задание на день, а лишь одну операцию, и следующую получать после того, как подтвердит выполнение, что может мотивировать квалифицированных рабочих к сдельной оплате труда, перевыполнению норм и росту производительности труда;
- Полный цикл производства от ввода заказа до отметки о выполнении операций позволяет постоянно в реальном времени актуализировать состояние производства, что в свою очередь дает возможность для принятия управленческих решений в темпе производства:

- Экономика реального времени – любой новый заказ может считаться системой с учетом «удара» по другим заказам, которые могут быть задержаны из-за срочности данного, при этом известна цена каждой операции, каждой компоненты изделия, каждой минуты станка и рабочего с учетом энергопотребления, ремонтов и т.д.;
- Управление на основе знаний – основой системы становится пополняемая база знаний о цехе, которая содержит, помимо обычных справочников данных, описания особых умений рабочих и особенностей станков, нюансов технологических операций и т.д.;
- Развитие мультикритериальной оптимизации за счет учета и поиска баланса интересов новых агентов (важность клиента, себестоимость, занятость и рост квалификации рабочих, электропотребление, экология и др.). При этом многокритериальное планирование может быть гомеостатическим: система может ситуативно «оптимизировать» план под ряд противоречивых критериев (чем хуже по критерию ситуация – тем важнее добиться улучшения), обеспечивая эластичность по критериям;
- Обучение из опыта: система может обучаться из опыта и, например, не назначать 1 микронные операции на рабочего, который трижды «завалил» микронную операцию, или выводить его на специальные курсы;
- Трансфер знаний: система может поддерживать передачу знаний от квалифицированных – к молодым рабочим, используя гибкие схемы мотивации и оплаты наставничества;
- Создание сетецентрической платформы для построения адаптивной p2p сети взаимодействия цехов предприятия;
- Подключение к производственному планированию продавцов, финансистов, экономистов, снабженцев, кадровиков и другие службы предприятия для получения сбалансированного и прозрачного для предприятия решения по производству;
- Создание интеллектуального интерактивного стратегического планировщика завода по объемному планированию на большой горизонт планирования на основе мультиагентной технологии;
- Система моделирования, позволяющая моделировать процесс выполнения предполагаемых заказов на разном оборудовании, с учетом дополнительных смен и сверхурочных, при увеличении численности или квалификации рабочих и т.д.. Благодаря данной возможности становится возможным промоделировать управленческое решение и его последствия сразу же в момент возникновения данной необходимости, что в свою очередь снижает риски и возможные негативные последствия.
- Создание бизнес-радара руководства для скользящего анализа ситуации в цеху и получения опережающих прогнозов для раннего выявления и согласованной расшивки «узких мест»;
- Разработка высокоуровневого проблемно-ориентированного языка управления планировщиками цехов для программистов предприятия;
- Повышение производительности системы и использование принципов облачных вычислений (cloud computing).

**Заключение**

Переход к распределению ресурсов в реальном времени обеспечивает для предприятий возможность повышения гибкости и оперативности в принятии решений, увеличения эффективности использования ресурсов, сокращения оборотных средств и складских остатков, исключения простоя ресурсов и аварийных дефицитов и «нехваток» в последнюю минуту и т.п.

Вместе с тем, наш опыт разработки и внедрения подобных систем показывает, что процесс внедрение рассматриваемых систем – процесс никак не менее сложный и трудоемкий, чем сама разработка, что необходимо обязательно учитывать в планировании новых крупных проектов.

При этом полученный опыт внедрения показывает, что эти усилия для заказчика могут окупаться в течении самого короткого времени.

**Список литературы**


[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

# МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ БРИГАДАМИ ДЛЯ СРЕДНЕВОЛЖСКОЙ ГАЗОВОЙ КОМПАНИИ

**С.В. Блинов[1], В.Е. Сердюк[1], Г.В. Онищенко[1], П.О. Скобелев[2], В.Б. Ларюхин[2], Д.С. Очков[2], А.В. Царев[2], В.А. Томин[2]**

[1]ООО «Средневолжская газовая компания»
443010, Самара, ул. Льва Толстого, 18А, стр.7, Россия
svgc@svgc.ru
тел: +7(846) 340-61-61

[2]ООО «НПК «Разумные решения»»
443080, Самара, ул. Санфировой, 95, Россия
ochkov@smartsolutions-123.ru, vlarukhin@smartsolutions-123.ru, at@anarun.net
тел: +7 (846) 222-91-72

***Ключевые слова:*** *региональный центр, поставки газа, управление аварийными бригадами, мультиагентные технологии, реальное время*

**Abstract**
The paper describes the real time scheduling and execution system for mobile resources management for 04 call center of regional gas provider company based on multi-agent technology. The result is 40% increase of efficiency of existing company resources.

## Введение

Настоящая статья посвящена разработке и внедрению в штатную эксплуатацию мультиагентной системы управления аварийными бригадами для регионального диспетчерского центра службы газа 04 Средневолжской газовой компании.

Благодаря внедрению разработанной системы удалось создать центральную региональную диспетчерскую, в которой не только видно, где находится каждая конкретная машина, но и каков план работы каждой бригады, рассчитанный с учетом особенностей заявок, расстояний между пунктами, норм работы по заявкам, оснащенности машин и ряда других важных параметров.

Главным результатом внедрения системы стала полная прозрачность бизнес-процессов аварийных бригад по исполнению заявок предприятий и населения Самарской области и почти 40% рост эффективности работы бригад, определяемый как увеличение среднего числа выполненных бригадами заявок за день.

В статье кратко описываются особенности устройства и работы системы и преимущества от ее внедрения при управлении мобильными ресурсами в реальном времени.

## 1 Назначение и область применения

Система предназначена для поддержки принятия решений по управлению мобильными бригадами, оснащенными средствами GPS / ГЛОНАСС навигации.

Основные функции системы позволяют осуществлять быструю реакцию на непредвиденные события, распределение бригад по заявкам, оптимизацию расписаний, коммуникацию с мастерами через сотовые телефоны для согласования решений и контроля бизнес-процессов, мониторинг и контроль исполнения планов, выявления расхождений между планом и фактом.

Система с небольшими доработками  может применяться для управления скорой помощью, аварийными бригадами газовой службы, электрических сетей, водоканала и другими выездными службами, нацеленными на решение оперативных задач.

## 2 Новизна подхода: метод адаптивного планирования

В отличие от традиционных систем управления ресурсами, работающих преимущественно в пакетном режиме [1-2], предлагаемая мультиагентная система постоянно работает в реальном времени, адаптивно перестраивая план под действием любых заданных событий во внешнем мире [3-5]. Для этого система устанавливается и запускается на сервере заказчика и работает далее непрерывно, не останавливаясь, в режиме реального времени реагируя на заказы и другие события, вводимые оператором или приходящие из других систем (Рисунок 1).

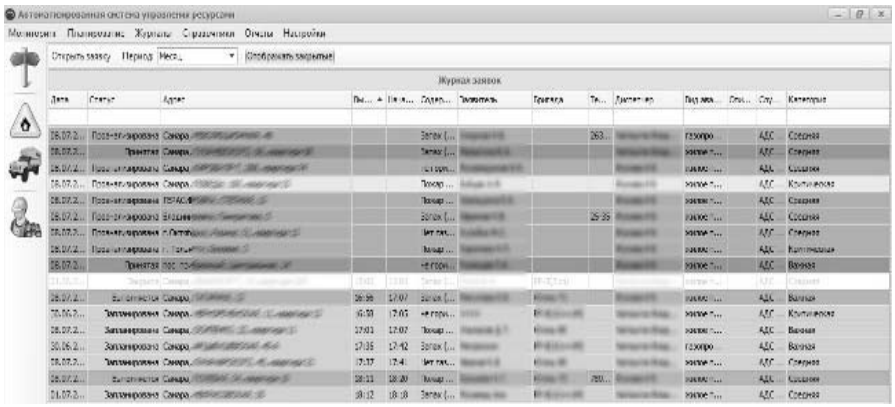


Рисунок 1– Экран системы с отметками статуса заявок

При этом система постоянно стремится как оперативно реагировать на события, так и улучшать создаваемые планы операций - путем не только использования свободных бригад, но и сдвижек ранее размещенных заказов или их переброски на другие ресурсы. В этих целях используется мультиагентная технология, позволяющая представлять расписание как динамически изменяющуюся сеть агентов потребностей и возможностей организации, представляющих, например, интересы требований заявителя, возможностей мобильных бригад и их рабочих (Рисунок 2). В результате план работы оперативных бригад строится не путем классического комбинаторного перебора, а как баланс интересов всех участников.

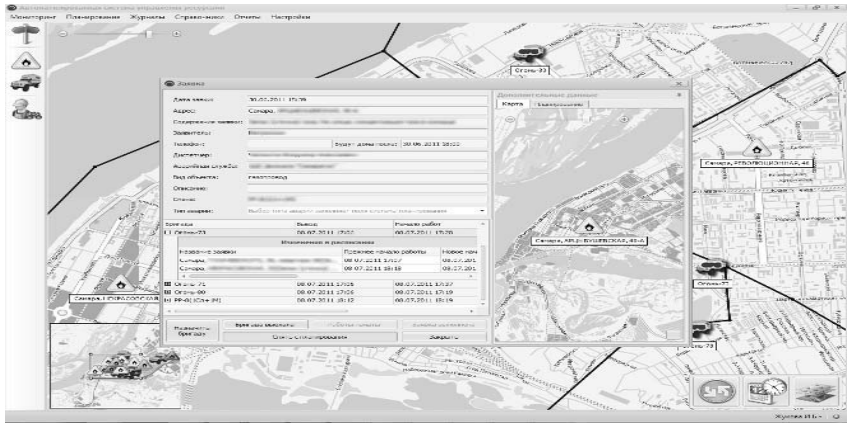


Рисунок 2 – Адаптивное изменение расписания с приходом новой заявки

Автоматизация адаптивного подхода позволяет оперативно реагировать на события, минимизировать ручные изменения и учитывать динамично изменяющуюся ситуацию, специфику заявок, особенности ресурсов и многие другие факторы, которые делают задачу диспетчеризации столь сложной и трудоемкой. При этом система предоставляет и функцию мониторинга исполнения создаваемых планов с учетом состояния заявок, месторасположения оперативных бригад и их маршрутов, с возможность удобной ручной корректировки (Рисунок 3).

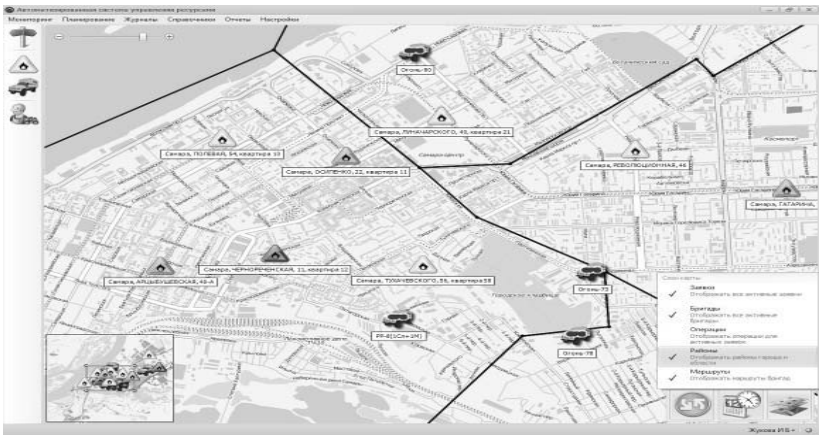


Рисунок 3 – Мониторинг маршрута и хода выполнения работ

Важной особенностью работы системы является обратная связь с оперативными бригадами. Разработанное мобильное приложение позволяет держать с ними постоянную связь, оперативно обновляя статус, получая новую информацию, распределяя задачи, что крайне важно для поддержки адаптивного планирования в реальном времени (Рисунок 4).

Рисунок 4 – Обратная связь с оперативными бригадами

## 3 Основные функциональные возможности

Предлагаемая система автоматизирует полный цикл управления оперативной службой, решая в режиме реального времени следующие задачи:

- поддержка эффективной работы в подборе и назначении выездной бригады с учетом изменяемых критериев планирования;

- создание, ведение и изменения в реальном времени оперативных планов работы бригад в условиях неопределенности и высокой динамики событий, связанных с возможностью появления новых заявок с более высоким приоритетом, изменения доступных ресурсов;
- обеспечение индивидуального подхода к планированию каждого заказа;
- представление хода текущих работ в наглядной, легко интерпретируемой форме;
- возможностью формирования отчетов для анализа эффективности работы ресурсов;
- накопление знаний о специфике рабочих процессов, позволяющих уточнять и совершенствовать правила принятия решений при обработке заявок, изменять приоритеты заявок и назначать оптимальные ресурсы;
- интеллектуальная поддержка принятия решений по загрузке имеющихся в наличии ресурсов с учетом особенностей поступающих заявок;
- повышение прозрачности процессов в подразделениях, накопление статистики и обеспечение возможности аудита логики принятия решений;
- поддержка принятия решения пользователя в выборе ресурсов для выполнения заявки: отображение нескольких вариантов планирования с указанием ресурсов и затрат;
- отображение текущего местоположения и состояния бригад на карте города;
- управление заявками и состоянием бригады через мобильное устройство;
- создание отчетов о работе отдельных сотрудников, бригад и подразделения в целом.

Созданная система имеет клиент-серверную архитектуру, работает с наиболее популярными электронными картами, обеспечивает удаленный доступ через Интернет, поддерживает наиболее популярные сотовые телефоны и смартфоны для поддержки бизнес-процессов работы бригад, имеет наглядный визуальный и дружественный интерфейс пользователя.

## 4 Результаты внедрения системы

Разработанная система обеспечивает следующие новые возможности:

- решает сложную задачу планирования взаимосвязанных выездов бригад с учетом географии, приоритета и других особенностей заявки и оснащенности бригады;
- позволяет оперативно, гибко и эффективно реагировать на события в реальном времени, такие как поступление новых заказов, поломка транспорта, опережение или задержка при выполнении работы и т.д.;
- обеспечивает индивидуальный подход к каждому заказу и ресурсу;
- сокращает трудоемкость работы диспетчеров и упрощает их работу;
- снижает роль человеческого фактора при принятии решений, сокращает число ошибок диспетчеров при планировании и зависимость от персоналий опытных диспетчеров;
- создает платформу для роста и развития бизнеса компании без роста численности управленческого персонала.

В результате внедрения системы эффективность использования мобильных бригад увеличилась на 40%.

Кроме того, переход к работе в режиме реального времени позволил повысить оперативность принятия решений и качество обслуживания заявок, сократить затраты, снизить риски и возможные потери от несвоевременного или неквалифицированного выполнения заявки.

## Заключение

Разработанная мультиагентная система управления мобильными бригадами для аварийных бригад службы газа 04 является действенным инструментом для повышения эффективности управления мобильными ресурсами в реальном времени.

Полученный успешный опыт разработки и внедрения системы показывает перспективность мультиагентных технологий для управления ресурсами в реальном времени и открывает

широкие возможности применения для бригад энергетиков, водоканала, пожарных, скорой помощи и полиции, службы спасения и многих других применений.

### Список литературы


[1] Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis / Ed. J. Y-T. Leung. – Boca Raton: Chapman & Hall, 2004.

[2] Stefan Vos Meta-heuristics: The State of the Art // Local Search for Planning and Scheduling / Ed. A. Nareyek // ECAI 2000 Workshop, Germany, August 21, 2000. – Springer-Verlag, Germany, 2001.

[3] Bonabeau E., Theraulaz G. Swarm Smarts. What computers are learning from them? // Scientific American. – 2000. – Vol. 282, N 3. – P. 54-61.

[4] Wooldridge M. An Introduction to Multi-Agent Systems. – JohnWiley&Sons, 2002. – 340 p.

[5] П.О. Скобелев. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской школы мультиагентных систем. – «Мехатроника, Управление, Автоматизация», 12, 2010, стр. 33-46.

# ТЕОРЕТИКО-ВОЗМОЖНОСТНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДОМИНИРУЮЩЕЙ МОТИВАЦИИ ДИСПЕТЧЕРА В ЦЕЛЯХ ПРОГНОЗА ДЕЙСТВИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

**Г.А. Крыжановский, В.В. Купин**

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации»
196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38, Россия
kriganovskiy_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:*** *активный элемент, управление, мотивация, возможность, идентификация*

**Abstract**
Now it is proposed the possibility-theoretical approach for decision-maker dominant motivation identification for building his dynamic motivational and intentional pattern while developing adaptive intellectual decision support systems.

## Введение

Систему организации воздушного движения (ОрВД) можно определить как организационно-техническую систему, в которой осуществляют свою деятельность активные элементы (АЭ), выступающие в роли как управляющих устройств – лиц, принимающих решения, так и в роли управляемых субъектов. Характерными свойствами таких АЭ являются наличие свободы выбора своего состояния, наличие собственных интересов, предпочтений и целей, а также целенаправленность поведения (деятельности) [1].

Достижение целей функционирования системы ОрВД - безопасность, экономическая эффективность и регулярность авиаперевозок - в условиях непрерывного роста интенсивности и возрастающих требований к уровню безопасности воздушного движения невозможно без внедрения новых операционных концепций и процедур организации и обслуживания воздушного движения [2].

Как правило, внедрение таких новых процедур связано, в свою очередь, с внедрением новых средств автоматизации и поддержки принятия решений при управлении воздушным движением (УВД). В современных автоматизированных системах ОрВД типичными функциями являются такие как определение среднесрочных конфликтов, многосекторное планирование, организация и регулирование потоков прилета и вылета, а также функции выдачи рекомендаций диспетчеру УВД по выбору управляющих воздействий – команд [3].

Эффективность функционирования перечисленных средств поддержки принятия решений при организации воздушного движения (СрППР ОрВД) напрямую зависит от точности прогноза и времени расчёта траекторий движения отдельных воздушных судов (ВС). Развитие интегрированных систем ОрВД в будущем приведёт, скорее всего, к использованию траекторных данных, рассчитываемых бортовыми системами управления. Однако в ближайшей и среднесрочной перспективе в автоматизированных системах ОрВД будут использоваться траекторные данные, рассчитываемые модулями и средствами наземного базирования [3, 4].

Такой модуль прогноза траекторий рассчитывает предполагаемую траекторию полёта ВС на основе информации о полёте (т.н. программной или опорной траектории), функционально-эксплуатационной модели ВС и расчетных метеорологических условий. Точность и соответствующая доверительная вероятность прогноза профиля полёта ВС зависят непосредственно от неточности и неопределённости тех или иных входных данных модуля прогноза траекторий.

Неточность характерна для значений таких характеристик, как тяга двигателей, аэродинамическое сопротивление, масса ВС, вектор скорости ветра [5].

Неопределённость же возникает в связи с действиями и предпочтениями АЭ: пилотов и диспетчера УВД. Так от предпочтений пилота, например, зависит выбор момента времени перехода к следующей фазе полёта или выполнения команды диспетчера УВД, выбор режима работы двигателей, конфигурации ВС, выбор выдерживаемых значений скорости (приборной и вертикальной) [6, 7].

Одной из основных проблем при прогнозе траекторий является неопределённость, обусловленная мотивацией и предпочтениями диспетчера УВД. Частично эта проблема может быть решена путём использования рекомендаций по управляющим воздействиям диспетчеру УВД, генерируемых СрППР, встроенным в контур управления. Однако для того, чтобы такие рекомендации были воспринимаемы диспетчером УВД, они должны быть адекватными его модели управления и принятия решений.

В этой связи актуальной является задача создания адаптивной интеллектуально-информационной системы, в которой прогноз траекторий движения ВС и синтез рекомендаций по управляющим воздействиям диспетчеру УВД осуществляется с учётом предпочтений и намерений (мотивации) АЭ – пилотов и диспетчера УВД, а также их взаимодействия.

Важным элементом адаптивной интеллектуально-информационной системы является блок формирования индивидуального динамического мотивационного образа намерений (ДМОН) диспетчера УВД.

## 2 Построение ДМОН диспетчера УВД

Динамический мотивационный образа намерений АЭ определяется его доминирующей мотивацией. При исследовании процессов формирования и классификации мотивации выделяют внутренние и внешние её стимулы, определяющие такие её компоненты, как диспозиционные - обобщённые, внутренние переменные, и функциональные - ситуативные, внешние, специфические. Как те, так и другие, могут быть устойчивыми или неустойчивыми [8, 9]. Таким образом, доминирующая мотивация, как динамическая компонента структуры деятельности определяется единством субъектных (внутренних, личностных) и объективных (внешних, ситуативных) факторов мотивации.

В психологии при исследовании деятельности субъектов выделяют такие основные типы мотивационной тенденции, как стремление к успеху и избегание неудач. Обозначим их соответственно $m_1$ и $m_Q$, и определим (это можно сделать на основе процедур экспертного опроса) $Q-2$ ($Q$>2) промежуточных состояния доминирующего мотивационного возбуждения на шкале от «стремления к успеху» до «избегания неудач». Обозначим через $M$ множество возможных мотивационных состояний АЭ (доминирующих мотивационных возбуждений), $m_q \in M$, $q = \overline{1,Q}$. Практически состояния близкие к $m_1$ можно истолковать, как мобилизацию всего внутреннего потенциала профессионально-мыслительных способностей (ПМС) на достижение результатов решения задач УВД, близких к оптимальным. Для состояний же близких к $m_Q$ показатель эффективности УВД, по сути, определяется одним критерием – избеганием ситуаций, в которых может наступить ответственность за нарушение установленных требований по безопасности воздушного движения (например, интервалов эшелонирования). При этом состояние $m_Q$ может подразумевать, в том числе, и стремление переложить ответственность за складывающуюся ситуацию на другие АЭ (диспетчеров смежных секторов ОВД). Понятно, что эволюция состояний $m_q^s$ $s$-го диспетчера (АЭ) будет определять и его предпоч-

тения $r_s \in R_s$ в выборе и реализации действий, а это, в свою очередь, – вид показателя эффективности $J_s$ $s$-го АЭ: $m_q^s \Rightarrow r_s \Rightarrow J_s$.

Как уже было отмечено, в состоянии $m_q$ можно выделить её внешние $E_q$ и внутренние $I_q$ детерминанты (составляющие): $m_q = \Sigma(E_q, I_q)$. Тогда для определения доминирующего мотивационного возбуждения необходимо, во-первых, дать содержательную интерпретацию внутренних и внешних составляющих мотивации с точки зрения их количественной оценки, во-вторых, предложить способ оценки (аппроксимации) зависимости $m_q = \Sigma(\cdot,\cdot)$ [10-12].

Под $E_q$ можно подразумевать характеристики эксплуатационно-операционной среды и объекта управления – динамической воздушной обстановки, среди которых одними из основных являются характеристики воздушного движения, определяющие загруженность диспетчера. Часто при исследовании загруженности в качестве интегральной оценки характеристик воздушного движения используется показатель средней плотности воздушного движения

(1) $\overline{\rho} = \dfrac{\lambda \cdot \Delta T}{V}$

за некоторый интервал времени $\Delta T$ ($\lambda$ - интенсивность воздушного движения - ВС/ч; $V$ - оперативный объём воздушного пространства исследуемой зоны ответственности ОВД – км$^3$).

Внутренняя доминанта мотивации уже была истолкована как готовность или внутренняя смысло-волевая регуляция, направленная на мобилизацию ПМС для достижения результатов профессиональной деятельности. В качестве показателей, по которым можно судить о внутренней детерминанте мотивационного возбуждения, влияющей на решение задачи как оперативного целеполагания, так и определения рационального пути достижения оперативно назначенной цели [13], можно использовать следующие: относительное суммарное удлинение траекторий движения ВС $\Delta L_\Sigma = \dfrac{\sum_{k=1}^{N}(L_i - L_{i0})}{\sum_{k=1}^{N} L_{i0}}$ ($L_{i0}$ - длина номинальной траектории движения $i$-го ВС, $N$ – количество ВС, обслуженных на интервале $\Delta T$), относительное суммарное изменение скоростей движения ВС $\Delta W_\Sigma = \dfrac{\sum_{k=1}^{N}|W_i - W_{i0}|}{\sum_{k=1}^{N} W_{i0}}$ ($W_{i0}$ - номинальная скорость движения $i$-го ВС на данном этапе полета), максимальная $D_{\max}$ и средняя $\overline{D}$ задержка ВС в потоке, величина формируемого диспетчером интервала $\overline{\tau}$ между ВС [14] и др.

В качестве интегрального показателя результатов оперативного целеполагания и выбора пути достижения назначенной цели можно использовать, например, показатель относительной суммарной задержки ВС

(2) $\Delta D_\Sigma = \dfrac{\Delta L_\Sigma}{\Delta W_\Sigma}$,

для которого вместо $L_{i0}$ и $W_{i0}$ используются значения $L_{iopt}$ и $W_{iopt}$, определяемые для каждого из $N$ прилетающих ВС исходя, например, из критерия минимизации максимальной задержки ВС в потоке (максимальной экономической эффективности).

Возможность учёта индивидуальных реакций и действий АЭ в процессе контроля его деятельности за счёт непосредственной регистрации показателей его психофизиологического состояния (частота дыхания, артериальное давление, частота пульса и т.д.) в полёте или при управлении воздушным движением трудно реализуема по ряду технических, физиологических и психофизиологических причин [15].

В этой связи заслуживают внимания подходы косвенной интегральной оценки действий и соответствующих им состояний АЭ. Так, например, в [15] предложен способ построения электронного паспорта лётчика на основе формирования в пространстве параметров, характеризующих движение самолёта и индивидуальные управляющие реакции лётчика, доверительной области (области достижимости), содержащей с заданной вероятностью значения таких параметров, которые соответствуют штатному выполнению типовых задач.

Однако теретико-вероятностный метод, используемый для построения доверительных областей, не всегда может быть эффективным при построении косвенной интегральной оценки действий и определяющих их мотивационных состояний АЭ. Тому можно назвать следующие причины. Во-первых, отсутствует формально чёткое определение самой мотивации и, соответственно, формально строгие методы её оценки. Во-вторых, объект исследования, скорее всего, не имеет хорошо определённой стохастической компоненты.

В данной работе предлагается подход косвенной оценки действий и доминирующего мотивационного возбуждения (состояния) при построении ДМОН АЭ на основе использования теоретико-возможностного подхода.

## 3 Теоретико-возможностная идентификация мотивационных состояний АЭ

Кратко основные теоретические предпосылки теоретико-возможностной идентификации могут быть представлены следующим образом [16]. Рассмотрим стохастический эксперимент, связанный с исследованием действий диспетчера при определённых условиях эксплуатационно-операционной среды и фиксированных характеристиках ДВО, модель которого представляет собой класс $\wp$ дискретных вероятностных пространств $\langle Y, \mathcal{P}(Y), P \rangle$ (где $\mathcal{P}(Y)$ - множество всех подмножеств $Y$), в которых значения вероятностей $p_i := P(\{y_i\})$ элементарных исходов (действий диспетчера) $y_i \in Y \quad i = \overline{1,m}$ подчинены условиям упорядоченности и нормировки:

$$(3) \quad p_1 \geq \ldots p_m > 0 \,,\ \sum_{i=1}^{m} p_i = 1 \,,$$

а в остальном произвольны.

Если класс всех вероятностей $P(\cdot) : \mathsf{P}(Y) \to [0,1]$, $P(A) := \sum_{i: y_i \in A} p_i$, $A \in \mathcal{P}(Y)$, определяемых последовательностями $\{p_1, p_2, \ldots\}$ вероятностей элементарных исходов, удовлетворяющих условиям (3), обозначить $\mathbb{P}$, то класс вероятностных пространств $\wp := \{\langle Y, \mathcal{P}(Y), P \rangle, P \in \mathbb{P}\}$, можно определить как математическую или стохастическую модель рассматриваемого эксперимента.

Эксперименту, для которого определена стохастическая модель в виде класса вероятностных пространств $\wp$, можно сопоставить класс пространств с возможностью $\langle Y, \mathcal{P}(Y), V \rangle$, в которых значения возможностей $v_i := V\{(y_i)\}$, $i = \overline{1,m}$, элементарных исходов (выборов действий), определяют возможность $V(\cdot) : P(Y) \to [0,1]$ выражением $V(A) := \sup_{i: y_i \in A} v_i$, и упорядочены подобно вероятностям в (3): $1 = v_1 \geq v_2 \geq \ldots \geq 0$.

Пусть $D$ – множество решений о состоянии мотивационного возбуждения, $\Lambda$ - нечёткое множество, определённое на пространстве с возможностью $\langle Y, \mathcal{P}(Y), V_Y \rangle$ со значениями в классе $\mathcal{P}(M \times D)$ всех подмножеств $M \times D$ (где $M$ – множество состояний мотивационного возбуждения). Определим функцию принадлежности $\mu_{\cdot,\cdot}$ нечёткого множества $\Lambda$ как $\mu_{\cdot,\cdot} := \mu^{\Lambda}{}_{\cdot,\cdot} : M \times D \to [0,1]$.

Значение $\mu_{m,d} \in [0,1]$ ($m \in M$, $d \in D$) есть возможность покрытия точки $(m,d) \in M \times D$ нечётким множеством $\Lambda$, которое в процедуре идентификации может быть интерпретировано как возможность потерь, обусловленных принятием решения $d$ о состоянии мотивационного возбуждения, в то время как на самом деле АЭ находится в состоянии $m$.

Определим нечёткое состояние мотивационного возбуждения нечётким элементом $\eta$, а наблюдение за ним – нечётким элементом $\varepsilon$. Если задано распределение $f^{\varepsilon,\eta}(\cdot,\cdot) : X \times K \to [0,1]$, то значение $f^{\varepsilon,\eta}(x,k)$, которое есть возможность того, что АЭ находится в состоянии $\eta = k \in K$ и $\varepsilon = x \in X$ - результат наблюдения за АЭ.

Схему наблюдения за АЭ таким образом можно определить парой нечётких элементов $(\varepsilon, \eta)$, из которых первый наблюдаем, а второй – нет. Распределение $f^{\varepsilon,\eta}(\cdot,\cdot)$, определяющее нечёткую связь между состоянием $\eta$ АЭ и результатом наблюдений $\varepsilon$ за ним, можно определить как теоретико-возможностную модель АЭ и схемы наблюдения за ним.

Решение о состоянии АЭ определим в виде нечёткого элемента $\delta$, принимающего значения в $D$. Назовём переходной возможностью на $(D, \mathcal{P}(D))$ и $(X, \mathcal{P}(X))$ любое отображение $\Pi(\cdot|\cdot) : \mathcal{P}(D) \times X \to [0,1]$, такое, что при $\forall x \in X$ $\Pi(\cdot|x) : \mathcal{P}(D) \to [0,1]$ есть возможность на $(D, \mathcal{P}(D))$.

Функция $\pi^{\delta|\varepsilon}(\cdot|\cdot) : D \times X \to [0,1]$, которая при $\forall x \in X$ является распределением переходной возможности $\Pi(\cdot|\cdot) : \mathcal{P}(D) \times X \to [0,1]$, которая, в свою очередь, определяется выражением: $\Pi(A|x) = \sup_{d \in A} \pi^{\delta|\varepsilon}(d|x)$, $A \in \mathcal{P}(D)$.

Распределение $\pi^{\delta|\varepsilon}$ можно назвать нечётким правилом решения $\delta$ о состоянии АЭ, основанного на наблюдении $\varepsilon$, или нечётким правилом идентификации [16].

Модель нечёткой системы доминирующего мотивационного возбуждения и наблюдения за АЭ определяется тогда априорным распределением возможностей $f^{\eta}(\cdot) : K \to [0,1]$ состояний АЭ и распределением переходной возможности $f^{\varepsilon|\eta}(\cdot|k) : X \to [0,1]$ для каждого состояния $k \in K$. В таком случае $f^{\varepsilon,\eta}(x,k) = \min(f^{\varepsilon|\eta}(x|k), f^{\eta}(k))$, $x \in X$ и $k \in K$ есть совместное распределение $\varepsilon$ и $\eta$.

При использовании такой конструкции модели распределение $f^{\varepsilon|\eta}(\cdot|\cdot)$ переходной возможности можно интерпретировать как распределение условной возможности.

Далее если $K = D$, то $P_d(x) := \max_{1 \le k \le d} \min(\mu_{k,d}, f^{\varepsilon,\eta}(x,k))$ есть возможность потерь, сопутствующих решению $\delta = d$ при наблюдении $\varepsilon = x$, $x \in X$. Задача определения оптимального

нечёткого правила $\pi^{*\delta|\varepsilon}$ может быть представлена как задача минимизации возможности потерь: $PL(\pi^{\delta|\varepsilon}) = \sup\limits_{x\in X} \max\limits_{1\le d\le q} \min(\pi^{\delta|\varepsilon}(d|x), P_d(x)) \to \min\limits_{\pi^{\delta|\varepsilon}(\cdot|\cdot)}$.

Получить решение этой задачи можно, решая для каждого $x \in X$ более простую задачу [16]: $\max\limits_{1\le d\le q} \min(\pi^{\delta|\varepsilon}(d|x), P_d(x)) \to \min\limits_{\pi^{\delta|\varepsilon}(\cdot|\cdot)}$.

## 4 Пример задачи идентификации типа доминирующего мотивационного возбуждения диспетчера ОВД

Как уже было отмечено, АЭ может находиться в одном из $q$ состояний мотивационного возбуждения $m_q$. Пусть $M_I = \{m_1, m_2, ..., m_z\}$ и $M_{II} = \{m_{z+1}, m_{z+2}, ..., m_Q\}$ классы мотивационных состояний, которые относятся к типу мотивации достижения результата и избегания неудач соответственно. Интересует ответ на вопрос о том, к проявлениям какого типа мотивации могут быть отнесены наблюдаемые результаты деятельности АЭ. Потери влекут лишь такие ошибки, при которых принимается решение об отнесении мотивационного возбуждения к одному классу, в то время как на самом деле оно относится к другому (другому типу мотивации).

Задача теоретико-возможностной идентификации заключается в следующем. Наблюдая за результатами деятельности диспетчера ОВД определить, к какому из типов мотивации можно отнести его доминирующее мотивационное возбуждение в момент наблюдения.

Модель системы и схемы наблюдения в данном случае определяется распределением переходной возможности $f^{\varepsilon|\eta}(x|q)$, $x \in X$, $q \in \overline{1,Q}$ и априорным распределением возможностей мотивационных состояний АЭ $f^{\eta}(q)$, $q \in \overline{1,Q}$.

Распределение переходной возможности $f^{\varepsilon|\eta}(x|q)$ определяется с использованием процедуры экспертного оценивания распределения возможностей [16]. При априорно неизвестном распределении $f^{\eta}(q)$ можно положить $f^{\eta}(q) = 1$, $q \in \overline{1,Q}$, т.е. определить мотивационные состояния $m_q$ как равновозможные.

Нечёткое правило идентификации $\pi^{*\delta|\varepsilon}$ минимизирующее возможность потерь, в этом случае определится условиями: $\max\limits_{d\in M_i} \pi^{*\delta|\varepsilon}(d|x) = 1$, $\max\limits_{d\in M\setminus M_i} \pi^{*\delta|\varepsilon}(d|x) = 0$, если $\max\limits_{m_q\in M_i} f^{\varepsilon|\eta}(x|q) \ge \max\limits_{m_q\in M\setminus M_i} f^{\varepsilon|\eta}(x|q)$, $i \in \{I, II\}$.

При этом

$$(4) \quad PL(\pi^{*\delta|\varepsilon}) = \sup_{x\in X} \min( \max_{m_q\in M_I} f^{\varepsilon|\eta}(x|q), \max_{m_q\in M_{II}} f^{\varepsilon|\eta}(x|q)).$$

То есть, согласно правилу (4) определяется значение максимальной возможности, при котором мотивационное состояние относится к тому классу состояний $M_i$, среди которых имеется то, на котором достигается максимум возможности результата наблюдения $\varepsilon = x$: $\max\limits_{m_q\in M} f^{\varepsilon|\eta}(x|q) = \max\limits_{m_q\in M_i} f^{\varepsilon|\eta}(x|q)$.

**Список литературы**


[1] Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. – М.: Московский психолого-социальный институт, 2005. – 584 с.

[2] The ATM Target Concept, D3. SESSAR Executive Committee, № DLM-0612-001-02-00. 4th September 2007.

[3] Common trajectory prediction capability for decision support tools, Sip Swierstra, Eurocontrol HQ, Brussels, Belgium; Steven M. Green, National Aeronautics and Space Administration Ames Research Center, Moffett Field, CA. – (http://www.atmseminar.org/seminarContent/seminar5/papers/p_059_DS.pdf).

[4] EUROCONTROL – AMAN Guidelines 2010. Edition 0.1: 17 th Dec 2010. Proposed Issue.

[5] Lindsay K. et Al., Common Trajectory Modeling for National Airspace Decision Support Tools, MP 02W0000115, The MITRE Corporation, McLean, VA, 2003.

[6] Coppenbarger R.A., Kanning G., Salcido R. Real-Time data link of aircraft parameters to the Center-TRACON Automation System (CTAS), 4th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Santa Fe, USA, December 2001.

[7] Reynolds T., Hansman J., 2002, Conformance monitoring approaches in current and future air traffic control environments, 21st DASC Proceedings.

[8] Абрамова В.Н. Влияние характера мотивации на когнитивный и операционный компоненты деятельности // Вопросы психологии. - 1980. №2. с. 100-106.

[9] Батурин Н.А. Оценочная функция психики. М.: ИПРАН. 1997. - 306 с.

[10] Крыжановский Г.А., Купин В.В. Моделирование процессов принятия решений в активной системе обслуживания воздушного движения. // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. Под ред. М.Ю. Смурова /С.-Петербург: СПбГУГА, 2010. С. 53-61.

[11] Крыжановский Г.А., Купин В.В. К вопросу формализации предпочтений активных элементов в системе организации воздушного движения. // Научный вестник МГТУ ГА, № 171(9) – М.: МГТУ ГА, 2011. С. 114-120.

[12] Крыжановский Г.А., Купин В.В. Исследование взаимосвязи характеристик деятельности и уровня мотивации человека-оператора в системе управления воздушным движением / Г.А. Крыжановский, В.В. Купин // Материалы 7-й научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация управление». - СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. С.259-262.

[13] Федунов Б.Е. Проблемы разработки бортовых оперативно-советующих экспертных систем. // Изв. РАН. Теория и системы управления, № 5, 1996.

[14] Алёшин В.И. Методические рекомендации по организации управления потоками прилетающих и вылетающих воздушных судов в районе аэродрома. / В.И. Алёшин, Н.В. Бабаев, Г.А. Крыжановский, А.П. Плясовских. – М.: Воздушный транспорт, 1993. – 103 с.

[15] Базлев Д.А., Евдокименков В.Н., Красильщиков М.Н. Построение характеристических множеств для индивидуально-адаптированной поддержки лётчика при выполнении типовых полётных режимов. // Изв. РАН. Теория и системы управления, 2008. № 4, С. 97-108.

[16] Пытьев Ю.П. Возможность как альтернатива вероятности. Математические и эмпирические основы, применение. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 464 с.

# ПОДХОД К АНАЛИЗУ ТЕКСТА НА ОСНОВЕ ЛЕКСИЧЕСКИХ АГЕНТОВ

**Е.А. Сидорова**

Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН
630090, Новосибирск, ул. Лаврентьева, 6, Россия
lena@iis.nsk.su
тел: +7 (838) 330-79-91, факс: +7 (838) 333-83-59

***Ключевые слова:*** *анализ текста, извлечение фактов, лексические агенты*

**Abstract**

An approach to text analysis based on so-called lexical agents is considered. Lexical agents are formed from significant unites of semantic vocabulary which were found in text. Each lexical agent coincides with an object of some subject domain. The comparison with approach based on production rules, highs and lows of suggested approach are discussed.

## Введение

Развитие компьютерной лингвистики направлено на специализацию моделей и методов обработки текста, рассматриваемых в рамках отдельных предметных областей и жанрах документов. Тенденция перехода от универсальных методов анализа текста, основанных на поэтапном разборе предложений на морфологическом, синтаксическом, семантическом уровне, к предметно-ориентированным методам, учитывающих семантику на самых ранних стадиях анализа, связана с возникновением практического аспекта применения методов в реальных информационных системах.

Типичным в таких системах является использование набора продукционных правил к тексту, представленному в виде цепочки терминов-объектов. В процессе анализа строятся семантические гипотезы, которые проверяется контекстом (одновременно на синтаксическом и семантическом уровне). При этом объект (как сущность предметной области, описывающая интересующую пользователя информацию) возникает на самом раннем этапе на основе семантической информации, представленной в словаре. Такой подход имеет ряд недостатков: долгое время анализа, дублирование информации, получаемой в результате применения разных правил к одним данным, зависимость результата от порядка применения правил и, связанная с этим, дополнительная нагрузка на эксперта, который должен отслеживать такие ситуации.

Новая парадигма программирования на основе агентов и мультиагентных технологий [1] позволяет по-новому взглянуть на данную задачу. Процесс переход от текста к его семантическому представлению не будет связываться с поступательным движением "по уровням", как это предполагалось в моделях типа "Смысл-Текст", а будет осуществляться асинхронно, элементы текста будут "прорываться" к смыслу самостоятельно, обращаясь к своему окружению только в пределах необходимости и рекомбинируя для уточнения своих характеристик [2-4].

В данной статье рассматривается подход к анализу текста на основе так называемых лексических агентов – тех самых элементов текста, которые «прорываются» к смыслу, в сравнении с анализом на основе продукционных правил.

## 1 Анализ текста на основе схем фактов

Основные этапы семантически-ориентированного анализа текста включают: первичную и жанровую сегментацию текста, лексический (словарный) анализ и построение семантической сети объектов на основе механизма продукционных правил.

В результате словарной обработки текста выявляются все значимые и служебные термины (слово, устойчивое словосочетание или другая устойчивая или регулярная символьная конструкция) необходимые, по мнению эксперта, при дальнейшем семантическом анализе. Далее, на основе правил, оперирующих семантическими признаками терминов, формируются первые гипотезы о наличие в тексте информации об объектах предметной области (ПО). Созданные на данном этапе объекты требуют дальнейшего уточнения и идентификации (по сути, это процесс подтверждения или опровержения гипотез).

Для порождения и уточнения объектов используется декларативное описание так называемых *схем фактов*. Схемы фактов описываются экспертами в терминах семантических категорий ПО и автоматически реализуются механизмом продукционных правил.

Схема фактов – это тройка вида < *Arg*, $C_F$, *Res* >, где

*Arg* – множество аргументов факта (семантические признаки словаря, классы понятий и отношений онтологии ПО, вспомогательные классы фактов),

$C_F$ – множество грамматических, синтаксических, семантических и структурно-текстовых ограничений на сочетаемость аргументов,

*Res* = < $S_i$, *P* > – результат применения схемы факта, где $S_i$ – класс объекта, а *P* – множество правил для формирования или уточнения значений атрибутов объекта.

Продукционные правила, реализующие схемы фактов, включают следующие функциональные компоненты.

***Механизм поиска/перебора объектов.*** В зависимости от того, какие структурно-текстовые ограничения на взаиморасположение аргументов в тексте указаны в схеме, выбирается тот или иной алгоритм поиска и его параметры.

- Ограничение на тип сегмента, в рамках которого должны располагаться аргументы схемы (например, клауза, предложение, абзац, вводная часть и т.п.), задает *границы поиска*.
- Ограничение на позицию аргументов относительно друг друга (пре- или постпозиция, обязательная или приоритетная) определяет *направление поиска*.
- Тип контактности (какие типы символов/терминов/объектов могут располагаться между аргументами в тексте, а какие нет) задает дополнительные *точки остановки поиска*.
- Тип однородности аргументов определяет необходимость и способ предварительной *группировки объектов* в однородные группы. Обработка групп накладывает дополнительные особенности, связанные с возможностью возникновения необходимости разбиения групп. Например, если один из элементов группы первого аргумента не удовлетворяет каким-либо условиям согласования с элементов из группы второго аргумента возникает неоднозначность – какую группы разбивать; или омонимия, позволяющая отнести один и тот же лексический объект как к группе первого, так и к группе второго аргументов.

***Проверка ограничений на характеристики объектов***. Выделяются индивидуальные ограничения (например, arg1.Падеж=рд[1]) и ограничения на согласованность характеристик аргументов схемы (arg1.Род = arg2.Род). Проверка морфологических характеристик объектов, а также их синтаксической сочетаемости требует определения вершины синтаксической группы, реализующей объект. Проверка синтаксической согласованности или управления может потребовать использования дополнительного ресурса – словаря моделей управления [3,4].

***Формирование результирующих объектов***. Создание и редактирование объектов в соответствии со схемой фактов осуществляется одновременно для всех наборов найденных подходящих друг другу объектов. Таким образом, в процессе последовательного применения всех правил создается результирующая сеть объектов (объекты могут быть связаны с помощью объектов – экземпляров отношений). При этом пользователь должен учитывать возможность

[1] В случае атрибутов, представленных множеством значений, операция сравнения осуществляет проверку на совпадение множеств значений для семантических признаков, а для морфологических признаков – проверку на непустоту пересечения множеств значений (учитывая, таким образом, морфологическую омонимию).

ситуации, когда возникновение или изменение объектов могло бы привести к удачному срабатыванию правила, ранее отработавшего.

Объекты на заключительном этапе проходят этап отождествления и идентификации с объектами из БД информационной системы.

Включение в систему агентов и развитие в её рамках агентной технологии [6] открывает новые возможности для повышения изобразительной мощности и эффективности создаваемых моделей.

## 2 Анализ текста на основе агентной модели

Теперь рассмотрим процесс анализа текста и возникающие новые возможности с точки зрения агентных технологий. С одной стороны, создаваемые на основе словаря объекты «нуждаются» в заполнении своих атрибутов значениями, в особенности ключевых, которые им необходимы, чтобы пройти стадию идентификации. С другой стороны правила оперируют пассивными объектами, которые на самом деле имеют достаточно информации, чтобы проявить активность. Таким образом, лексические объекты, порождаемые на основе словарной информации, можно представить как лексические агенты, цель которых – исследовать контекст, представленный терминами и другими агентами, заполнить свои атрибуты и выявить возможные связи с другими агентами.

Процесс анализа в этом случае будет выглядеть следующим образом.

1. Когда в тексте встретился словарный термин (слово, устойчивое словосочетание или другая устойчивая или регулярная символьная конструкция) с определенными семантическими признаками формируется объект заданного класса. В зависимости от того является ли термин классификатором сущности или является наименованием формируются либо «пустой» экземпляр класса $t(S_i) \rightarrow A_{Si}()$, либо экземпляр с минимальным набором заполненных атрибутов, отражающих наименование объекта, например: $t(S_i) \rightarrow A_{Si}$ ( $a_j$: t(name) ). С этой целью выделяется специальный тип схем фактов, оперирующих только словарными категориями и признаками.

2. Любой лексический объект, выступая уже как агент, на основе своего класса и набора атрибутов может определить, какие схемы ему нужны для заполнения еще неопределенных атрибутов и формирования связей с другими объектами.

Для этого заранее (до начала обработки текста), формируется таблица, связывающая атрибут $a_j$ определенного класса $S_i$, с множеством схем фактов, в результате применения которых данный атрибут может быть определен:

$<S_i, a_j> \rightarrow \{ F_1, \ldots, F_k \}$.

Аналогично, формируются зависимости для отношений:

$<S_i, R_j> \rightarrow \{ F_1, \ldots, F_k \}$,

где $R_j$ – это отношение, одним из аргументов которого является класс $S_i$.

Отметим, что экземпляр отношения также может являться лексическим объектом, которому требуется не только найти свои аргументы (объекты, связываемые данным отношением), но и заполнить собственный набор атрибутов:

$<R_i, a_j> \rightarrow \{ F_1, \ldots, F_k \}$,

$<R_i, S_j> \rightarrow \{ F_1, \ldots, F_k \}$.

Возможны и более сложные зависимости, когда для заполнения атрибута требуется применение цепочки схем фактов, создающих промежуточные служебные объекты.

В результате, каждый лексический агент формирует очередь схем, которые необходимо запустить на исполнение или активировать.

3. Поскольку для активирования схемы «желания» одного агента недостаточно – требуются претенденты на все указанные аргументы схемы, то для каждой схемы формируется свой агент (агент схемы), который «ожидает» когда для всех нетерминологических аргументов

сформируются списки лексических агентов, являющихся претендентами на роль аргумента схемы по совокупности семантических признаков и ограничений:

$F_i$:argj $\rightarrow\{ A_{S1}, \ldots, A_{Sk} \}$.

Лексический агент заносится в такой список либо в момент создания, либо при изменении на основе таблицы (аналогично таблице из п.2), связывающей онтологические признаки с аргументами факта:

$S_i$ (P) $\rightarrow\{$ F1:$arg_{j1}$ ,…, Fk:$arg_{jk}$ $\}$.

где P задает параметры сопоставления онтологического признака с семантическими характеристиками лексического агента (например, может ли класс агента являться наследником или иметь точное совпадение).

Таким образом, каждый лексический агент не только активирует необходимые ему схемы, но и может активировать схемы «чужих» агентов, если он соответствует параметрам какого-либо аргумента данной схемы.

4. Процедура проверки ограничений схемы и формирование результата организуется аналогичным образом, как это делается и при продукционном подходе. Особенностью является то, что поиск или перебор объектов по цепочке в соответствии с текстовой структурой осуществляется только для аргументов, требующих словарные объекты (а в будущем, возможно, удастся обойтись и без него). Для лексических агентов, такой перебор преобразуется в проверку соответствующих структурных ограничений у тех объектов, которые фигурируют в качестве претендентов на значения аргументов. Например,

- поиск в рамках границ определенного сегмента преобразуется в проверку наличия общего сегмента для пары претендентов;
- поиск в определенном направлении на основе ограничения на пре- или постпозицию аргументов преобразуется в проверку расположения в тексте пары претендентов друг относительно друга;
- поиск однородных объектов по тексту преобразуется в поиск однородных объектов в списке претендентов и т.п.

Порядок выполнения схем фактов в данном подходе не задается пользователем, а управляется агентами по мере заполнения атрибутов. Схемы, создающие первичных агентов, определяются автоматически, на основании того, что все аргументы таких схем должны быть представлены словарными категориями и/или признаками.

Выделяются также схемы, которые не должны применяться максимально долго, по причине того, что для них требуется накопить побольше информации о других объектах. Это схемы, либо связанные с выбором одного наилучшего объекта из имеющихся (например, объекта определенного класса, ближайшего к началу текста), либо схемы применяемый однократно.

Процесс анализа заканчивается, когда не остается ни одного активного агента схемы. Результатом является сеть объектов-агентов, все ключевые атрибуты которых заполнены или могут быть восстановлены в процессе сопоставления с БД системы.

## 3 Взаимодействие агентов

Хорошая система на основе агентов должна обеспечивать разнообразие взаимодействий между агентами и их децентрализованное управление. В предлагаемом подходе можно выделить следующие виды взаимодействий.

Взаимодействие между лексическими агентами:

- проверка согласованности характеристик в соответствии с определенной схемой;
- объединение (слияние) агентов, например, классификатора и лексического объекта, или установление анафорической связи (вместо объединения, если объекты далеко разнесены по тексту).

Взаимодействие лексического агента и агента схемы:

- активация агента схемы лексическим агентом при его создании;
- деактивация агента схемы лексическим агентом при его изменении (схема становится ненужной);
- изменение агентом схемы лексического агента (как результат применения схемы), в том числе и деактивация.

Взаимодействие между агентами схем:

- активация/деактивация агента схемы агентом другой схемы, как результат создания или изменения объекта, который может выступать в качестве аргумента схемы;
- ожидание активным агентом схемы, когда деактивируется агент другой схемы.

Ни один их рассмотренных агентов не может считаться полнофункциональным агентом мультиагентной системы, однако если рассмотреть виртуальный агент, состоящий из пары <лексический агент, агент схемы>, постоянно образующейся в процессе взаимодействия агентов, то он обладает всеми необходимыми характеристиками [1]:

1) Цель агента – заполнение собственных атрибутов и выявление связей с другими агентами.
2) Модель мира агента – онтология, описывающая возможные классы и отношения ПО, а также знания о том, как предметная информация выражается на естественном языке, зафиксированные в виде схем фактов.
3) Знания о мире агента – текст, точнее его текущее представление в терминах лексических объектов.
4) Действия агента – активизация необходимых агенту продукций, фиксирующих условия и результат применения правила.
5) Взаимодействие агентов осуществляется по протоколу, зафиксированному в схеме фактов

## 4 Пример

Рассмотрим, как может работать предложенный механизм для извлечения информации о персонах и места их работы (Рис.1).

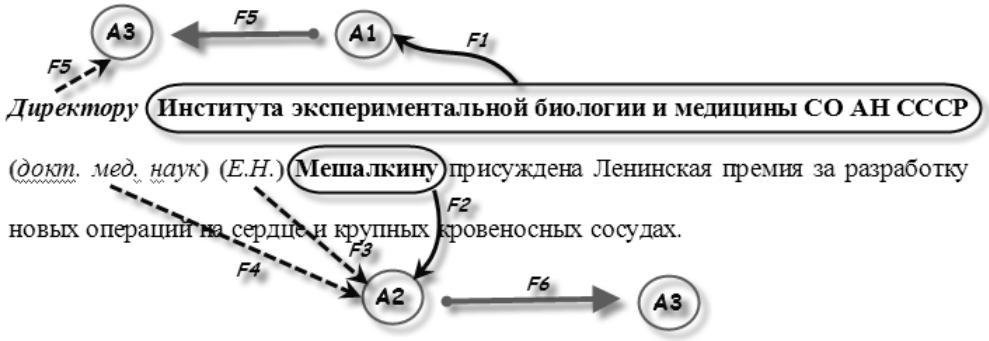



Рисунок 1 – Пример анализа текста с помощью лексических агентов

На начальном этапе для создания первых лексических агентов – гипотез об упоминании объектов предметной области, используются схемы *F1* и *F2*, оперирующие только словарными категориями:

*F1*: t:Термин(*фам*) → *A1*: *Персона* ( фамилия: t.name )

*F2*: t:Термин(*институт*) → *A2*: *Институт* (название: t.name )

Далее, каждый созданный агент пытается заполнить свои атрибуты и связи. В данном случае, агент *A1* может заполнить атрибуты *инициалы* и *звание* с помощью схем *F3* и *F4*.

*F3*: p: *Персона*(), t: Термин(*инициалы*) [Contact(p,t)] → p( инициалы: t.name )

*F4*: p: *Персона*(), t: Термин(*звание*) [Contact (p,t), Left(p,t)] → p( звание: t.name )

Агенты схем *F3* и *F4* активизируются в момент создания объекта класса Персона и, поскольку других не словарных аргументов у них нет, то сразу осуществляется попытка применить соответствующее правило. Отметим, что если агент схемы *F4* был активирован до того, как отработал агент *F3*, то он не сможет примениться, т.к. не будет выполнено условие контактности между аргументами. В этом случае он будет активирован заново, после того, как в результате *F3* границы объекта *A1* будут изменены.

Признаком того, что в данном предложении присутствует связь *Персоны* с *Организацией*, является упоминание должности, которое должно быть грамматически согласовано.

*F5*: t:Термин(*должность*), org:*Организация*() [Contact (org,t), Left(org,t), Согл(t,org)]

→ *A3*: *Отношение::Работает_в* ( arg2: org, должность: t.name )

Последним этапом является поиск лексическим агентом отношения *Работает_в A3* своего аргумента класса *Пресона*.

*F6*: r: *Работает_в* (), p: *Персона*() [Contact (org,p), Согл(r,p)] → r( arg1: p )

Согласование в данной схеме осуществляется с вершиной синтаксической группы, выражающей отношение *Работает_в*, которой, в соответствии с *F5*, является должность.

Результатом обработки будет семантическая сеть из двух объектов, связанных отношением *Работает_в*.

## 5 Преимущества и недостатки агентной модели

Предложенный подход имеет все преимущества использования агентов для представления и обработки знаний [5].

- Повышение уровня представления знаний. Становится возможным естественно и наглядно описывать схемы преобразования ЕЯ-выражений в объекты ПО, не задумываясь о порядке их применения. С агентами можно работать как с обычными объектами семантической сети, это даёт дополнительную гибкость для моделирования и организации поиска.
- Инкапсуляция алгоритмов. Процедурный компонент модели распадается на независимые части, которые хранятся внутри агентов схем, причём, каждый агент сам “знает”, когда и при каких обстоятельствах он должен совершить те действия, которые в него заложены экспертом. Данное свойство упрощает написание программы, поскольку разбивает ее на части, которые уже не нужно связывать между собой. Тем самым, инженеру знаний нет необходимости держать всю модель и алгоритм сборки фактов “в голове”.

К преимуществам, специализированным для обработки текста, можно отнести:

- Приближение процесса работы программы анализа к человеческому пониманию текста. Человек непосредственно при первом прочтении анализирует контекст, уточняет и согласовывает близко расположенную информацию.
- Применение агентной технологии при анализе текста позволяет не извлекать ненужную информацию. В каждый конкретный момент времени осуществляется поиск только необходимой для какого-либо агента информации, моделирующей действительность. Это свойство также позволяет избежать дублирования информации, которое возникает вследствие того, что при классическом линейном применении правил одна и та же информация может быть получена различными путями.

Недостатки подхода также связаны со спецификой решаемой задачи.

- Остается актуальной проблема автоматического слияния объектов, возникающей вследствие первоначального максимально полного покрытия агентами словарных объектов (например, термин-классификатор, предваряющий вхождение объекта в случае неконтактного расположения, или наличие нескольких ключевых атрибутов у понятия ПО, как правило, языковое выражение каждого из таких атрибутов порождает агента). В таких случаях агенты должны самостоятельно решать являются ли они выражением одного и того же объекта или нет.

- Трудно учитывать особенности извлечения информации, связанные с необходимостью просмотра максимально полной совокупности объектов с определенными свойствами (например, приоритетность направления поиска или выбор наилучшего), т.к. нет никакой гарантии, что при параллельной обработке к моменту активации требуемой схемы извлечены все возможные объекты. В случае продукционных правил такой ситуации не возникает из-за фиксированного порядка применения схем.

**Заключение**

Предложенный в работе подход оперирует агентами двух типов. Лексический агент сопоставляется информационному объекту, возникающему в процессе анализа текста как гипотеза, которую необходимо подтвердить или опровергнуть. Агент схемы обеспечивает функциональную составляющую по восприятию и изменению среды.

Подход ориентирован, прежде всего, на сугубо практические цели, связанные с улучшением быстродействия и качества анализа текста, а также повышение уровня описания знаний экспертом. Однако, можно надеяться, что предложенная модель станет важным шагом к созданию реальной мультиагентной системы семантической обработки текста, востребованность которой достаточно очевидна [8].

Ближайшее развитие концепции видится в рассмотрении нетривиальных ситуаций, связанных с обработкой текста на естественном языке, такие как разрешение анафоры, снятие неоднозначностей, корректное выделение однородных групп и т.п.

**Благодарности**

Работа выполняется при финансовой поддержке Президиума РАН (интеграционный проект СО РАН № 15/10 «Математические и методологические аспекты интеллектуальных информационных систем»).

**Список литературы**

[1] Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильяме", 2006.

[2] Нариньяни А.С. ТЕОН-2: от Тезауруса к Онтологии и обратно // Труды международного семинара Диалог’2002 по компьютерной лингвистике и ее приложениям. – М.: Наука, 2002. –Т.1. –С.199–154.

[3] Андреев В.В., Ивкушкин К.В., Карягин Д.В., Минаков И.А., Ржевский Г.А., Скобелев П.О., Томин М.С. Разработка мультиагентной системы понимания текста // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. III Междунар. конф. Самара, 4-9 сентября 2001. – Самара: СНЦ РАН, 2001. С. 489 - 495.

[4] Вольман С.И., Минаков И.А., Томин М.С. Мультиагентная система интеллектуального анализа содержимого Интернет-страниц // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. VII Междунар. конф., Самара, 27 июня – 1 июля 2005. – Самара: СНЦ РАН, 2005. С.403-408.

[5] Яковчук Е.И., Сидорова Е.А. Обобщенные семантико-синтаксические модели в задачах обработки текста // Труды рабочего семинара «Наукоемкое программное обеспечение НПО-2011». Ершовская конференция по информатике. – Новосибирск: ИСИ СО РАН, 2011. – С.287-292.

[6] Волкова И.А., Головин И.Г., Кривнова О.Ф. Компьютерный словарь моделей управления русских глаголов (экспериментальный вариант) // Труды Международного семинара по компьютерной лингвистике и ее приложениям "Диалог'98". – М., 1998.

[7] Загорулько Ю.А., Костов Ю.В., Попов И.Г., Сергеев И.П. Общая концепция агентов в системе моделирования SEMP-A // Труды международной научно-практической конференции KDS-2001 «Знание-Диалог-Решение». – Санкт-Петербург,2001. –Т.1. –С.259-267.

[8] Нариньяни А.С. ИИ и Мультиагентные технологи // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды VIII международной конференции. – Самара: Самарский НЦ РАН, 2006. - С. 491-497.

# НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ С НЕАДДИТИВНОЙ ФУНКЦИЕЙ АГРЕГИРОВАНИЯ ЗАТРАТ

**А.Н. Сесекин[12], А.А. Ченцов[1], А.Г. Ченцов[1]**

[1]Институт математики и механики УрО РАН
620990, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 16, Россия
chentsov@imm.uran.ru
тел: +7 (343) 375-34-57, факс: +7 (343) 375-33-64

[2]Уральский федеральный университет
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
a.n.sesekin@ustu.ru
тел: +7 (343) 375-41-40

***Ключевые слова:*** *маршрутизация, метод динамического программирования, условия предшествования*

**Abstract**
This article devote to the problem of routing of the displacement under precedence conditions. The method of solution is based on dynamic programming procedure. Aggregation function is non-additive cost function.

## Введение

Задачи маршрутизации перемещений находят широкое применение в инженерных приложениях; в идейном отношении они восходят к известной труднорешаемой (NP – полной) задаче коммивояжера (ЗК); см. [1-5]. В традиционной постановке ЗК используется аддитивный вариант агрегирования стоимостей элементарных перемещений. Известны также варианты постановки ЗК, приводящие к задаче «на узкие места» [6]. Возможны также и другие варианты агрегирования затрат (см. [7,8]). В настоящей работе рассмотрим конструкцию решения на основе динамического программирования в случае задачи «на узкие места» с особенностью в виде явной зависимости функции стоимости элементарных перемещений от списка (невыполненных на текущий момент) заданий. Другой вариант маршрутной задачи «на узкие места» рассматривался в [9], где упомянутая особенность отсутствует.

## 1 Постановка задачи

Фиксируем непустое множество $X$, точку $x^0 \in X$, число $N \in \mathbf{N} := \{1;2;\ldots\}$ (здесь и ниже $:=$ – равенство по определению) и кортеж $(M_i)_{i\in\overline{1,N}} : \overline{1,N} \to Fin(X)$, где $Fin(X)$ – семейство всех непустых конечных подмножеств (п/м) $X$. Полагаем, что:

1) $x^0 \notin M_j \quad \forall j \in \overline{1,N}$;

2) $M_p \bigcap M_q = \varnothing \quad \forall p \in \overline{1,N} \quad \forall q \in \overline{1,N} \setminus \{p\}$.

Рассматриваем задачу о построении перемещений $(x_0 = x^0) \to (x_1 \in M_{\alpha(1)}) \to \ldots \to (x_N \in M_{\alpha(N)})$, где $\alpha$ – перестановка в $\overline{1,N} := \{i \in \mathbf{N} \mid i \le N\}$, выбор которой стеснен условиями предшествования [1]. В дальнейшем $\mathbf{N}_0 := \mathbf{N} \cup \{0\}$, фиксированы $n \in \mathbf{N}$ и два кортежа $(p_i)_{i\in\overline{1,n}} : \overline{1,n} \to \overline{1,N}$, $(q_i)_{i\in\overline{1,n}} : \overline{1,n} \to \overline{1,N}$; упорядоченные пары

(УП) $(p_1,q_1),\ldots,(p_n,q_n)$, именуем адресными; их первые элементы рассматриваем в качестве отправителей, а вторые – в качестве получателей (груза, сообщения, …). Предполагается что каждый получатель должен посещаться после соответствующего отправителя. Тогда [8-12] множество всех допустимых по предшествованию маршрутов есть

$$\mathbf{A} := \{\alpha \in \mathbf{P} \mid \alpha^{-1}(p_j) < \alpha^{-1}(q_j) \quad \forall j \in \overline{1,n}\},$$

где $\mathbf{P}$ – множество всех перестановок $\overline{1,N}$, а $\alpha^{-1}$ есть, при $\alpha \in \mathbf{P}$, перестановка (из $\mathbf{P}$), обратная к $\alpha$. Мы рассматриваем далее следующие процедуры перемещений

(1) $(x_0 = x^0) \to (x_1 \in M_{\alpha(1)}) \to \ldots \to (x_N \in M_{\alpha(N)})$.

Допускается, что в (1) возможен выбор любого кортежа $(\alpha, x_1,\ldots,x_N)$, где $\alpha \in \mathbf{A}, x_1 \in M_{\alpha(1)},\ldots,x_N \in M_{\alpha(N)}$. Через $\mathcal{K}$ обозначим семейство всех непустых п/м $\overline{1,n}$. Всюду в дальнейшем постулируем, что

$$\forall K \in \mathcal{K} \quad \exists i \in K : p_i \neq q_j \quad \forall j \in K .$$

Поэтому [10, часть 2] $\mathbf{A} \neq \varnothing$. Кроме того, в связи с (1) введем при $\alpha \in \mathbf{A}$ множество $\mathcal{X}[\alpha]$ всех кортежей

$$(x_i)_{i \in \overline{0,N}} : \overline{0,N} \to X ,$$

для каждого из которых $x_0 = x^0$ и $x_j \in M_{\alpha(j)} \quad \forall j \in \overline{1,N}$. Такие кортежи именуем трассами, согласованными с маршрутом $\alpha \in \mathbf{A}$; $\mathcal{X}[\alpha]$ есть непустое конечное множество. Для оценки перемещений в (1) введем функцию стоимости

(2) $\mathbf{c} : X \times X \times \mathcal{N} \to [0,\infty[$,

где $\mathcal{N}$ – семейство всех непустых п/м $\overline{1,N}$; обсуждение конструкций на основе (2) см. в [11, с.154,155]. Если $\alpha \in \mathbf{A}$ и $(x_i)_{i \in \overline{0,N}} \in \mathcal{X}[\alpha]$, то [11,(2.10)]

$$\mathbf{C}_\alpha\left((x_i)_{i \in \overline{0,N}}\right) := \max_{1 \le i \le N} \mathbf{c}\left(x_{i-1}, x_i, \{\alpha(j) : j \in \overline{i,N}\}\right) \in [0,\infty[ .$$

В дальнейшем рассматривается задача

(3) $\mathbf{C}_\alpha\left((x_i)_{i \in \overline{0,N}}\right) \to \min, \quad \alpha \in \mathbf{A}, \quad (x_i)_{i \in \overline{0,N}} \in \mathcal{X}[\alpha]$.

Задаче (3) отвечает значение (глобальный экстремум)

$$V := \min_{\alpha \in \mathbf{A}} \min_{(x_i)_{i \in \overline{0,N}} \in \mathcal{X}[\alpha]} \mathbf{C}_\alpha\left((x_i)_{i \in \overline{0,N}}\right) \in [0,\infty[$$

и непустое множество (оптимальных) решений

$$\left(\alpha^0, (x_i^0)_{i \in \overline{0,N}}\right), \quad \alpha^0 \in \mathbf{A}, \quad (x_i^0)_{i \in \overline{0,N}} \in \mathcal{X}[\alpha^0], \quad \mathbf{C}_{\alpha^0}\left((x_i^0)_{i \in \overline{0,N}}\right) = V .$$

## 2 Расширения основной задачи; уравнение Беллмана

Следуем подходу [10, часть 2]: вводим преобразование системы ограничений на основе оператора $\mathbf{I}$, подобного [10, (2.2.24)]. Полагаем, что

$$\Sigma[K] := \left\{i \in \overline{1,n} \mid (p_i \in K) \,\&\, (q_i \in K)\right\} \quad \forall K \in \mathcal{N} .$$

Тогда $\mathbf{I} : \mathcal{N} \to \mathcal{N}$ имеет вид: $\mathbf{I}(K) := K \setminus \left\{q_j : j \in \Sigma[K]\right\} \quad \forall K \in \mathcal{N}$. Если $K \in \mathcal{N}$, то рассматриваем (непустое) множество $(\mathbf{I} - bi)[K]$ [12,с.132] (всех частичных допустимых по вычеркиванию маршрутов, используемых для нумерации заданий из множества $K, K \subset \overline{1,N}$);

элементы $\mathbf{(I}-bi\mathbf{)[}K\mathbf{]}$ являются, конечно, биекциями «промежутка» $\overline{1,|K|} = \{i \in \mathbf{N} \mid i \le |K|\}$, где $|K|$ – мощность множества $K$; см. [12,(3.2)]. Наконец при $K \in \mathcal{N}$, $x \in K$ и $\alpha \in \mathbf{(I}-bi\mathbf{)[}K\mathbf{]}$ определяем $\mathcal{X}\mathbf{[}x;K;\alpha\mathbf{]}$ согласно [12,с.156] (см. в этой связи пояснение [12,(3.7)]), получая непустое конечное множество кортежей $(x_i)_{i\in\overline{0,|K|}} : \overline{0,|K|} \to X$. С учетом этих построений полагаем, что (см. [11,(3.9)])

$$\mathbf{C}^0_\alpha[K]\left((x_i)_{i\in\overline{0,|K|}}\right) := \max_{1\le i\le|K|} \mathbf{c}\left(x_{i-1}, x_i, \{\alpha(j) : j \in \overline{i,|K|}\}\right)$$

$\forall K \in \mathcal{N} \quad \forall \alpha \in \mathbf{A} \quad \forall (x_i)_{i\in\overline{0,|K|}} \in \mathcal{X}\mathbf{[}x;K;\alpha\mathbf{]}$.

Расширением задачи (3) назовем систему задач

(4) $\quad \mathbf{C}^0_\alpha[K]\left((x_i)_{i\in\overline{0,|K|}}\right) \to \mathbf{min}$, $\alpha \in \mathbf{(I}-bi\mathbf{)[}K\mathbf{]}$, $(x_i)_{i\in\overline{0,|K|}} \in \mathcal{X}\mathbf{[}x;K;\alpha\mathbf{]}$,

где $x \in X$ и $K \in \mathcal{N}$. В этой связи отметим, что каждая задача (4) характеризуется (конечным) значением $v(x,K)$ и непустым множеством решений;

$$v(x,K) := \min_{\alpha\in\mathbf{(I}-bi\mathbf{)[}K\mathbf{]}} \min_{(x_i)_{i\in\overline{0,m}}\in\mathcal{X}[x;K;\alpha]} \mathbf{C}^0_\alpha[K]\left((x_i)_{i\in\overline{0,m}}\right) \in [0,\infty[\,,$$

где $x \in X$, $K \in \mathcal{N}$ и $m = |K|$. При этом [11,(3.14)]

(5) $\quad V = v(x^0, \overline{1,N})$.

(свойство (5) характеризует семейство задач (4) как расширение основной задачи (3); подробнее см. в [11,с.157]). Полагаем, кроме того, что $v(x,\varnothing) := 0 \quad \forall x \in X$. Уравнение Беллмана определяется в следующем предложении.

***Предложение 1*** [11,с.157].

При $x \in X$ и $K \in \mathcal{N}$ имеет место равенство

(6) $\quad v(x,K) = \min_{j\in\mathbf{I}(K)} \min_{y\in M_j} \sup\left(\{\mathbf{c}(x,y,K); v(y, K\setminus\{j\})\}\right)$.

Дальнейшее использование (6) для построения оптимального решения соответствует [11,разделы 4,5]; при этом используется экономичный вариант метода динамического программирования (МДП), предложенный в [10,раздел 4.9]. В связи с построением оптимального решения в виде пары маршрут – трасса заметим [11,с.166], что в его основе находятся задачи

(7) $\quad \sup\left(\left\{\mathbf{c}(x,y,\overline{1,N}\setminus K); v(y,(\overline{1,N}\setminus K)\setminus\{j\})\right\}\right) \to \mathbf{min}$, $j \in \mathbf{I}(\overline{1,N}\setminus K)$, $y \in M_j$

(см. также [11,(4.6)]), в которых $x \in X$, а $K \in \mathcal{N} \cup \{\varnothing\}$ определяет множество уже выполненных заданий, причем $K \ne \overline{1,N}$. Основная сложность связана с построением (на основе (6)) достаточного массива значений функции $v$ (функция Беллмана). В этой связи на основе логики (7) можно предложить следующую эвристическую процедуру решения.

Пусть каким-то образом каждой позиции $(\tilde{x},\mathbf{K})$, где $\tilde{x} \in X$, $\mathbf{K} \in \mathcal{N}$ и $\tilde{x} \in \mathbf{K}$ (на самом деле, достаточно работать с позициями из слоев $D_0, D_1, \ldots, D_N$ [11,раздел 4]) сопоставлена некоторая характеристика $\mathcal{V}(\tilde{x},\mathbf{K}) \in [0,\infty[$ перспективных затрат при обслуживании мегаполисов с индексами из $\mathbf{K}$ из начального состояния $\tilde{x}$. Тогда (7) можно заменить задачей

(8) $\quad \sup\left(\left\{\mathbf{c}(x,y,\overline{1,N}\setminus K); \mathcal{V}(y,(\overline{1,N}\setminus K)\setminus\{j\})\right\}\right) \to \mathbf{min}$, $j \in \mathbf{I}(\overline{1,N}\setminus K)$, $y \in M_j$

при тех же предположениях, что и в (7). Так, в частности, (8) можно использовать для первого хода в случае, когда $K = \varnothing$ и $x = x^0$; результатом решения будет пара $(x_1, \mathbf{j}_1)$, где $\mathbf{j}_1 \in \mathbf{I}(\overline{1, N})$ и $x_1 \in M_{\mathbf{j}_1}$. Затем используется (8) при $K = \{\mathbf{j}_1\}$ и $x = x_1$. Далее процедура повторяется.

**Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 10-01-96020 и 10-08-00484).

**Список литературы**

[1] Меламед И.И., Сергеев С.И., Сигал И.Х. Задача коммивояжера. Вопросы теории // Автоматика и телемеханика. 1989. № 9. С. 3-34.
[2] Меламед И.И., Сергеев С.И., Сигал И.Х. Задача коммивояжера. Точные алгоритмы // Автоматика и телемеханика. 1989. № 10. С. 3-29.
[3] Меламед И.И., Сергеев С.И., Сигал И.Х. Задача коммивояжера. Приближенные алгоритмы // Автоматика и телемеханика. 1989. № 11. С. 3-26.
[4] Беллман Р. Применение динамического программирования к задаче коммивояжера // Кибернетический сборник. М.: Мир, 1964. Т.9. С. 219-228.
[5] Хелд М., Карп Р.М. Применение динамического программирования к задачам упорядочения // Кибернетический сборник. М.: Мир, 1964. Т.9. С. 202-218.
[6] Сергеев С.И. Алгоритмы решения минимаксной задачи коммивояжера // Автоматика и телемеханика. 1995. № 7. С. 144-156.
[7] Маркелова Е.Ю., Рольщиков В.Е., Ченцов А.Г. Задача маршрутизации конечного числа переходов системы с абстрактной функцией агрегирования затрат / Челяб. Гос. Ун-т. Деп. В ВИНИТИ 25.05.98, № 1577-В98.
[8] Сесекин А.Н., Ченцов А.А., Ченцов А.Г. Маршрутизация с абстрактной функцией агрегирования стоимостей перемещений // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. 2010. Т.16. № 3. С. 240-264.
[9] Ченцов А.Г., Салий Я.В. Об одной задаче на узкие места // Сборник трудов Всероссийской конференции «Статистика. Моделирование. Оптимизация. Челябинск. Издательский центр ЮУрГУ. 2011. С. 85-93.
[10] Ченцов А.Г. Экстремальные задачи маршрутизации и распределения заданий: вопросы теории. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский институт компьютерных исследований. 2008. 240 с.
[11] Сесекин А.Н., Ченцов А.А., Ченцов А.Г. Об одной задаче маршрутизации на «узкие места» // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. 2010. Т.16. № 1. С. 152-170.
[12] Ченцов А.А., Ченцов А.Г. Экстремальные задачи маршрутизации на «узкие места» с ограничениями в виде условий предшествования // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. 2008. Т.14. № 2. С. 129-142.

# О МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В АКТИВНЫХ СЕТЕВЫХ СТРУКТУРАХ

**Д.Н. Федянин**

Институт проблем управления РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65, Россия
dfedyanin@inbox.ru
тел: +7 495 334-89-10, факс: +7 495 334-93-40

***Ключевые слова:*** *социальная сеть, информационное управление, стратегическая рефлексия, неполная информированность*

**Abstract**
This paper proposes a new tool for modeling situations difficult strategic reflection agents - reflective network. Reflective network allows taking into account not only the rank of reflection agent, but his awareness of those or other political opponents. This allows, in particular, simulating the decisions of the active network structures.

## Введение

Задачи принятия решений в ситуации, когда выигрыш принимающего решение субъекта (агента) зависит не только от его действия, но и от действий других агентов, является традиционным предметом рассмотрения в моделях теории игр и теории коллективного поведения [1, 2, 5, 7, 8, 12, 15 - 17] Одним из ключевых факторов в данном случае является взаимная информированность агентов об интересах, возможных действиях, принципах принятия решений, информированности [10, 12].

Процесс формирования агентом представлений о принципах принятия решений оппонентами называется стратегической рефлексией. Рефлексию принято разделять на информационную и стратегическую [12]. Информационная рефлексия – процесс и результат размышлений агента о том, каковы значения неопределенных параметров, что об этих значениях знают и думают его оппоненты (другие агенты). При этом собственно «игровая» может отсутствовать, т.е. агент может и не принимать решений. Иными словами, информационная рефлексия относится к информированности агента о природной реальности (какова игра), и о рефлексивной реальности (какой видят игру другие). Стратегическая рефлексия – процесс и результат размышлений агента о том, какие принципы принятия решений используют его оппоненты (другие агенты) в рамках той информированности, которую он им приписывает в результате информационной рефлексии. Таким образом, информационная рефлексия имеет место только в условиях неполной информированности, и ее результат используется при принятии решений (в том числе – при стратегической рефлексии). Стратегическая рефлексия имеет место даже в случае полной информированности, предваряя принятие игроком решения о выборе действия (стратегии). Другими словами, информационная и стратегическая рефлексии могут изучаться независимо, однако в условиях неполной информированности обе они имеют место.

Агент, обладающий ограниченной стратегической рефлексией, может не только не знать целевых функций оппонентов, но, даже зная их, находиться в заблуждении об их принципах принятия решения: умеют ли агенты вычислять равновесие Нэша в игре, какое из существующих в игре равновесий Нэша они выберут, будут ли они искать равновесия в чистых или смешанных стратегиях, как устраняют неопределенность при отсутствии информации о каком-либо из параметров природы и т.д. [14]. Агент может также обладать одновременно и ограниченной информационной, и ограниченной стратегической рефлексией.

Для моделирования различных типов рациональности агентов часто используется понятие ранга рефлексии, в соответствии с которым осуществляется разбиение множества агентов в соответствии с их типами рациональности – рангами (рефлексивное разбиение) [8,9]. В данной работе рассматриваются специальный вид структуры рефлексии игроков – рефлексивная сеть, – которая включает в себя элементы как информационной, так и стратегической рефлексии. В докладе предлагается новый инструмент моделирования ситуации сложной стратегической рефлексии агентов – рефлексивная сеть. Рефлексивная сеть позволяет учитывать не только ранг рефлексии агента, но и его информированность о тех или иных оппонентах. Это позволяет, в частности, моделировать принятие решений в активных сетевых структурах.

Интерес для изучения представляет анализ влияния рефлексивной сети и правил принятия решения игроков на свойства равновесия. Основным направлением исследований являться построение рефлексивной сети с учетом заданных множеств стратегий игроков, их целевых функций и правил принятия решения. Целью такого построения является, например, достижение равновесия в заданной точке, благоприятной для управляющего органа (центра).

Возможность управления структурой рефлексивной сети в докладе показана на примере теоретико-игровой модели, подробно рассмотренной в [15]. Было доказано несколько утверждений при допущениях, что множество допустимых правил принятия решения обладает следующими свойствами: игроки, которые точно знают атрибуты друг друга, выбирают действия в соответствием с рассчитанным ими равновесием Нэша в чистых стратегиях. Действия агентов, атрибуты которых им неизвестны, они предсказывают, основываясь на критерии принятия решения Гурвица с параметром оптимистичности равным либо нулю, либо единице. Также было построено оптимальное управление рефлексивной сетью для случаев различного распределения параметра оптимистичности среди игроков.

## 1 Обозначения и определения

В работе предполагается, что взаимодействие любого количества агентов можно моделировать некоторой игрой в теоретико-игровом смысле. Пусть взаимодействие агентов представлено в виде такой игры в нормальной форме $\Gamma=<\{X_i\},\ \{F_i\}>$, где $X_i$ – множество допустимых действий $i$-го игрока, а $F_i$ – его целевая функция. Назовем множества $X_i$ и $F_i$ – атрибутами $i$-го игрока.

В этой игре не учтена структура стратегической рефлексии. Чтобы учесть влияние стратегической рефлексии расширим множество атрибутов каждого игрока, добавлены правило принятия им решения в условиях неопределенности $D_i$ и множество игроков, чей набор атрибутов ему точно известен $S_i$. Таким образом, множество атрибутов $A_i$ $i$-го игр можно записать в виде

$$A_i = \{X_i, F_i, D_i, S_i\}$$

Построение рефлексивной сети происходит по следующему алгоритму: узлами (вершинами) сети являются агенты, а дуга от игрока i к игроку j существует тогда и только тогда, когда игрок j принадлежит множеству игроков, чьи атрибуты известны игроку i. Такая сеть полностью задает структуру информированности и позволяет вычислять равновесие.

Будем говорить, что в игре в нормальной форме $n$ игроков $G$ задана рефлексивная сеть $R$, если

- для $i$-го игрока задано:
  - правило принятия им решения в ситуации неопределенности,
  - подмножество игроков $N_i$, все параметры которых ему известны (их множество допустимых действий, целевые функции, правила принятия решения, их представления о других игроках и любая другая доступная этим игрокам информация). При некоторых дополнительных условиях (слабых) игрок может предсказать их действия вне зависимости от их целевых функций.

- для любого подмножества игроков известно, какие действия они выберут, если каждый игрок может предсказать действия другого (для простоты везде будем считать, что игроки выбирают всегда точку равновесия по Нэшу в чистых стратегиях).

Введем следующие обозначения для правил принятия решения в условиях неопределенности. Критерий Гурвица G(α) (который обобщает правило выбора максимального гарантированного результата (МГР))

$$G(\alpha): x_i = \underset{x_i}{\operatorname{argmax}} \left( (1-\alpha) \max_{x_{-i}} F(x_i, x_{-i}) + \alpha \min_{x_{-i}} F(x_i, x_{-i}) \right),$$

где $x_i$ – действие $i$-го игрока. При этом α=1 – соответствует случай пессимиста. Критерий Лапласа L, который при равенстве мощности множества стратегий всех игроков.

$$L: x_i = \underset{x_i}{\operatorname{argmax}} \frac{1}{M^{n-1}} \sum_{x_{-i}} F(x_i, x_{-i}); M = \#(X_i),$$

Критерий Сэвиджа V

$$V: x_i = \underset{x_i}{\operatorname{argmax}} \min_{x_{-i}} \left( \max_{x_{-i}} F(x_i, x_{-i}) - F(x_i, x_{-i}) \right).$$

Сумма действий игроков, чьи действия может точно просчитать $i$-игрок, и которые не могут просчитать его действия, равна, таким образом, $J_i = \sum_{j \in S_i} x_j$. При этом количество игроков, чьи действия он предсказать не может, равно $\#(S_i)$. Количество игроков, которые могут предугадать его действия и действия которых может предугадать он равно $k_i$.

Определим равновесие в игре с неполной информированностью игроков, как набор действий, которые они выберут с учетом их стратегической рефлексии. Множество точек равновесия будем обозначать RN, а множество точек равновесия Нэша в чистых стратегиях NE.

## 2 Применение рефлексивных сетей для задач управления равновесиями в классических матричных играх

Задачей управления равновесиями назовем построение управляющее воздействие (изменение параметров игры), максимизирующую некоторую функцию от выбранных игроками действий, другими словами от положения точки равновесия.

Покажем возможности использования рефлексивных сетей для анализа классических игр.

*Игра "Диллема заключенного".* Пусть матрицы выигрышей записываются для игроков в виде

$$A = \begin{pmatrix} C & c \\ D & d \end{pmatrix}, \; B = \begin{pmatrix} C & D \\ c & d \end{pmatrix},$$

где $D > C > d > c$ и $2C > D + c$. Первый игрок выбирает строки, второй – столбцы.

Утверждение 1. В игре "Диллема заключенного", если правило разрешения неопределенности для каждого из игроков принадлежит множеству правил $G(\alpha) \cup L \cup V$, то RN= NE.

С точки зрения возможности управления положением равновесия с помощью рефлексивной сети или выбора правил принятия решения это означает, что положения равновесия в этой игре не может быть объектом такого управления.

*Игра "Преследование".* Пусть матрицы выигрышей записываются для игроков в виде

$$A = \begin{pmatrix} -c & c \\ c & -c \end{pmatrix}, \; B = \begin{pmatrix} c & -c \\ -c & c \end{pmatrix},$$

где D > 0.

Утверждение 2. В игре "преследование" вне зависимости от правила разрешения неопределенности, если рефлексивная сеть ассиметрична (то есть только один из игроков может

предсказывать действия другого), выигрыш будет у того игрока, который обладает большим рангом стратегической рефлексии.

Можно отметить, что равновесия Нэша в исходной игре в чистых стратегиях нет (то есть в случае, когда рефлексивная сеть является полным графом), однако при наличии асимметричной рефлексивной сети появляется равновесие в классе равновесий RN. Таким образом, управлением рефлексивной сетью можно обеспечить больший выигрыш любому из игроков. Однако в силу симметрии исходной игры невозможно ни управлением рефлексивной сетью, ни правилами принятия решений из множества $G(\alpha) \cup L \cup V$ гарантировать выбор игроками каких-либо своих действий. В такой игре возможности управления ограничены.

*Игра "Цыпленок".* Пусть матрицы выигрышей записываются для игроков в виде

$$A = \begin{pmatrix} C & d \\ D & c \end{pmatrix},\ B = \begin{pmatrix} C & D \\ d & c \end{pmatrix},$$

где $D>C>d>c$.

Утверждение 3. В игре "Цыпленок", в случае асимметричной рефлексивной сети игрок с меньшим рангом стратегической рефлексии получает больший выигрыш, если принимает решение в условиях неопределенности по правилу $G(0)$. В тех случаях, когда игрок с меньшим рангом рефлексии принимает решение по любому из правил $G(1)$, $L$ или $V$, больший выигрыш получает его противник.

Это означает, что больший ранг стратегической рефлексии, может приводить к меньшему выигрышу даже в играх, где максимальный ранг рефлексии ограничен первым рангом. Содержательно это означает, что в реальных играх, более опытный игрок (то есть тот, кто может точно предсказать действия противника) может в некоторых играх всегда проигрывать новичку, который действий своих противников точно предсказать не может.

Отметим также, что управлением правилами принятия решения и рефлексивной сетью в этой игре можно достичь равновесного состояния в любой заданной точке.

## 3 Применение для других игр

Следует отметить, что применение рефлексивной сети к олигополии Курно не сводит игру к модели Штакельберга. В общем случае полный анализ оптимальной рефлексивной сети по-видимому очень сложен [3-5]. Отметим, что *RN* равновесие для олигополии Курно, в одном из простейших случаев был построен в работе [6], при этом получение даже простого результата потребовало использования громоздких математических методов преобразования алгебраических выражений.

Рассмотрим подробно игру, в которой для простоты будем полагать, что правило принятия решения *i*-го агента принадлежит $G(\alpha_i)$.

*Игра " Модель объединения участников для выполнения проекта".* Математическая запись игры:

$$f_i = x_i \left( \sum_{j=1}^{n} x_j - A \right);\ x_i \in [a,b];\ \text{A>0}$$

В случае если рефлексивная сеть является полным графом, то в игре возможно существование от одного до трех равновесий по Нэшу в зависимости от соотношения параметров.

Игра интересна тем, что при $a$=0 можно показать рефлексивную сеть, которая обеспечит нулевую сумму действий игроков, если такая сеть существует.

Утверждение 4. Если при $a$=0 существует такая рефлексивная сеть, что сумма действий игроков равная 0 является равновесием, и параметры оптимистичности игроков попарно различны, то такое равновесие может быть достигнуто рефлексивной сетью, построенной следующим образом: игроки могут предсказывать действия только более пессимистичных оппонентов, чем они сами.

Утверждение 5. В условиях утверждения 4 можно построить рефлексивную сеть, в которой будет достигаться максимально возможная сумма действий игроков – игроки, однако эта сеть может не совпадать с полным графом.

Действительно, если сумма всех действий игроков меньше порога, то при рефлексивной сети являющейся полным графом, равновесие будет только нулевое. Однако если использовать последовательную сеть из утверждения 4, но в которой каждый игрок может предсказывать действия более оптимистичных, то в точке равновесия при некотором соотношении параметров (например, если все игроки являются максимально оптимистичными), может существовать и ненулевое равновесие.

Содержательно управление рефлексивной сетью в данной игре можно рассматривать как управление списками рассылки отчетов между участниками проекта. Если требуется, чтобы сумма действий агентов превышала равновесное по Нэшу, то этого можно достичь. В этом случае можно распределить обязанности таким образом, чтобы более пессимистичные сотрудники были наиболее информированными. А наиболее оптимистичные сотрудники были бы наименее осведомлены.

Следует отметить, что полное исследование равновесий в рассматриваемой игре, по-видимому, должно включать в себя решение задачи поиска равновесия в модели Грановеттера и поэтому быть весьма сложной для аналитических исследований [1].

**Заключение**

Данная работа продолжает исследования в области влияния стратегической рефлексии на положения точек равновесия в игровых моделях. Предложен новый инструмент моделирования ситуации сложной стратегической рефлексии агентов – рефлексивная сеть, – позволяющий учитывать не только ранг рефлексии агента, но и его информированность о тех или иных оппонентах. Этот инструмент позволяет моделировать принятие решений в активных сетевых структурах со сложной взаимной информированностью.

**Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-07-00104).

**Список литературы**

[1] Бреер В.В. Теоретико-игровая модель неанонимного порогового конформного поведения / Управление большими системами. Выпуск 31. М.: ИПУ РАН, 2010. С.162-176.
[2] Губанов Д.А. О стратегической рефлексии в биматричных играх.// Управление большими системами. 2008. №21. С. 49-57.
[3] Губко М.В. Управление организационными системами с сетевым взаимодействием агентов. Часть 1. Обзор теории сетевых игр. // Автоматика и телемеханика. №8. 2004. С. 115-132.
[4] Губко М.В. Лекции по принятию решений в условиях нечеткой информации. - М.: 2004.
[5] Воронин А.А., Губко М.В., Мишин С.П., Новиков Д.А. Математические модели организаций: учебное пособие. -М.: ЛЕНАНД, 2008. - 360 с.
[6] Дюсуше О.М. Статическое равновесие Курно-Нэша и рефлексивные игры олигополии: случай линейных функций спроса и издержек. /Экономический журнал Высшей школы экономики. Т.10, М. ГУ ВШЭ, 2006. – С. 3-32.
[7] Ерешко Ф.И. Моделирование рефлексивных стратегий в управляемых системах. – М.: ВЦ РАН, 2001.
[8] Корепанов В.О. Модели рефлексивного группового поведения и управления. – М.: ИПУ РАН, 2011. – 133 с.
[9] Корепанов В.О., Новиков Д.А. Метод рефлексивных разбиений в моделях группового поведения и управления // Проблемы управления. – 2011. -№1. – С. 21-32.

[10] Лефевр В.А. Конфликтующие структуры. М.: Советское радио,1973.- 158 с.
[11] Новиков Д.А. Динамика поведения систем с большим числом целенаправленных элементов // Автоматика и Телемеханика.1996. №4. – С. 187 – 189.
[12] Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Рефлексивные игры. – М.: СИНТЕГ, 2003. – 149 с.
[13] Федянин Д.Н., Чхартишвили А.Г. Об одной модели информационного управления в социальных сетях / Управление большими системами. Выпуск 31. М.: ИПУ РАН, 2010. С. 265-275.
[14] Федянин Д.Н. О включении ограниченной рефлексии агентов в игровые модели. // Труды 54-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе». Радиотехника и кибернетика. Том 1. – М.: МФТИ, 2011. С. 101-102.
[15] Chkhartishvili1 A.G., Fedyanin D.N. On Models of Information Management in Social Networks.// Collected abstracts of papers presented on the Fifth International Conference Game Theory and Management / Editors Leon A. Petrosyan and Nikolay A. Zenkevich. – SPb.: Graduate School of Management SPbU, 2011. – P 57-61.
[16] Chong J.K., Camerer C.F., Ho T.H. Cognitive hierarchy: A limited thinking theory in games. In Experimental Business Research, Volume III: Marketing, Accounting and Cognitive Perspectives, chapter 9. Kluwer Academic Press, 2005.
[17] Nash. J.F. Non-cooperative games / Ann. Math. 1951. Vol. 54. P. 286 – 295.

# О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА ПРОЕКТА «ИСКУССТВЕННАЯ РАЗУМНАЯ РУКА»

**А.И. Тимофеев**

ОАО «Национальный институт авиационных технологий»
117587, Москва, ул. Кировогорадская, 3, Россия
timofiev@yandex.ru
тел: (495) 311-04-11, факс: (495) 311-04-11

***Ключевые слова**: Онтология, закономерность, бионика, робототехника, неопределенность, междисциплинарные знания*

**Abstrasct**

There is shown the main reason of existence of actual unsolved problem in manipulating robotics and human artificial limbs – *Capture reliability prognosis of non-oriented complex shape objects* – in the world.

Taking decision the problem is based on the bionic-like approach on the basis of application formalized interdisciplinary knowledge with simulating as structure of human functional system – the gripper system and so functional principles of movement act of human arm.

Ontological approach of the project is the law structure process of formalization interdisciplinary knowledge before generation the technical requests of the project.

## Введение

Со времен XX века существует нерешенная актуальная проблема в манипуляционной робототехнике и в протезостроении – «Обеспечение надежности захвата неориентированных объектов сложных форм» – как необходимая стадия манипулирования с любым объектом.

Основная причина существования этой проблемы – это отсутствие до отрыва объекта от исходной позиции таких активных сил в новых точках контакта системы «Кисть-объект» как проекции силы веса в соответствии с физическими законами, и неизбежное образование этих сил в процессе манипулирования им (после отрыва объекта).

Поэтому генерируется парадоксальная ситуация, когда сначала необходимо (роботу или человеку) принимать решение по надежному захвату объекта в начальных условиях до отрыва объекта, а затем реализовывать это решение в других условиях.

При манипулировании объектом это проявляется в достижении различных состояний равновесия сил и моментов в системе «Кисть-объект» (устойчивое, неустойчивое и т.д.) как результат реальной физической ситуации, как недостаточное информационное обеспечение манипуляционной робототехники.

Если адаптация к неизвестной сложной форме (как топологическая задача) может быть реализована, например, применением системы технического зрения робота и адаптивного захватного устройства, то обеспечение надежности захвата (как физическая задача) по этой причине пока не имеет кардинального решения.

Доминирующие в современных системах управления манипуляционных роботов и в протезостроении числовые методы лишают их возможности использовать внутренние связи, отношения, в т.ч. в системе «Кисть-объект», в качестве признаков достижения надежности захвата.

Поэтому манипуляционные возможности любого робота, связанные с захватом объекта, могут быть успешно реализованы только в узких границах детерминированной среды, заранее созданной или осознанной человеком.

Биологи утверждают, что возможности млекопитающихся прогнозировать развитие событий обеспечили их доминирование на нашей планете относительно класса птиц, класс пресмыкающихся и т.д. Очевидно, что известные возможности человека по переходу от примитивных уровней прогнозирования к высоким уровням способствовали, прежде всего, его доминированию среди остальных млекопитающихся.

Известно, что основная трудовая деятельность человека непрерывно связана с результатами его другой деятельности – детерминирования внешней среды – раскрытием смысловой составляющей исходной ситуации. Особенности этой деятельности носят вынужденный, постоянный и подсознательный характер.

## 1 Стратегия решения проблемы

Стратегия кардинального решения проблемы связана с бионическим подходом – с применением целенаправленно формализованных междисциплинарных знаний – биология, физика, психология, кибернетика, семиотика, информациология, лингвистика, робототехника и т.д. – ядра искусственного интеллекта – с техническим моделированием:

1.1 Структуры функциональной системы человека – системы захвата, включая моделирование пространственного осязания руки с формированием и оценкой тактильного образа закрепощений виртуальных перемещений объекта (образ ОЗВП), что проявляется в результате его деятельности.

1.2. Функциональных принципов двигательного акта руки человека, выявленных в результате проведения эксперимента в аналогичных условиях.

В целом, моделированием как интеллектуальных процессов на уровне принятия решения в условиях неопределенности, так и моделированием реализации этого решения на поведенческом уровне.

Это обеспечивает решение 2-х последовательных задач до отрыва объекта:

- Детерминирование физической ситуации в системе «Кисть – объект»;
- Прогнозирование надежности захвата неориентированных объектов сложных форм (после отрыва объекта) как устойчивого состояния равновесия всех сил в точках контакта системы «Кисть-объект».

## 2 Детерминирование физической ситуации в системе «Кисть-объект»

*Решение первой задачи* базируется на применении *геометризации* физического компонента исходной информации на семантическом уровне, что обеспечивает передачу семантического компонента информации от физической задачи с неопределенными условиями к геометрической задаче в определенных условиях, раскрывая семантический компонент исходной информации, изменяя статус информации с «Закрытого» к «Открытому» для нашего сознания.

Указанное выше базируется на применении следующей *семиотической структуры отношений* контактных точек в качестве симбиоза *информациологии*, раскрывающей относительный геометрический мультиагентный ракурс недетерминированной физической ситуации, и *семиотики*, раскрывающей семантический компонент информации:

2.1 *Признак* – относительное безразмерное положение точек контакта в системе «Кисть-объект».

2.2 *Внутренние связи* – связь между первым и третьим компонентами структуры как результат формализованных описаний знаний.

2.3 *Семантика* – смысл результата взаимодействия контактных сил как семантический компонент информации.

На элементарном уровне семантический информационный компонент представляет собой *пару анти-весторов контактных сил*, приложенных к общей точке контакта, равных по модулю и противоположно направленных по условной оси. Это закрепощает виртуальное переме-

щение объекта по этой оси, причем работа этих сил согласно физическому принципу виртуальных перемещений Лагранжа равна нулю.

Формализованные описания междисциплинарных знаний раскрыли *связи* между относительными положениями точек контакта – с одной стороны, и секторами ОЗВП – с другой.

В процессе пассивной адаптации захватного устройства к форме и положению объекта каждая новая точка контакта генерирует собственный квант (группу) различных внутренних отношений между этой точкой контакта и другими ранее образованными точками. *Множество взаимодействующих точек кон*такта – как основа мультиагентной системы, генерирующей эти отношения, - является основой *семантической сети отношений*. Это создает как условия для классификации отношений системой управления, так и создания геометрических секторов закрепощений виртуальных перемещений объекта в пространстве – основу образного представления семантического компонента реальной физической ситуации в системе «Кисть-объект» (до отрыва объекта):

(1) $IntR(ai;aj) \Rightarrow \{fia\}n \cap \{fjп\}n \Rightarrow \{e(i)з\}m \Rightarrow \Delta\, Фn(\alpha;\beta)$,

(2) $C_з\{A_з\,(IntR(a_i;a_j))\}^N \Rightarrow Ф_{об}{}^N$,

где:
$f_i^a$; $f_j^п$ – векторы виртуальных сил в точках ***ai,aj***,
$e_i{}^з$ – геометрический вектор ОЗВП,
$\Delta\, Ф^п{}_{(\alpha;\beta)}$ – сектор ОЗВП и его параметры,
N – количество отношений,
$Ф_{об}{}^N$ – образ ОЗВП.

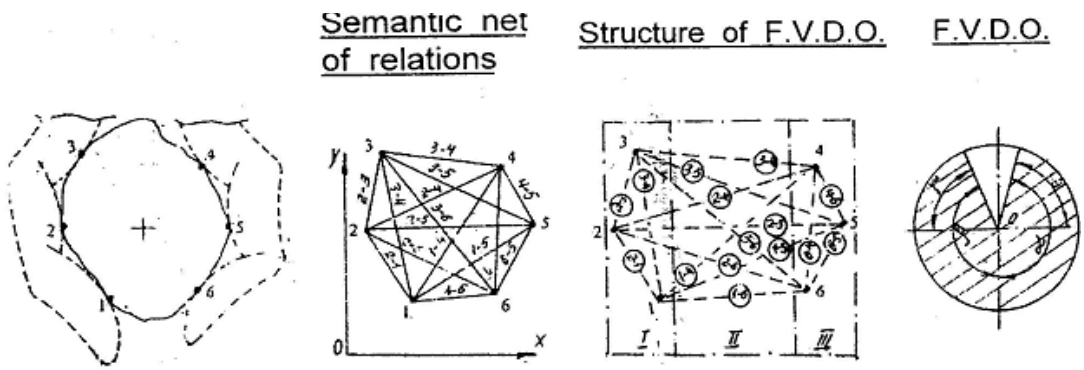



Рисунок 1 – Процесс формирования образа ОЗВП

### 3 Прогнозирование надежности захвата

*Решение второй задачи* основывается на анализе и оценке образа ОЗВП с классификацией их отношений посредством сравнения с образом полного кинематического замыкания объекта (ПКЗО) в виде цели с детерминированием и классификацией их отклонений на допустимые и недопустимые как основу прогноза надежности захвата.

Для реализации этой деятельности разработан информационный *инструментарий прогнозирования* надежности захвата неориентированных объектов сложных форм в следующем составе:

3.1 Образ ОЗВП.

3.2 Образ полного кинематического замыкания объекта (ПКЗО).

3.3 Внутренние классификационные и причинно-следственные связи между образом ОЗВП, образом ПКЗО и контактными точками.

Это обеспечивает деятельность инструментария прогнозирования надежности захвата неориентированных объектов сложных форм, где:

Прогнозирование надежности захвата:

$$(3)\quad \Phi_{об}^{N} - [\Phi] \Rightarrow \Delta\Phi_{об}^{N} \Rightarrow sign\,\Delta\Phi_{об} \left| \begin{array}{l} \oplus \Delta\Phi > 0 \\ \oplus \Delta\Phi = 0 \\ \Theta\, \Delta\Phi < 0 \end{array} \right| \Rightarrow ПР^{O}.$$

где: $\Phi_{об}{}^{N}$ – фактический образ ОЗВП объекта;
N – количество отношений;
[Ф] – образ ОЗВП с допустимыми параметрами;
$ПР^{O}$ – прогноз и его параметры.

Образ ОЗВП предназначен для применения в качестве *константной величины*, независимой от любых изменений сил в точках контакта в процессе манипулирования и обеспечивающей надежность захвата в соответствии с принципом Лагранжа.

В итоге решение этой проблемы обеспечивает *полноту ее сущности* и *полноту процедуры* принятия решения при применении целенаправленно формализованных междисциплинарных знаний. Оно так же включает в себя следующие три основных принципа Теории Познания:

- *Рациональность* – посредством применения решения, адекватного актуальной проблеме по существу;
- *Когнитивная относительность* – посредством применения семантической структуры отношений (с относительными безразмерными положениями точек контакта), связанными с геометрическими секторами закрепощений виртуальных перемещений объекта. Это позволяет распознавать как реальную физическую ситуацию в системе «Кисть-объект», так и применять множество оценок отношений точек контакта в качестве интегрального признака надежности захвата до отрыва объектов;
- *Ясность* – посредством применения информационного семантического компонента с образным представлением. Определение семантического компонента любой деятельности должно опережать реализацию этой деятельности.

## 4 Некоторые закономерности онтологического подхода и области их применения в проекте ИРР

Онтологический подход к проекту «Искусственная разумная рука» в своей сущности является процессом структурирования закономерностей целенаправленных формализованных описаний междисциплинарных знаний предметной области и предвосхищает разработку технического задания на проектирование.

### 4.1 Введение. Применение девиза: «*Смысл – прежде всего и везде*»

4.1.1 *Определение смыслов* (проблемы, задач, ситуаций, процедуры поиска решений, т.д.), их структур и связей.

4.1.2 *Опережение смысла* любой предстоящей виртуальной деятельности, его структуры и связей.

4.1.3 *Геометризация физического пространства ситуаций через образное структурированное представление всех его смыслов* на единой основе (знаковые системы смыслового пространства).

4.1.4 *«Слово» внутреннего языка смыслового пространства*, его структура на семантическом уровне.

4.1.5 *Единство структур смыслового пространства* (на различных информационных уровнях)

4.1.6 *Информационный инструментарий прогнозирования* результатов виртуальной деятельности ИРР и его структура.

**4.2 Формализованные описания междисциплинарных знаний:**

4.2.1 Целенаправленность описания различных дисциплин через совместимость их смыслов смыслу проблемы.

4.2.2 Единство форм представления смыслов дисциплин.

4.2.3 Общность языка описания дисциплин.

4.2.4 Синтез смыслов дисциплин по схеме типа «Ромашка»

4.2.5 Моделирование пространственного осязания руки человека

4.2.6 Моделирование акцептора результата действий функциональной системы захвата (П.К. Анохин)

4.2.7 Моделирование функциональных принципов двигательного акта руки человек (А.И. Тимофеев)

4.2.8 Применение физического принципа виртуальных перемещений Лагранжа в векторном исполнении

4.2.9 Критерии качества описания смыслов дисциплин:

4.2.9.1 Полнота смысла.

4.2.9.2 Рациональность.

4.2.9.3 Когнитивная относительность.

4.2.9.4 Ясность смысла.

**4.3 Процедура принятия решения**

4.3.1 Закон встречных логических возможностей.( А.Е. Александров)

**4.4 Результаты виртуальной деятельности ИРР**

Прогнозирование надежности захвата неориентированных объектов сложных форм через *детерминирование* ситуации и *оценку результатов* ситуационного моделирования до отрыва объекта от исходного состояния.

Онтологический подход позволяет подготовить информационный базис для разработки технического задания на проектирование.

В результате идеи решения проблемы и методы их реализации, заимствованные из биологии и трансформированные через законы физики и других дисциплин, возможно представить в удобной форме в виде решений, с которыми необходимо координировать и алгоритмы функционирования и конструктивные решения систем управления, узлов и механизмов создаваемых технических систем.

Кардинальное решение этой проблемы, по существу, представляет собой *техническое моделирование замечательной способности естественного сознания – предвидение результата развития ситуации в неопределенных условиях* с применением оценки будущих событий.

Упомянутое применено в проекте модели искусственной разумной руки с антропоморфными пальцами и ладонью матричного типа, предназначенными для безударного захвата неориентированных объектов сложных форм с обеспечением надежности захвата.

## 5 Область применения

***Промышленность –*** *роботизация* единичных и мелкосерийных многономенклатурных *производств в машиностроении.*

***Экстремальные среды*** **–** *роботизация* освоения Космоса, морских глубин, тематики МЧС.

***Медицина*** **-** интеллектуальные протезы рук и спецманипуляторы для инвалидов ног.

***Спорт*** **–** *новый вид спорта для молодежи – соревнования с применением спецманипуляторов по сборке и монтажу объектов и систем с манипулированием их фрагментами.*

***Бытовые роботы*** **–** *уборка, например, использованной посуды, уход за больными и т.д.*

**Заключение**

В результате кардинальное решение упомянутой проблемы в кооперации с достигнутыми возможностями современных манипуляционных роботов позволит будущей интеллектуальной робототехнике**,** а также новому классу интеллектуальных протезов для инвалидов (и с парализованными руками), совершить принципиально новый функциональный скачек. Другими словами, вторгнуться в неизвестную и недоступную ранее сферу деятельности человека как прямой исполнитель ручных и механизированных работ в естественных неопределенных условиях. Появляется возможность вторгнуться в реальную обитель человека благодаря новой способности автономно детерминировать внешнюю среду (аналог неосознанной, вынужденной и постоянной деятельности человека) с оценкой физической ситуации.

Это должно вызвать волну потребностей как для замены работающего человека роботом в естественной и экстремальной средах, так и дальнейшего развития этой техники. Так же образуется аналогия благодаря роли руки человека в материальной и духовной сферах деятельности человека как шагов эволюционного процесса человечества и нашей цивилизации.

**Список литературы**


[1] Анохин П.К. Узловые вопросы теории функциональной системы. Москва. Наука. 1980.

[2] Кацуро Я. Исследования антропоморфной механической руки с индивидуальными приводами на пальцах. Перевод ГПНТБ №78/42192, Япония, 1978.

[3] Irina Ezhkova. Self-organizating representations. Cybernetics and systems, An International Journal, 36: 861-875, 2005, Taylor, Francis Inc.

[4] Савельев С.В. Происхождение мозга. Веси. Москва 2005.

[5] Судаков К.В. Рефлекс и функциональная система. Новгород, 1997.

[6] Тимофеев А.И. Семиотическая основа процессов прогнозирования в неопределенных условиях. Материалы Десятой национальной конференции по искусственному интеллекту. 25-28 сент. Обнинск. Физматлит.2006.

[7] 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.

[8] Тимофеев А.И. О процессах самоорганизации технических систем в условиях неопределенности. Материалы 4й Всероссийской мультиконференции 3-8 октября 2011, с. Дивноморское, Россия. т.I.

[9] 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.

[10] 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.

[11] Юзвишин И.И. Основы информациологии. Высшая школа. Москва 2001.

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ КОБОРГ-СИСТЕМЫ

**В.И. Соловьев**

Научно-инженерный Центр Ассоциации содействия Всемирной Лаборатории
105082, Москва, ул. Бакунинская, 58/1, Россия
sicwl@newmail.ru

***Ключевые слова:*** *система, органы, расстройства, коллективный эксперт, база знаний, внутренние параметры состояния*

**Abstract**

The paper considers a system of diagnosis and management of a complicated organized multiagent objects (MA-Coborgs). Complex and combined MA-objects are understood to be a certain unity of all the processes, organs and systems acting inside it. They belong neither to animal nor organic, vegetable, life, nevertheless they possess the main characteristics of life organisms.

## Введение

Основная сущность коборг-технологии для диагностирования и управления сложными организованными объектами (A complicated organized objects-Coborgs) была освещена в [1-3]. Она заключается в представлении таких объектов как некоторого организованного единства всех согласованно действующих в них процессов, органов, систем или функциональных узлов, не относящиеся к животному или растительному миру, но обладающие основными свойствами живых организмов. В этом случае при проектировании систем в некоторой проблемно-ориентированной области необходимо в составе коборга: а) выделить органы (процессы, функциональные узлы или системы); б) определить возможные расстройства или заболевания, которым может подвергаться коборг в процессе жизненного цикла; в) сформулировать перечень информативных внутренних параметров состояния (ВПС) в виде различных проектных нормативов, заданных диапазонов и траекторий, предельно допустимых минимальных или максимальных величин; г) обеспечить возможность непрерывного контроля (измерения, регистрации) ВПС в реальном или псевдореальном времени. Дальнейшее построение интеллектуальной системы диагностирования и управления коборгом (SmartCoborgSystem) может производиться, например, на основе процедур использования и обработки знаний в соответствующей предметной области. К коборгам относятся все организованные объекты в технической, экономической, административной, военной, медицинской, образовательной и прочих областях деятельности человеческого общества.

Коборг-технология достаточно хорошо зарекомендовала себя при создании систем диагностирования и управления локальными (сосредоточенными) объектами. Здесь укажем на металлургические агрегаты (доменные печи, агломерационные машины), при создании систем управленческого учета предприятия.

## Основная часть

В данном докладе рассмотрена возможность применения указанного подхода к созданию интеллектуальных систем оперативного диагностирования и управления сложными мультиагентными объектами, которые мы в соответствии с основной концепцией коборг-технологии назовем мультиагентными коборгами (МА-коборги). МА-коборгами могут быть:

- действующая группа интеллектуальных роботов – агентов (ИРА);

- действующие отряды (соединения) локальных техно-коборгов (надводных и подводных судов, самоходных наземных машин, воздушных аппаратов), а также неоднородное сетецентрическое пространство;
- команда, коллектив, подразделение, персонал людей (далее команда), выполняющих определенное задание или решающих определенную задачу.

Важнейшим моментом при этом является задача представления МА-коборга адекватной совокупностью органов (процессов, узлов, систем и др.). Наиболее очевидным, но возможно не единственным решением, здесь может быть компоновка органов на функциональном принципе. Например, органами футбольной команды могут являться: оборона, полузащита и нападение. Органами группы по проведению специальной операции могут являться подразделения разведки, исполнения, прикрытия и обеспечения.

Определяющим свойством любого организма, в том числе коборга, является его состояние, которое описывается определенным числом внутренних параметров состояния (ВПС). Полезную информацию о дополнительных характеристиках (устойчивость тренда, максимальная амплитуда, скорость нарастания и др.) можно извлекать на всем диапазоне текущего изменения ВПС. Функциональным расстройством $Q$ будем называть аномальное состояние объекта или органа объекта, характеризующееся определенной симптоматикой, т.е. набором признаков $\{\pi_i(Q)\}$, в совокупности определяющих классифицирующую функцию данного расстройства $W(Q)$. В контексте определения $W(Q)$ – это логическая функция на множестве переменных состояния и признаков (симптомов), зависящих от вида расстройства $\{\pi_i(Q),\ i = 1,2,\ldots I(Q)\}$. В задачах, связанных с диагностированием текущего состояния объекта,в том числе и МА-объекта такими признаками чаще всего являются выход отдельного показателя $y_j$ за рамки области допустимых значений $\Omega_j(Q)$, например:

(1) $\pi_i(Q) = 0$, если $y_j \in \Omega_j(Q)$ и $\pi_i(Q) = 1$, если $y_j \notin \Omega_j(Q)$.

Аналогично можно определить признаки и на совокупности контролируемых ВПС объекта. Симптомы могут формулироваться на основе агрегирования переменных, дисперсионных и иных оценок. Если интересуют тренды показателей, то для определения симптома используют динамические модели и различные прогнозные схемы. Последние особенно актуальны для ранней диагностики расстройств, выявления наиболее информативных переменных состояния и надежных симптомов

Чаще всего при симптомах типа (1) классифицирующая функция $W(Q)$ представляет собой дизъюнктивную форму, соответствующую одновременному проявлению всех признаков расстройства:

(2) $W(Q)=\&\pi_i(Q)$

$i \in I(Q)$.

Применительно к МА-коборгу целесообразно выделять две категории ВПС:

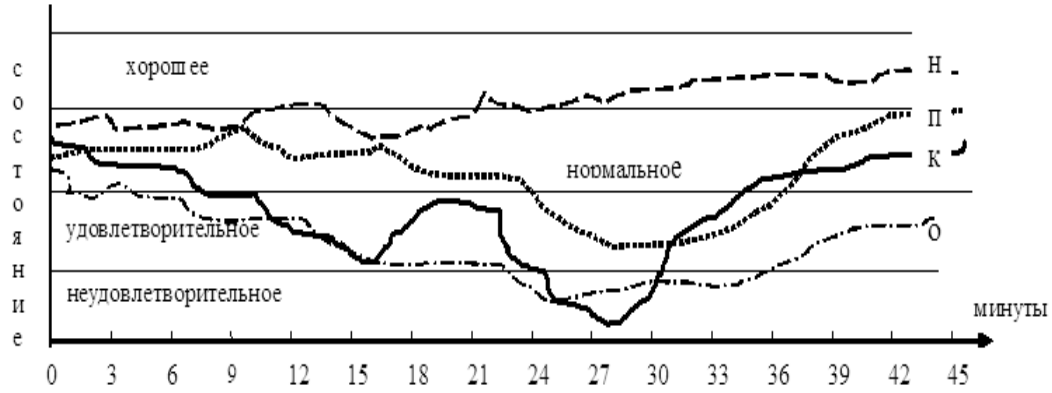
- индивидуальные параметры состояния (ИПС) каждого интеллектуального агента в составе соответствующего функционального органа МА-коборга. Индивидуальными параметрами состояния могут быть показатели, характеризующие действия ИРА, техно-коборга или любого интеллектуального агента при выполнении персонального задания. Причем действие агента может описываться заранее определенным числом ИПС. Например, действия агента- футболиста, представляющего конкретный орган команды (оборона, полузащита, нападение), могут быть отображаться соответствующими параметрами, характеризующими качество исполнения тактико-технических приемов в ходе игры (отборах мяча, передачах мяча партнеру, ударов по воротам противника, обводка опекуна и др.). Аналогичным образом можно характеризовать действия агента-участника специальной операции в составе определенного органа команды (отряда, группы), например, по качеству и времени исполнения тактических и физических приемов в ходе проведения операции (точность

выполнения инструкций, точность стрельбы, время и место занятия исходной позиции, связь с партнерами);

- комплексные параметры состояния (КПС), характеризующие общее состояние МА-коборга по аналогии с общими параметрами состояния человеческого организма (температура тела, проявление болевых ощущений, артериальное давление, химический состав крови и мочи). Такими общими параметрами при проведении спецопераций являются: основной сценарий, время и продолжительность проведения этапов операции (подготовка, исполнение, отход, завершение), скрытность, связь, сведения о противнике и пр. В футбольной игре общими командными параметрами могут считаться: схема игры, время владения мячом, средняя дальность и точность передач, процент территориального преимущества, исполнение «наигранных» типовых тактических ситуаций, знание о сопернике на предстоящий матч и др.

Текущие значения и характер изменения КПС и ИПС отражают состояние и предопределяют результат деятельности или функционирования мультиагентного объекта на все этапы жизненного цикла. Очевидно, что независимо от назначения МА-коборга его эффективное функционирование возможно тогда, когда он находится в нормальном состоянии. Нормальное (заданное) состояние МА-коборга, соответствующее достижению или приближению к поставленной цели (целевой функции), обеспечивается в случае, когда его основные ВПС находятся в заданных интервалах. Так заданные интервалы ИПС удобно представлять в виде определенных нормативов, исходя из максимально достигнутых тактико-технических, физических и психологических кондиций каждого интеллектуального агента с учетом его принадлежности к определенному органу команды. В количественном выражении это означает установленный максимально допустимый процент ошибок интеллектуального агента при исполнении технических и физических приемов, тактических ситуаций, «запрограммированных» в процессе тренировочной работы. Это же относится и к общим командным параметрам состояния, планирование которых производится на каждую операцию (игру). Под функциональным расстройством или нежелательным изменением состояния МА-коборга будем понимать нарушение нормального функционирования какого-либо органа или какой-либо системы, входящих в состав этого МА-коборга, носящее периодический или постоянный характер. Как правило, расстройство организма связано с закономерным сочетанием и развитием симптомов расстройства или заболевания, представляющих собой устойчивые отклонения текущих значений ВПС от заданных диапазонов. Интеллектуальная система диагностирования производит выявление и оценку состояния каждого органа или процесса по текущему значению и тренду кривой вероятности развития расстройства в соответствии с процедурами [4] представления и использования знаний в предметной области. Затем принимается решение о принадлежности текущего стояния МА-коборга к заранее определённому нечеткому терму состояния типа: нормальное", "удовлетворительное", "неудовлетворительное", "хорошее" и т.д. Это позволяет оперативно оценивать как текущее состояние "здоровья" действующего МА-коборга, как в целом, так и его отдельных органов. Очевидно, что для таких сложных организованных объектов, не имеющих в отличии от медицины, своей собственной терминологии расстройств и заболеваний, эти приемы нечеткой логики [5] при оперативном диагностировании состояния остаются пока наиболее удобным и единственным решением.

Пример результата оперативного диагностирования состояния МА-коборга (здесь играющей футбольной команды) в первой половине матча представлен на рисунке 1:




Здесь органы: «н» – нападение, «п» – полузащита, «о» – оборона, «к» – команда в целом

Рисунок 1 – Диаграмма диагностирования МА-коборга

**Заключение**

Предложенная Коборг-технология позволяет:

а) создать универсальную основу для создания интеллектуальных систем оперативного диагностирования и управления сложными организованными объектами различного назначения, в том числе для мультиагентных объектов;

б) сократить время на разработку интеллектуальных систем и уменьшить трудоемкость их сопровождения.

**Список литературы**

[1] Соловьев В.И. Интеллектуальные системы диагностирования и управления коборгами. В сб. «Интеллектуальные системы» Труды Девятого международного симпозиума / Под ред. К.А. Пупкова. – М.: РУСАКИ. 2010. – 773 с.

[2] Соловьев В.И. Интеллектуальная система управления сложными организованными объектами (коборгами). Патент на изобретение RU №2435187 C2, 2011г.

[3] Соловьев В.И. Smart Coborg Systems. Материалы международной научно-практической конференции OSTIS-2011. г. Минск. Секция 8.

[4] Представление и использование знаний. Пер. с япон. /Под ред. Х. Уэно, М. Исидзука – М.: Мир, 1989. – 220 с., ил.

[5] Прикладные нечеткие системы: Пер.с япон./Под ред. Т.Терано, К. Асаи, М.Сугэно. – М.: Мир,1993. – 368 с., ил.

# ПОРОГОВЫЕ МОДЕЛИ КОНФОРМНОСТИ И АНТИ-КОНФОРМНОСТИ

**В.В. Бреер**

Институт проблем управления РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65, Россия
breer@live.ru
тел: +7 (495) 334-89-10, факс: +7 (495) 334-93-40

***Ключевые слова:*** *комформность, анти-конформность, игровая модель, равновесие Нэша, распространение инноваций*

**Abstract**
The following paper describes game theoretical model of conformity and non-conformity behavior. This model can be applied to the application of innovation diffusion. The corresponding example is presented. The simplifying criteria of Nash equilibrium is proved.

## Введение

Конформность характеризуется с одной стороны социальным давлением, а с другой – противодействием индивида этому социальному давлению [8], [10]. Если индивид не поддался социальному давлению, то он не совершает тех же действий, что и влияющие на него соседи. Если же этот индивид поддался, то он начинает действовать вместе с коллективом. Итак можно сказать, что решение индивида действовать или нет зависит от противостояния двух факторов – социального давления с одной стороны и его степени автономности, с другой. В данном случае видится целесообразным считать социальным давлением функцию от действий окружающих агента соседей, а степенью автономности агента некую пороговую скалярную величину, которая характеризует самого агента и которую мы будем называть *порогом конформности*. Агент как бы сравнивает эти два фактора и принимает решение – действовать или бездействовать.

Возможно иное поведение агента, которое можно назвать *анти-конформным*. К этому поведению близок термин нонконформизм, когда человек противопоставляет себя некоторым нормам, принятым в обществе. Так, если конформист исходя из выбранной модели поведения, при большой величине социального давления "подчиняется" ему, то нон-конформист действует только при малой величине социального давления, т.е. он действует в свободной обстановке. При ограничении *свободы* ниже определенного *порога*, характеризующего нонконформиста, последний перестает действовать.

Модель формулируется в виде игры в нормальной форме с соответствующими целевыми функциями агентов обоих типов [2], [3], [4], [5]. Найдены условия и структура равновесия Нэша для неанонимного случая, при котором влияние агентов друг на друга индивидуально, а так же для игры, в которой учитываются репутации агентов.

В моделях *принятия инноваций* два этих типа поведения проявляются в следующем виде. При выпуске инновационного продукта на рынок сначала его покупают инноваторы (анти-конформисты), проявляя к нему повышенный интерес. Затем, смотря на инноваторов, в продукте начинают быть заинтересованными обыватели (конформисты), которых, как правило больше. Далее товар покупают обыватели, обладающие высоким порогом конформности. На этот сценарий и рассчитывают производители, заинтересованные в более широком сбыте своих товаров.

## 1 Пороговая модель поведения конформистов и анти-конформистов

Рассмотрим индексное множество *агентов* $N = \{1,2,...,n\}$, каждый из которых имеет две возможности – *действовать или бездействовать*. Так, возможности агента $i$ обозначим через переменную $x_i \in \{0;1\}$, где выбор $x_i = 1$ означает, что агент действует, а выбор $x_i = 0$ – бездействует. *Состояние системы*, определяемое как *вектор действий* всех агентов, обозначим через $x \in \{0,1\}^n$. Вектор действий внешних по отношению к $i$ агентов обозначим через $x_{-i} = (x_1, x_2, ..., x_{i-1}, x_{i+1}, ..., x_n) \in \{0,1\}^{n-1}$ и будем в дальнейшем называть этот вектор *обстановкой*.

Как было указано во введении, на агента оказывается *социальное давление*, которое определяется количеством действующих агентов с учетом их влияния на данного агента. Если агент *j* действует, то его *влияние (dominance)* на агента *i* обозначим через $d_{ij} \in [0,1]$. Если же агент *j* бездействует, то его влияние на *i*-го равно *нулю* (так же, как и на всех остальных агентов). На основаниии этих предположений запишем *социальное давление действия* для агента $i \in N_c$ в виде следующей взвешенной суммы $\sum_{j \neq i} d_{ij} x_j$, численно равной влияниям окружающих. В целях нормировки всегда можно считать, что $\sum_{j \neq i} d_{ij} = 1$, и социальное давление, действующее на любого агента, находится в пределах $0 \le \sum_{j \neq i} d_{ij} x_j \le 1$. Назовем *социальной свободой* для агента $i \in N$ следующую величину $\sum_{j \neq i} d_{ij} (1 - x_j)$. Опишем далее модели поведения агентов-конформистов и агентов-анти-конформистов, исходя из приведенных обозначений социального давления и социальной свободы.

Обозначим множество агентов-конформистов[1] через $N_c = \{n_1, n_2, ..., n_c\}$, а множество агентов-анти-конформистов через $N_a = \{n_1, n_2, ..., n_a\}$. Будем считать, что все множество всех агентов делится только на эти два типа, т.е. $N = N_c \cup N_a$, $c + a = n$. Пусть конформист $i \in N_c$ обладает *порогом конформности* $\theta_i$. Определим поведение этого агента с помощью следующей *целевой функции*:

$$(1) \quad u_i^c(x, x_{-i}) = \left( \sum_{j \neq i} d_{ij} x_j - \theta_i \right) x_i, i \in N_c.$$

Как видно из (1) конформисты принимают решение, сравнивая две величины – социальное давление $\sum_{j \neq i} d_{ij} x_j$ и свой порог конформности $\theta_i$. Пусть анти-конформист $i \in N_a$ обладает *порогом анти-конформности* $\theta_i$. Определим поведение этого агента с помощью следующей *целевой функции*:

$$(2) \quad u_i^a(x, x_{-i}) = \left( \sum_{j \neq i} d_{ij} (1 - x_j) - \theta_i \right) x_i, i \in N_a.$$

Как видно из (2) анти-конформисты принимают решение, сравнивая две величины – *социальную свободу* $\sum_{j \neq i} d_{ij} (1 - x_j)$ и свой порог конформности $\theta_i$.

[1] Символ с обозначает конформность – conformity, а а - анти-конформность – anti-conformity.

С помощью следующего примера, рассмотренного в Таблица 1, найдем условия на параметры $d_{ij}$ и $\theta_i$, при которых осуществляется сценарий принятия инноваций, описанный во введении. Пусть $n=4$ и $N_a=\{1\}$ – множество анти-конформистов, $N_c=\{2,3,4\}$ – множество конформистов. Каждое последующее состояние обуславливается предыдущим состоянием и параметрами порогов и влияний агентов. Последовательность состояний системы описывается следующей таблицей. В первом столбце – номер шага, во втором – ситуация, соответствующая шагу, а в третьем – условия перехода к следующему шагу.

Таблица 1 – Сценарий принятия инноваций

| Шаг | Ситуация $x$ | Условия перехода |
|---|---|---|
| 0 | $(0,0,0,0)$ | $\{1\}\in N_a$ |
| 1 | $(1,0,0,0)$ | $\theta_2<d_{21},\theta_3>d_{31},\theta_4>d_{41}$ |
| 2 | $(1,1,0,0)$ | $\theta_1<1-d_{12},\theta_3<d_{31}+d_{32},\theta_4>d_{41}+d_{42}$ |
| 3 | $(1,1,1,0)$ | $\theta_1<1-(d_{12}+d_{13})$ |
| 4 | $(1,1,1,1)$ | |
| 5 | $(0,1,1,1)$ | $\theta_2<d_{23}+d_{24},\theta_3<d_{32}+d_{34},\theta_4<d_{43}+d_{42}$ |
| 6 | $(0,1,1,1)$ | |

Все описанные условия сценария можно свести к следующим:

$\theta_1<1-(d_{12}+d_{13})$; $\theta_2<\mathbf{min}\{d_{21},d_{23}+d_{24}\}$; $d_{31}<\theta_3<d_{32}+d_{34}$; $d_{41}<\theta_4<d_{43}+d_{42}$.

Обозначим через $G$ следующую игру в нормальной форме $\left(\{0,1\}^n,\left\{u_i^c\right\}_{i\in N_c},\left\{u_i^a\right\}_{i\in N_a},N=N_c\cup N_a\right)$.

Равновесием Нэша ([9]) в чистых стратегиях в игре $G$ назовем такую ситуацию $x^N$, что для всех $x_i\in\{0,1\}$ справедливы следующие неравенства:

(3) $u_i^c\left(x_i^N,x_{-i}^N\right)\ \ u_i^c\left(x_i,x_{-i}^N\right),i\in N_c;$

(4) $u_i^a\left(x_i^N,x_{-i}^N\right)\ \ u_i^a\left(x_i,x_{-i}^N\right),i\in N_a.$

С помощью следующей теоремы условия равновесия Нэша могут быть сформулированы в более простой линейной форме.

***Утверждение 1.*** Для того чтобы ситуация $x^*$ была равновесием Нэша в игре $G$ необходимо и достаточно, чтобы $x^*$ являлось решением следующей системы двойных неравенств:

(5) $\theta_i \geq \sum_{j \neq i} d_{ij} x_j - x_i \geq \theta_i - 1, i \in N_c;$

(6) $\theta_i \geq \sum_{j \neq i} d_{ij} \left(1 - x_j\right) - x_i \geq \theta_i - 1, i \in N_a.$

*Достаточность*. Пусть $x^*$ является решением систем (5) и (6). Рассмотрим сначала множество конформистов, т.е. предположим, что $i \in N_c$. Далее предположим, что $x_i^* = 1$. Тогда, подставляя это значение в правую часть неравенства (5), получим:

(7) $\sum_{j \neq i} d_{ij} x_j^* - \theta_i \geq 0.$

Из неравенства (7) следует, что изменение действия $x_i^* = 1$ на $x_i^* = 0$ не увеличит целевую функцию (1). Предположим теперь, что $x_i^* = 0$, тогда, исходя из левой части неравенства (5), получим:

(8) $\sum_{j \neq i} d_{ij} x_j^* - \theta_i \leq 0.$

Из неравенства (8) следует, что изменение действия $x_i^* = 0$ на $x_i^* = 1$ не увеличит целевую функцию (1). Рассмотрим теперь множество анти-конформистов, т.е. предположим, что $i \in N_a$. Далее предположим, что $x_i^* = 1$. Тогда, подставляя это значение в правую часть неравенства (6), получим:

(9) $\sum_{j \neq i} d_{ij} (1 - x_j^*) - \theta_i \geq 0.$

Из неравенства (9) следует, что изменение действия $x_i^* = 1$ на $x_i^* = 0$ не увеличит целевую функцию (2).

Предположим теперь, что $x_i^* = 0$, тогда, исходя из левой части неравенства (6), получим:

(10) $\sum_{j \neq i} d_{ij} (1 - x_j^*) - \theta_i \leq 0.$

Из неравенства (10) следует, что изменение действия $x_i^* = 1$ на $x_i^* = 0$ не увеличит целевую функцию (2).

Таким образом, изменение стратегии любого игрока в состоянии $x^*$ не увеличивает значения его целевой функции, т.е. выполнено условия равновесия Нэша (3) и (4).

*Необходимость*. Пусть $x^*$ не удовлетворяет системе неравенств (5). Это означает, что существует $i_0 \in N_c$ такое, что справедливо хотя бы одно из следующих неравенств:

(11) $\sum_{j \neq i_0} d_{i_0 j} x_j^* - x_{i_0}^* < \theta_{i_0} - 1$

либо

(12) $\theta_{i_0} < \sum_{j \neq i_0} d_{i_0 j} x_j^* - x_{i_0}^*.$

Значение правой части неравенства (11) отрицательно, т.к. $\theta_{i_0} < 1$ по определению, поэтому должно быть выполнено $x^*_{i_0} = 1$, т.к. $\sum_{j \neq i_0} d_{i_0 j} x^*_j \geq 0$ по определению. Тогда из неравенства (11) следует, что $\sum_{j \neq i_0} d_{i_0 j} x^*_j < \theta_{i_0}$. Из этого следует, что значение целевой функции (1) для игрока $i_0$ отрицательно. Значит, $x^*$ в случае (11) не является равновесием Нэша.

Значение левой части неравенства (12) положительно, т.к. ($\theta_{i_0} > 0$ по определению, поэтому $x^*_{i_0} = 0$, т.к. $\sum_{j \neq i_0} d_{i_0 j} x^*_j \leq 1$ по определению. Тогда из неравенства (12) следует, что $\theta_{i_0} < \sum_{j \neq i_0} t_{i_0 j} x^*_j$. Из этого следует, что значение $x^*_{i_0} = 0$ не является наилучшим ответом игрока на обстановку. Значит, $x^*$ в случае (12) не является равновесием Нэша для конформиста. Пусть $x^*$ не удовлетворяет системе неравенств (6). Это означает, что существует $i_0 \in N_a$ такое, что справедливо хотя бы одно из следующих неравенств:

(13) $\sum_{j \neq i_0} d_{i_0 j}(1 - x^*_j) - x^*_{i_0} < \theta_{i_0} - 1,$

либо

(14) $\theta_{i_0} < \sum_{j \neq i_0} d_{i_0 j}(1 - x^*_j) - x^*_{i_0}.$

Значение правой части неравенства (13) отрицательно, т.к. $\theta_{i_0} < 1$ по определению, поэтому должно быть выполнено $x^*_{i_0} = 1$, т.к. $\sum_{j \neq i_0} d_{i_0 j}(1 - x^*_j) \geq 0$ по определению. Тогда из неравенства (13) следует, что $\sum_{j \neq i_0} d_{i_0 j}(1 - x^*_j) < \theta_{i_0}$. Из этого следует, что значение целевой функции (2) для игрока $i_0$ отрицательно. Значит, $x^*$ в случае (13) не является равновесием Нэша.

Значение левой части неравенства (14) положительно, т.к. $\theta_{i_0} > 0$ по определению, поэтому $x^*_{i_0} = 0$, т.к. $\sum_{j \neq i_0} d_{i_0 j} x^*_j \leq 1$ по определению. Тогда из неравенства (14) следует, что $\theta_{i_0} < \sum_{j \neq i_0} d_{i_0 j}(1 - x^*_j)$. Из этого следует, что значение $x^*_{i_0} = 0$ не является наилучшим ответом игрока на обстановку. Значит, $x^*$ в случае (14) не является равновесием Нэша для конформиста.

Таким образом, из невыполнения системы неравенств (5), (6) следует, что $x^*$ не является равновесием Нэша. Необходимость доказана от противного.

## Список литературы


[1] Бреер В. В. Стохастические модели социальных сетей // Управление большими системами.– 2009. – №27. С. 169 – 204.

[2] Бреер В.В. Теоретико-игровая модель неанонимного порогового конформного поведения // Управление большими системами. – 2010. – № 31. – С. 162–176.

[3] Бреер В.В., Новиков Д.А. Модели управлении толпой // Проблемы управления. – 2012. – № 2.

[4] Бреер В.В., Новиков Д.А. Пороговые модели взаимного страхования // Математическая теория игр и ее приложения. – 2011. – Том 3. – № 4. С. 3 – 22.

[5] Бреер В.В., Новиков Д.А. Пороговая модель коррупционного поведения // Системы управления и информационные технологии. – 2011. – № 3. – С. 73 – 75.

[6] Васин А.А. Исследование операций : учеб. пособие для студ. вузов / А.А.Васин, П.С.Краснощеков, В.В.Морозов. – М. : Издательский центр «Академия», 2008.

[7] Гаврилец Ю.Н, Фомина Ю.В. Моделирование динамики социальной установки (на примере отношения студентов к рекламе на телевидении). // Социология. 2002. №15.

[8] Кон И. С. Социологическая психология. Москва. Институт практической психологии. Воронеж: МОДЭК, 1999.

[9] Губко М.В., Новиков Д.А. Теория игр в управлении организационными системами. – М.: Синтег, 2002. – 148 с.

[10] Bernheim D. A Theory of Conformity, Journal of Political Economy, 1994, vol. 102, no. 5

[11] Granovetter M. Threshold Models of Collective Behavior, AJS Volume 83 Number 6, pp 1420-1443, 1978.

# СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ И СТАЙНОГО АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ

**В.Б. Звонков**

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева
660014, Красноярск, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31, Россия
vladimirzvonkov802@yandex.ru
тел: +7-913-585-69-35

***Ключевые слова:*** *самонастраивающийся генетический алгоритм, стайный алгоритм, статистическое моделирование, статистический анализ*

**Abstract**

The most perspective and developing global optimization methods are competing methods, such as genetic algorithm (and its varieties) and particle swarm optimization algorithms at the modern stage of global optimization methods development of multiextremal functions, nondifferentiable functions, ravine surface functions and other complex criterion functions (functional, quality criteria, algorithmically and table of predefined functions) for classical methods optimization. The particle swarm optimization algorithms are studied to a lesser extent than genetic algorithms, many questions of tuning and the use of this approach are still remain uninvestigated, which is very important and the author of this research is interesting in this approach, as well as, probably, scientific community. In this scientific research two competing methods are compared and the correlation of some parameters of PSO and numerical efficiency criteria is obtained by author.

## Введение

Генетические алгоритмы возникли в результате наблюдений за функционированием биологических систем. В 1975 году Холланд опубликовал теорему схем в своей книге [1], которая является аналитическим обоснованием сходимости генетических алгоритмов с фиксированным набором параметров и предложил основную идею генетических операторов и репродуктивный план, а Д. Гольдберг в своей книге [2] ввел впервые термин «генетический алгоритм», изложил теорию и возможные сферы применения генетических алгоритмов, т.е. внес значимый вклад в развитии теории Джона Холланда. «Генетический алгоритм представляет собой метод, отражающий естественную эволюцию методов решения проблем, и в первую очередь задач оптимизации. Генетические алгоритмы – процедуры поиска, основанные на механизмах естественного отбора и наследования. В них используется эволюционный принцип выживания наиболее приспособленных особей» [3, с.125].

Генетические алгоритмы первоначально применялись для решения задач адаптации [1]. Впервые генетические алгоритмы использовались для решения задач оптимизации, например, в работе [4]. В работе [5] была введена рекомбинация в эволюционных стратегиях. В течение последней четверти 20-го столетия и по сегодняшний день, генетические алгоритмы интенсивно развиваются и уже получили широкое применение в различных областях науки и техники [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]: функциональная оптимизация, синтез и оптимизация систем управления и вычислительных систем, составление расписаний, задачи автоматической классификации, многокритериальные задачи, транспортные задачи, задача коммивояжера, задача о рюкзаке, раскраска графов, настройка и обучение искусственных нейронных сетей с помощью ЭВМ, теория игр и игровое моделирование, биоинформатика, искусственная жизнь и т.д.

Эволюционные алгоритмы применяются для решения многих практических и тестовых задач высокой размерности (в том числе NP и NP-полных) при наличии разношкальных пере-

менных, в которых целевая функция вычисляется по сложному алгоритму и требует значительного времени на одно вычисление, не обладает свойствами унимодальности, выпуклости, дифференцируемости, линейности. В постановке задачи могут участвовать несколько критериев (целевых функций, целевых функционалов или критериев качества), которые должны быть оптимизированы одновременно, причем, зачастую критерии противоречат друг другу, т.е. улучшение решения по одному критерию способствует ухудшению по другому (другим) критерию (критериям) [15, 16, 19]. Ограничения задачи могут образовывать узкую допустимую область, что также оказывает дополнительные трудности при решении задачи и влияет на решение, принимаемое ЛПР.

Метод оптимизации стаей или роем частиц (Particle Swarm Optimization) был предложен следующими учеными в 1995 году: Дж. Кеннеди и Д.К. Эберхарт [17]. Алгоритм PSO, как и генетический алгоритм, моделирует некоторые закономерности, существующие в природе, например, поведение группы птиц или рыб в поисках корма. Алгоритм PSO принципиально отличается от генетического алгоритма отсутствием базовых генетических операторов (селекция, мутация, скрещивание). Суть работы стайного алгоритма состоит в движении частиц, представленных в виде многомерных векторов-координат точек, в вещественном (поисковом) пространстве (в том время как у генетического алгоритма происходят операции с бинарными хромосомами). Частицы изменяют свою скорость и положение в поисковом пространстве согласно расчетным формулам, суть которых состоит в учете собственного опыта частицы (лучшие координаты с точки зрения расстояния до глобального оптимума, полученные самой частицей) и опыта других частиц (лучшие координаты с точки зрения расстояния до глобального оптимума, полученные всеми частицами в совокупности) при исследовании пространства поиска. Настраиваемыми параметрами вещественного алгоритма PSO являются: ограничение на максимальную скорость движения частиц, когнитивный и социальный параметры обучения, число частиц в стае, количество итераций метода, параметры инерции (статические, динамические и др.), ограничение на минимальное и максимальное значения параметра инерции, способ представления роя частиц (в виде звезды, кольца и др.). Влияние перечисленных настроек на эффективность работы вещественного алгоритма PSO неоднозначно и требует исследований при решении каждой конкретной задачи.

Перечислю некоторых ученых-исследователей (т.к. в силу ограниченности объема данной работы нет возможности перечислить всех), занимавшихся исследованием алгоритмов PSO или приложением данных алгоритмов при обучении искусственных нейронных сетей, или применением данных алгоритмов к решению других научно-технических задач: Eberhart R. C., Kennedy J., Simpson P. K., Dobbins R. W, Jenigiri S, Salerno J., Ozcan E., Mohan C., Clerc M., Fukuyama Y., Takayama S., Nakanishi Y., Yoshida H., Shi Y., Dozier G., Homaifar A., Tunstel E, Abido M. A., Adly A. A., Abd-El-Hafiz S. K., Kannan S., Slochanal S. M. R., Subbaraj P., Padhy N. P.

Оба рассматриваемых в данной статье алгоритма являются эвристическими стохастическими алгоритмами прямого поиска, моделируют процессы, происходящие в естественной природе с использованием ЭВМ, и широко применяются при решении задач глобальной оптимизации. Изначально генетические алгоритмы разрабатывались для оперирования с бинарными переменными, а описанный стайный алгоритм для оперирования с вещественными переменными. На сегодняшний день существуют модификации вышеуказанных методов, позволяющие двум исследуемым алгоритмам оперировать как в бинарном, так и в вещественном пространствах.

## 1 Экспериментальная установка и методика эксперимента

Постановка задачи безусловной однокритериальной оптимизации имеет следующий вид. Пусть существует одна целевая функция, оптимум которой необходимо определить, см. (1):

(1) $f(\vec{x}) \to opt$;

здесь $\vec{x} = (x_1, x_2, ..., x_n) \in X$ – вектор решений размерности *n*, $f(\vec{x})$ - целевая функция (целевой функционал, критерий качества, алгоритм вычисления показателя качества).

В качестве тестовых задач безусловной однокритериальной нелинейной оптимизации функций многих (от 2-х до 20-и) вещественных переменных использовался стандартный набор (не рассматривались 7-я и 25-я задачи) задач [18] из 23-х функций (унимодальных, многоэкстремальных, в том числе гибридных). Тестовые задачи обладают следующими свойствами: множество локальных экстремумов, слабо отличающихся от глобального, нерегулярность расположения локальных оптимумов, протяженные овраги в области оптимума, области плато, разворот функций относительно начала координат, нелинейность, недифференцируемость и другие свойства, затрудняющие процесс оптимизации и применение стандартных методов математического программирования, и позволяющие оценить эффективность алгоритмов на различных классах задач. Для тестовых задач безусловной однокритериальной оптимизации первоначально были определены решения в пакете MathCAD 14 (в тех случаях, когда это возможно) с целью сравнения решений, получаемых эволюционными и стайным алгоритмом, с полученными в среде MathCAD 14.

Затем перечисленные тестовые задачи решались стандартным генетическим алгоритмом, классическим стайным алгоритмом и авторскими модифицированными генетическими алгоритмами безусловной однокритериальной оптимизации [19] (бинаризация исходного вещественного пространства). После бинаризации длина хромосом для генетических алгоритмов в ходе экспериментов изменялась дискретно в диапазоне от 48 бит (функция Растригина, размерность вещественного вектора равна 2, дискретность по каждой вещественной переменной составляла 0.000001) до 600 бит (функция Гриванка, [-512; 512], размерность вещественного вектора равна 20, дискретность по каждой вещественной переменной составляла 0.000001). Высокая размерность задач также свидетельствует о неприменимости в некоторых случаях классических алгоритмов математического программирования.

Постановка задачи условной однокритериальной оптимизации в общем виде имеет вид. Пусть существует одна целевая функция, оптимум которой необходимо определить. На переменные функции налагается набор ограничений в виде системы неравенств и (или) равенств. Найденный оптимум должен удовлетворять всем заданным ограничениям, см. формулу (2).

(2) $\begin{cases} f(\vec{x}) \to opt \\ a_i(\vec{x}) \le 0, i = \overline{1, p} \\ b_i(\vec{x}) = 0, i = \overline{p+1, z} \end{cases}$;

здесь $\vec{x} = (x_1, x_2, ..., x_n) \in X$ – вектор решений размерности *n*, удовлетворяющий *z* ограничениям (*p* неравенствам $\vec{a}(\vec{x}) = (a_1(\vec{x}), a_2(\vec{x}), ..., a_p(\vec{x})) \le 0$ и *z-p* равенствам $\vec{b}(\vec{x}) = (b_{p+1}(\vec{x}), b_{p+2}(\vec{x}), ..., b_z(\vec{x})) = 0)$, $f(\vec{x})$ - целевая функция (целевой функционал, критерий качества, алгоритм вычисления показателя качества).

В классическом генетическом алгоритме отсутствует схема учета ограничений задачи оптимизации. Устранить данный недостаток можно несколькими способами: добавление в стандартный генетический алгоритм механизмов учета ограничений в виде штрафных функций (статические, динамические, адаптивные, смертельные штрафы) или специализированных генетических операторов (лечение, поведенческая память).

В качестве практических задач приведены результаты решения 3-х прикладных задач условной однокритериальной оптимизации, основанных на реальных данных.

В каждом численном эксперименте использовались следующие настройки генетических алгоритмов: размер популяции – от 100 до 300; число поколений – от 100 до 300; вероятность

скрещивания – 0.99; число случайных реализаций алгоритма – 500 или 1000. Рассматриваемая область задана в [18]. Дискретность вещественных переменных (точность поиска глобального оптимума): 0.000001. Оценка эффективности стохастических алгоритмов однокритериальной оптимизации осуществлялась по следующим критериям эффективности в порядке убывания значимости критерия при сравнении: надежность работы, скорость сходимости к оптимуму, время функционирования. Рассмотрим определения критериев, согласно теории вероятностей и математической статистике. Выборочное среднее, т.е. состоятельная, несмещенная и асимптотически нормально распределенная оценка математического ожидания СВ; оценка среднеквадратического отклонения СВ, т.е. корень квадратный из состоятельной несмещенной оценки дисперсии СВ, т.к. состоятельная смещенная оценка дисперсии умножена на коэффициент $\frac{n}{n-1}$, где $n=500$, $n=1000$ – объем выборки из генеральной совокупности).

*Надежность* - отношение числа запусков, в которых алгоритм обнаруживает известный оптимум с требуемой точностью, к общему числу статистически независимых прогонов. *Скорость сходимости* - средний номер поколения (или среднее количество вычислений целевой функции, среднее количество вычислений целевой функции и ограничений), при которых алгоритм впервые обнаруживает экстремум с требуемой точностью. *Время функционирования* – время расчета (в секундах) для алгоритмов, измеряемое от начала и до окончания работы (использование выделенных ресурсов) с целью объективного сравнения быстродействия алгоритмов при различных настройках, усредненное по статистически независимым прогонам.

Для проверки работоспособности и сравнения эффективности стохастических алгоритмов однокритериальной оптимизации проводились полные наборы численных экспериментов на каждой задаче, включающие все возможные комбинации параметров рассматриваемого алгоритма (таблица 1), с последующим расчетом критериев эффективности алгоритмов и статистическим анализом в пакете обработки данных Statistica с использованием непараметрических критериев Вилкоксона, Манна-Уитни, критерия знаков и дисперсионного анализа ANOVA (с целью проверки статистической значимости расхождения значений критериев эффективности между различными настройками и алгоритмами, таблица 2). Стандартный генетический алгоритм безусловной оптимизации имеет следующие настройки.

1) Способ кодирования индивидов в бинарную строку: последовательная запись координат, чередование бит индивидов;
2) Тип селекции: пропорциональная (рулеточная), турнирная (2), турнирная (4), турнирная (9), ранговая;
3) Тип скрещивания: одноточечное, двухточечное, равномерное;
4) Тип мутации: слабая, средняя, сильная;
5) Способ формирования нового поколения: только потомки, лучшие индивиды из родителей и потомков;
6) Концепция элитизма (1 лучший индивид передается в следующее поколение) и ее отсутствие.

Таким образом, на каждой задаче рассмотрено и протестировано 360 комбинаций настроек стандартного генетического алгоритма при каждом фиксированном размере популяции, количестве поколений и количестве статистически независимых запусков алгоритма. Информация о количестве протестированных настроек для остальных алгоритмов указана в таблице 1.

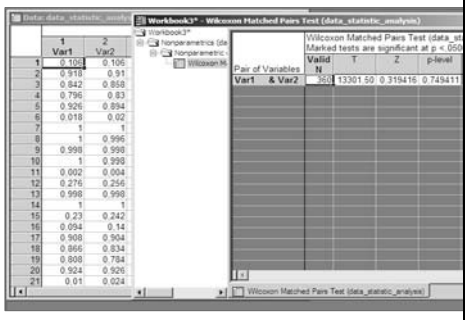
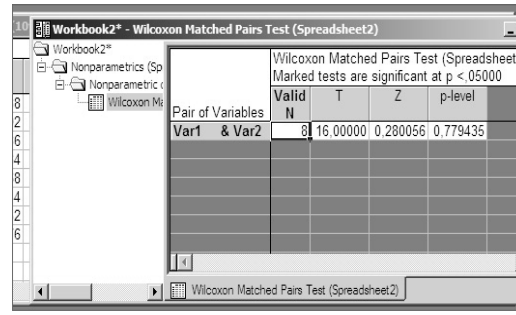
К генетическому алгоритму условной оптимизации необходимо добавить 8 методов учета ограничений: статические штрафы, динамические штрафы, адаптивные штрафы, «смертельные» штрафы, поведенческая память, «лечение», «лечение2», «лечение+смертельные штрафы», «лечение2+смертельные штрафы». Для каждой тестовой и реальной задачи условной однокритериальной оптимизации осуществлялась настройка оптимальных параметров методов учета ограничений с последующим использованием статистического анализа. Настройка

каждого параметра в методе учета ограничений проводилась при фиксированных значениях остальных параметров. 5 лучших методов учета ограничений по результатам исследований автора были включены для использования в генетических алгоритмах [24].

Таблица 1 – Количество комбинаций настроек генетических алгоритмов однокритер. оптимизации

| Тип генетического алгоритма | Безусловная оптимизация | Условная оптимизация |
|---|---|---|
| Стандартный (Holland, Goldberg) | 360 | 1800 |
| Автонастройка мутации (Звонков) | 120 | 600 |
| Автонастройка скрещивания (Звонков) | 120 | 600 |
| Автонастройка селекции (Звонков) | 72 | 360 |
| Автонастройка мутации и скрещивания (Звонков) | 40 | 200 |
| Автонастройка селекции и мутации (Звонков) | 24 | 120 |
| Автонастройка селекции и скрещивания (Звонков) | 24 | 120 |
| Автонастройка селекции, мутации и скрещивания (Звонков) | 8 | 40 |

Таблица 2 – Пример статистической обработки данных

| Стандартный генетический алгоритм | Самонастраивающийся генетический алгоритм (автоматическая настройка селекции, мутации, скрещивания) |
|---|---|
|  |  |
| Пример одного из результатов статистического анализа для надежностей работы стандартного алгоритма с использованием критерия Вилкоксона и пакета статистической обработки данных Statistica. | Пример одного из результатов статистического анализа для надежностей работы самонастраивающегося алгоритма с использованием критерия Вилкоксона и пакета статистической обработки данных Statistica. |
| Вывод для двух тестов: гипотеза о равенстве законов распределения (для значений критериев эффективности, рассчитанных 2 раза для каждого алгоритма по 1000 независимым запускам) не противоречит экспериментальным данным, гипотеза о сдвиге отвергается | |

Для получения наглядного представления результатов производилось усреднение численных значений критериев эффективности стохастических алгоритмов на множестве задач безусловной однокритериальной оптимизации и определение разброса критериев эффективности алгоритмов: разброс надежности работы, разброс скорости сходимости, разброс времени функционирования (минимальное и максимальное соответствующие значения критерия эффективности).

На следующем этапе исследований вышеуказанные задачи решались с помощью стандартного алгоритма PSO [17]. Количество вычислений целевой функции для различных размерностей вещественного вектора для вещественного PSO приведено в таблице 3. Данные вычислительные ресурсы использовались на всех задачах. Увеличение вычислительного ресурса при увеличении размерности задачи в вещественном пространстве производилось с целью сравнения алгоритмов по большему количеству критериев эффективности (в том числе по надежности работы, скорости сходимости к оптимуму, разбросу скоростей сходимости к оптимуму). Настройки алгоритма приведены в таблице 4.

Таблица 3 – Распределение ресурсов для алгоритма PSO при различной размерности

| Размерность вещественного вектора независимых переменных | Распределение ресурсов | | Количество ресурсов (вычислений целевой функции) |
|---|---|---|---|
| | Количество частиц | Количество поколений | |
| 2 | 100 | 100 | 10 000 |
| 5 | 300 | 300 | 90 000 |
| 10 | 1000 | 1000 | 1000 000 |
| 20 | 5000 | 5000 | 25 000 000 |

Таблица 4 – Фиксированные параметры стайного многоагентного алгоритма глобальной оптимизации

| Название параметра | Фиксированное значение |
|---|---|
| $\tilde{N}$ | 2 |
| $\tilde{N}$ | 2 |
| Параметр инерции статический | 0.72 |
| Число статистически независимых запусков | 1000 |
| Топология группы частиц | «Звезда» |
| Тип PSO | Вещественный |

Оценка эффективности алгоритма PSO осуществлялась по тем же критериям эффективности, как и для эволюционных алгоритмов.

Дополнительные критерии эффективности использовались для сравнения только в тех случаях, когда количество выделенных ресурсов для алгоритмов было недостаточно для расчета основных критериев эффективности при решении задач высокой размерности.

*Среднее значение целевой функции* – арифметическое среднее (по всем запускам) минимальных значений целевой функции, полученных рассматриваемым алгоритмом за время функционирования.

*Среднеквадратическое отклонение* от *среднего значения целевой функции* – это оценка среднеквадратического отклонения, полученного алгоритмом решения, от *среднее значение целевой функции*.

*Среднее расстояние до глобального экстремума* – арифметическое среднее (по всем запускам) расстояний в Евклидовом пространстве от минимального (наилучшего) полученного алгоритмом решения до известного глобального экстремума.

*Среднеквадратическое отклонение* от *среднего расстояния до глобального экстремума* – это оценка среднеквадратического отклонения расстояний в Евклидовом пространстве от минимального (наилучшего) полученного алгоритмом решения до *среднее расстояние до глобального экстремума*.

Для получения репрезентативного представления результатов также производилось усреднение численных значений критериев эффективности стохастических алгоритмов на множестве задач однокритериальной оптимизации и определение разброса критериев эффектив-

ности алгоритмов. Аналогично тестированию эволюционных алгоритмов проводился статистический анализ полученных результатов.

Для объективного сравнения результатов численных экспериментов (а именно времени функционирования алгоритмов, стабильности функционирования) и исключения влияния операционной системы или программ, фрагментации жесткого диска и других факторов, полный цикл тестирования алгоритмов в каждой из операционных систем осуществлялся после форматирования системного жесткого диска персональных компьютеров и переустановки операционной системы и необходимых драйверов и других программ.

## 2 Алгоритмы, программные системы, аппаратное и программное обеспечение

Автором настоящей работы были разработаны модификации методов и реализованы в виде трех программных систем (Intelligence Technologies – Self-Adapting Genetic Algorithm (IT-SAGA) - № государственной регистрации программы для ЭВМ в Роспатенте 2011611120 от 3.02.2011, система автоматизированного нейросетевого и эволюционного моделирования, оптимизации, прогнозирования), являющихся как СППР, так и экспертными системами. Обозначенные программные системы включают в себя следующий алгоритмический инструментарий: стандартные и авторские генетические алгоритмы (ГА) для решения задач безусловной однокритериальной оптимизации [19]; 5 методов учета ограничений [20, 21] для задач условной однокритериальной оптимизации (штрафные функции и специализированные операторы); стандартные и авторские ГА для решения задач безусловной и условной многокритериальной оптимизации [19]; метод SPEA [22]; метод полного перебора; оригинальные процедуры локального поиска; многослойный персептрон Ф. Розенблатта в общем виде с настраиваемыми параметрами (кол-во слоев, кол-во нейронов, пороговые значения, активационные функции, структура искусственной нейронной сети и др.); оптимизационные методы параметров искусственных нейронных сетей (алгоритм обратного распространения ошибки, модифицированная процедура стохастической аппроксимации градиента целевой функции, авторский самонастраивающийся генетический алгоритм, авторский гибридный генетический алгоритм); комитеты (арифметическое среднее и взвешенное арифметическое среднее) искусственных нейронных сетей (ИНС); ручной и автоматический выбор структуры ИНС и активационных функций с помощью модифицированных ГА; автоматизированное тестирование ГА и ИНС на множестве настроек и задач; вывод прогресса работы алгоритмов и автоматизированного тестирования, численных значений критериев эффективности, графиков сходимости для ГА, допустимых областей, постановок задач, множества и фронта Парето; вывод процесса обучения ИНС и процесса эволюции решений для ГА; графический пользовательский интерфейс; справочная система; файловые потоки ввода-вывода информации; вспомогательные функции для работы основного алгоритмического ядра вышеуказанных программных систем. Разработанные системы обеспечивают высокое быстродействие (т.к. разрабатываемые алгоритмы многократно модифицировались вручную, а также проводилась оптимизация кода компилятором), высокую стабильность (проводилась отладка и статический анализ кода с помощью CppCheck) и эффективность работы, что было подтверждено продолжительными тестами (от 2-х до 4-х месяцев функционирования ПК без выключения каждое, на протяжении нескольких лет) в разных семействах операционных систем (Windows, Linux) и на 3-х разных конфигурациях ЭВМ (ноутбук Acer Extensa 5620, стационарный ПК с ЦП Intel Core i7-920 (Bloomfield) 2.66ГГц, 3.6 ГГц/ Cooler Master GeminII / Gigabyte GA-EX58-UD3R (rev. 1.0)/ БП Chieftec [APS-500S] 500W, ATX v2.2, EPS12V, Active PFC/ Radeon HD 4550 / ОЗУ 2 * DIMM DDR3 2048MB PC10666 1333MHz Kingston/ ЖД 3.5” Hitachi 160 Гб, стационарный ПК с ЦП AMD Athlon-64 2800+ 1.8 ГГц, 2.2 ГГц/ Radeon 9600 Pro / ОЗУ DDR 512 Мб / ЖД 3.5” Hitachi 160 Гб). Комплектующие в стандартной конфигурации (ноутбук) и в авторских конфигурациях совместимы и стабильно работают в комплексе, что было подтверждено с помощью синтети-

ческих тестов и утилит (Memtest, Everest, 3DMark, PC Mark, Linpack, Perfomance Test, SiSoftware Sandra, SpeedFan, System Stability Tester, Video Memory Stress Test и др.) и вышеописанных математических расчетов.

А также коллективом авторов и автором данной работы была разработана программная система «Автоматизированная система решения сложных задач глобальной оптимизации многоагентными стохастическими алгоритма (GOLEM-SA)», № государственной регистрации программы для ЭВМ в Роспатенте 2011611158 от 4.02.2011. GOLEM-SA позволяет специалистам решать сложные задачи условной и безусловной глобальной оптимизации в различных областях знаний, используя многоагентные стохастические алгоритмы и технологии их автоматизированной настройки (Ефимов С.Н. и др. Автоматизированная система глобальной оптимизации многоагентными стохастическими алгоритмами/ С.Н. Ефимов, Е.С. Семенкин, П.В. Галушин, И.А. Панфилов / Программные продукты и системы, №3, 2011). Методы глобальной оптимизации, реализованные в GOLEM-SA: мультистарт локального поиска, классический генетический алгоритм, асимптотический вероятностный генетический алгоритм, метод оптимизации роем частиц (Particle swarm optimization, PSO), метод Хука-Дживса. Автором статьи также были реализованы метод Хука-Дживса и PSO (J. Kennedy, R. Eberhart).

## 3 Результаты численных экспериментов

В нижеприведенных таблицах около каждого алгоритма указаны фамилия и инициалы автора алгоритма. В таблице 5 приведены результаты тестирования канонического генетического алгоритма, стайного алгоритма PSO и модифицированных авторских алгоритмов [19], [24], [26] на 23-х тестовых задачах (размерность вещественного вектора равна 2) безусловной однокритериальной минимизации, проведенного автором данной работы. Разработанный в [19] самонастраивающийся ГА с усиленной локальной сходимостью продемонстрировал в данной работе наилучшие результаты решения множества задач CEC-2005.

Таблица 5 – Результаты тестирования алгоритмов на 23-х тестовых задачах безусловной оптимизации (1000 независимых случайных реализаций алгоритмов)

| Тип алгоритма | Разброс надежностей, средняя надежность | Разброс времени работы (с./1000), округл. до целых | Разброс средних поколений, не учитывая 0-го (когда алгоритм впервые обнаруживает оптимум с требуемой точностью) | Разброс среднего количества вычислений целевой функции (до первого обнаружения оптимума с требуемой точностью) |
|---|---|---|---|---|
| Генетические алгоритмы | | | | |
| Классический ГА (Holland J. H., Goldberg D.E.) | [0, 0.997] | [22, 75] | [20, 86] | [2148, 8726] |
| Автонастройка селекции (Звонков В.Б.) | [0.684, 1] | [34, 69] | [24, 60] | [2463, 6112] |
| Автонастройка мутации (Звонков В.Б.) | [0, 0.999] | [21, 63] | [21, 87] | [2153, 8790] |
| Автонастройка скрещивания (Звонков В.Б.) | [0, 1] | [28, 76] | [22, 87] | [2337, 8815] |
| Автонастройка селекции и мутации (Звонков В.Б.) | [0.862, 0.993] | [33, 67] | [27, 40] | [2803, 4077] |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Автонастройка мутации и скрещивания (Звонков В.Б.) | [0, 0.996] | [27, 70] | [22, 83] | [2321, 8397] |
| Автонастройка селекции и скрещивания (Звонков В.Б.) | [0.237, 1] | [36, 61] | [28, 69] | [2883, 6989] |
| Самонастраивающийся ГА (Звонков В.Б.), [19] | [0.925, 1], 0.954 | [39, 61] | [18, 27], 22 | [1888, 2801], 2250 |
| **Самонастраивающийся ГА + локальный поиск (Звонков В.Б.), [19]** | **[0.953, 1], 0.982** | **[47, 76]** | **[5, 15], 11** | **[1128, 3204], 2104** |
| Коэволюционный алгоритм безусловной оптимизации (Сергиенко Р.Б.), 8 тестовых задач [23] | [0.24, 1], 0.83 (результат из [23]) | нет данных | [26, 50], 33 (результат из [23]) | [2580, 4960], 3259 (результат из [23]) |
| Стайный алгоритм PSO (J. Kennedy, R. Eberhart) | | | | |
| Классический PSO (тесты на ноутбуке Acer Extensa 5620) | [0.013, 0.997], 0.384 | [30, 70] | [15, 99], 44.698 | [1612, 9986] |

Результаты решения прикладных задач однокритериальной оптимизации, основанных на реальных данных конкретных организаций, получены автором данной работы ранее в [19], [24], [26]. Описания практических задач см. в [19], [24], [26], решения в многокритериальной постановке приведены в работах [19], [26].

**Заключение**

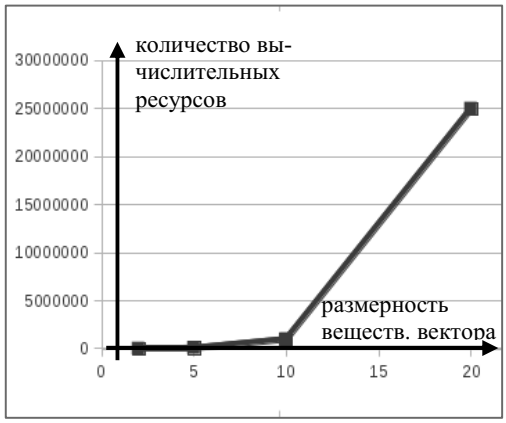
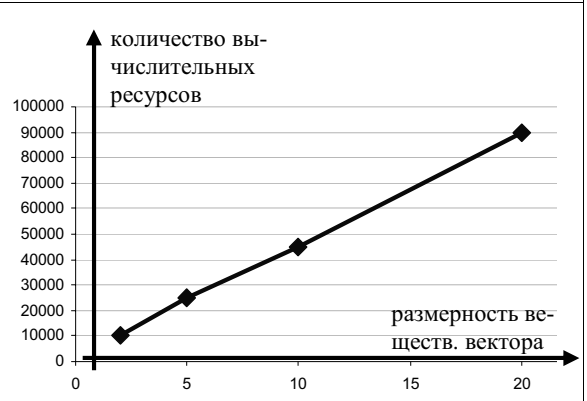
Стайный алгоритм (PSO) и генетический алгоритм имеют свои преимущества, недостатки и сферу использования. По результатам проведенных исследований, статистическому и логическому анализу полученных таблиц с численными значениями выше обозначенных критериев эффективности можно сделать следующие выводы:

1) Стандартный генетический алгоритм и стандартный алгоритм PSO можно применять в случае достаточной для настройки данных алгоритмов квалификации исследователя и опыта решения задач подобного рода, т. к. процесс выбора настроек случайным образом или необоснованным образом может привести к получению как удовлетворительных значений критериев эффективности, так и неудовлетворительных (разброс надежности работы, например, изменяется в диапазоне от 0 до 1), что следует признать неприемлемым при решении большинства задач из реальной практики, а также в условиях ограниченных временных, человеческих, материальных ресурсов. Кроме того, в случае достаточной квалификации исследователя необходим также высокий уровень априорной информации о решаемой задаче с целью выбора между настройками с локальным, глобальным характером сходимости или их комбинацией. Проводить каждый раз решение незнакомой или сложной задачи с использованием всех рассматриваемых комбинаций настроек (с целью выбора наилучшей настройки) не всегда представляется возможным.
2) Канонический генетический алгоритм сравним с классическим алгоритмом PSO по эффективности, но оптимальные настройки алгоритмов различны на каждой задаче и при увеличении размерности задач увеличивается разброс значений всех критериев эффективности алгоритмов (негативный эффект).
3) Авторский самонастраивающийся бинарный генетический алгоритм превосходит как канонический бинарный генетический алгоритм, так и вещественный алгоритм PSO при всех

размерностях задач. Разброс показателей эффективности самонастраивающегося генетического алгоритма является приемлемым даже для случайного выбора остальных настроек.

4) Была исследована зависимость эффективности работы алгоритма PSO при увеличении размерности вещественного вектора от ограничения максимальной скорости движения частиц и было установлено, что лучшее значение ограничения скорости сохраняется при незначительном увеличении размерности задачи, а при значительном изменяется. Количество неэффективных настроек увеличивается при увеличении размерности задач в силу уменьшения эффективности алгоритма PSO и требований к значительному увеличению количества вычислительных и временных ресурсов для алгоритма.
5) У вещественного алгоритма PSO наблюдается экспоненциальный рост используемых алгоритмом вычислительных ресурсов (количество частиц * количество итераций) при дискретном увеличении размерности вещественного вектора в диапазоне от 2-х до 20-и, а у авторского самонастраивающегося бинарного генетического алгоритма наблюдается близкий к линейному рост используемых алгоритмом вычислительных ресурсов (количество индивидов * количество поколений) при аналогичном увеличении размерности задач (увеличение длины бинарных хромосом от 48 бит до 600 бит соответственно), см. таблица 6. Данное обстоятельство может стать решающим при выборе самонастраивающегося генетического алгоритма вместо стандартного вещественного PSO в условиях ограниченных ресурсов.

Таблица 6 – Зависимость количества используемых вычислительных ресурсов от размерности задач

| Вещественный алгоритм PSO | Авторский самонастраивающийся бинарный ГА |
|---|---|
|  |  |





6) Неоспоримым преимуществом вещественного алгоритма PSO является простота программной реализации, более высокая интуитивная понятность и наглядная геометрическая интерпретация в сравнении как со стандартным, так и с авторскими самонастраивающимися генетическими алгоритмами, что может являться решающим обстоятельством при выборе алгоритма PSO конечным программистом, а также в ситуации малой размерности задачи и (или) неограниченности вычислительных ресурсов.

Таким образом, если рассматривать все критерии в комплексе с точки зрения наилучшего решения задачи, ограниченных временных, материальных, человеческих ресурсов, отсутствию возможности тщательной настройки параметров алгоритмов, отсутствию сведений о решаемой задачи (что более характерно для реальной практики), то использование авторского самонастраивающегося бинарного генетического алгоритма является предпочтительным даже для эксперта в области эволюционной оптимизации, т. к. данный алгоритм более универсален в сравнении с остальными рассмотренными и протестированными алгоритмами как на тесто-

вых, так и на прикладных задачах. При сочетании авторского самонастраивающегося бинарного ГА с локальным поиском наблюдается улучшение всех критериев эффективности алгоритма, кроме времени функционирования, и алгоритм обеспечивает более эффективное решение некоторых тестовых и прикладных задач в сравнении с ранее известными результатами [19].

Необходимо отметить, что все выводы верны в рамках данного исследования и данной методики экспериментов, а т. к. тестовые задачи стандартны и общеприняты при тестировании эволюционных алгоритмов, а методика экспериментов методом многократных (500, 1000) независимых прогонов с последующим расчетом критериев эффективности и статистическим анализом проводилась для обработки результатов работы стохастических алгоритмов, то полученные в работе результаты обладают высокой степенью достоверности и неслучайности, что также подтвердилось по трем непараметрическим критериям (выдвинутые гипотезы не противоречили экспериментальным данным) и дисперсионным анализом ANOVA (для повторно измеренных критериев эффективности проверялась значимость различий).

**Список литературы**


[1] Holland J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems / J.H. Holland - Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975.–228 p.

[2] Goldberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning / D.E. Goldberg. - Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.

[3] Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И.Д. Рудинского. / Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.: ил.

[4] Растригин, Л.А. Случайный поиск — специфика, этапы истории и предрассудки. Вопросы кибернетики. Вып. 33 (1978), с. 3–16.

[5] Schwefel H. P. Numerical optimization of computer models. Chichester: Wiley, 1981.

[6] Бугаев, А.С. Система оптимизации на генетических алгоритмах / А.С. Бугаев, В.Б. Горский // Информационные технологии и вычислительные системы. - № 3. - 2007.

[7] Васильев, В.И. Интеллектуальные системы управления с использованием генетических алгоритмов: Учеб. пособие / В.И. Васильев, Б.Г. Ильясов – Уфа: УГАТУ, 1999. – 105 с.

[8] Емельянова, Т.С. Решение транспортных задач с использованием комбинированного генетического алгоритма. / Т.С. Емельянова, В.М. Курейчик // Труды одиннадцатой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием - КИИ-2008: в 3-х т. - М.: URSS, 2008 с. 157-161.

[9] Еремеев, А.В. Разработка и анализ генетических и гибридных алгоритмов для решения задач дискретной оптимизации. Дисс. канд.физ.-мат.наук. Омск, 2000.

[10] Керимов, А.К. Эволюционный алгоритм для решения задачи автоматической классификации / А.К. Керимов, Р.И. Давудова // Искусственный интеллект и принятие решений. - №4. – 2009 с. 74-79.

[11] Комарцова, Л.Г. Подход к построению нечеткого параллельного генетического алгоритма / Л.Г. Комарцова // Труды одиннадцатой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием - КИИ-2008: в 3-х т. - М.: URSS, 2008 с. 242-245.

[12] Курейчик, В.М. Нечеткий оператор кроссинговера для задачи трассировки коммутационного блока / В.М. Курейчик, Д.С. Кныш // Труды одиннадцатой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием - КИИ-2008: в 3-х т. Т.1 - М.: URSS, 2008 с. 179-191.

[13] Левин, М.Ш. Эвристический алгоритм для многокритериальной блочной задачи о рюкзаке / М.Ш. Левин, А.В. Сафонов // Искусственный интеллект и принятие решений. - №4. – 2009 с. 53-64.

[14] Khloudova M. Classification of scheduling algorithms for real-time systems // Proc. of International Workshop on Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering. – 1999. – Vol. 3687. – P. 228-231.

[15] Hallam N., Kendall G., and Blanchfield P. Solving Multi-objective Optimization Problems Using the Potential Pareto Regions Evolutionary Algorithm, in T.P. Runarsson et al (Eds.): Parallel problem solving from nature (PPSN IX: 9th international conference), LNCS 4193, pp. 503-512, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.

[16] Jurgen Branke, Kalyanmoy Deb, Henning Dierolf, and Matthias Osswald. Finding Knees in Multi-objective Optimization, in X. Yao et al. (Eds.): Parallel problem solving from nature (PPSN VIII: 8th international conference), LNCS 3242, pp. 722-731, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004.
[17] Kennedy, J. Particle swarm optimization / J. Kennedy, R. Eberhart // in Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks. – Piscataway, 1995. – P. 1942 – 1948.
[18] Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC 2005 Special Session on Real-Parameter Optimization // P. N. Suganthan, N. Hansen, J. J. Liang et al. / Technical Report, Nanyang Technological University, Singapore And KanGAL Report Number 2005005 (Kanpur Genetic Algorithms Laboratory, IIT Kanpur), May 2005 - 50 p.
[19] Звонков В.Б. Разработка и применение системы IT-SAGA решения задач безусловной, условной однокритериальной и многокритериальной оптимизации при получении новых решений в региональных экономических задачах / В.Б. Звонков / Интеллектуальные системы и технологии: современное состояние и перспективы. Сборник научных трудов Международной летней школы-семинара по искусственному интеллекту для студентов, аспирантов и молодых ученых (Тверь-Протасово, 1-6 июля 2011 г.). – Тверь: Изд-во Тверского государственного технического университета, 2011 – с. 183-195.
[20] Michalewicz, Z. Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems / Z. Michalevicz, M. Schouenauer // Evolutionary Computation. - 4. - 1996. - P. 1 – 32.
[21] Michalewicz, Z. Evolutionary algorithms for constrained engineering problems / Z. Michalewicz, D. Dasgupta, Riche Le, M. R. and M. Schoenauer // Computers & Industrial Engineering Journal - 30, 1996. – P. 851 – 870.
[22] Zitzler E., Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach // IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 3, No. 4, pp. 257-271, 1999.
[23] Сергиенко Р.Б. Автоматизированное формирование нечетких классификаторов самонастраивающимися коэволюционными алгоритмами // Р.Б. Сергиенко / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Красноярск, СибГАУ, 29 октября 2010, 20 с.
[24] Звонков В.Б. Исследование эффективности методов учета ограничений адаптивного эволюционного алгоритма на задачах условной однокритериальной оптимизации / В.Б. Звонков // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития ‘2010» (с 4 по 15 октября 2010 г.). Том 2. Технические науки. – Одесса: Черноморье, 2010. - с. 70-83.
[25] Банковское дело: учебник / О.И. Лаврушин, И.Д. Мамонова, Н.И. Валенцева [и др.]; под. ред. засл. деят. науки РФ, д-ра экон. наук, проф. О.И. Лаврушина. 8-е изд., стер. – М.: КРОНУС, 2009 – 768 с.
[26] Звонков В.Б. Самонастраивающиеся эволюционные алгоритмы решения сложных задач оптимизации. Выпускная квалификационная работа бакалавра по направлению 220100 – Системный анализ и управление (гр. БС), СибГАУ, Красноярск, 2011 – 96 с., ил.

**Biography**

*Zvonkov Vladimir B.* Bachelor's degree of engineering and technology of "System analysis and control" (2011 year, honours degree diploma), undergraduate student of institute of informatics and telecommunication, system analysis and operations research department of Siberian state aerospace university named after academician M.F. Reshetnev (responsible attitude to learning, self-education and excellent knowledge of disciplines). I published over 25 scientific researches. Field of scientific interests is complex systems modelling and optimization, evolutionary algorithms, artificial neural networks, particle swarm optimization, committees of intelligent algorithms. The program system IT-SAGA was awarded with 2nd rank in the nomination of "Research and experimental programs» as well as with absolute 2nd rank in the All-Russia student's competition of computer programs (taken part in Vologda, 2010 year). The author was awarded with the President of the Russian Federation Prize for the talented youth (order of the Ministry of education and science of the Russian Federation dated October 15, 2010, N 1031). The author is a laureate of the 3rd degree in a competition "Eureka-2011" (taken part in Novocherkassk). The author has received 5 diplomas of the I-st degree, 4 diplomas of the II-nd degree, 1 diploma of III-th degree in the full-time different conferences. E-mail: vladimirzvonkov802@yandex.ru. Phone number: +7-913-585-69-35.

# АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

**Б.В. Соколов[1], В.А. Палицын[2], М.Ю. Охтилев[1], О.В. Майданович[3]**

[1]Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, 14 линия, 39, Россия
sokol@iias.spb.su, oxt@mail.ru
тел: +7 (812) 328-01-03, факс: +7 (812) 328-44-50

[2]Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
sokol@iias.spb.su
тел: +7 (812) 328-01-03, факс: +7 (812) 328-44-50

[3]Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского
sokol@iias.spb.su
тел: +7 (812) 328-01-03, факс: +7 (812) 328-44-50

***Ключевые слова:*** *комплексная автоматизация процессов мониторинга состояния сложных объектов, структурно-функциональный синтез систем, интеллектуальные информационные технологии*

**Abstract**

One of type of automation system – automation system of the monitoring (ASM) of complex technical objects in real time in conditions of structural degradation is investigated. Possible approaches of ASM structure-functional synthesis are analyzed. Engineering example is suggested.

## Введение

В настоящее время значительно увеличилась интенсивность разработки и внедрения автоматизированных систем мониторинга (АСМ) в различных предметных областях, в том числе, и в такой сфере как обеспечение безопасности надводной обстановки в локальной акватории. Это было обусловлено общим ростом количества маломерных (туристических, спортивных и т.п.) судов, интенсивности их движения и, как следствие, усложнением задачи контроля над соблюдением правил судоходства и повышением вероятности чрезвычайных происшествий и бедствий [1-4]. Внедрение средств автоматизации наблюдения за надводной обстановкой на данный момент носит локальный характер, имеет место разнородность и информационная несогласованность АСМ, применяемых в различных акваториях. Данные факторы способны значительно затруднить процесс анализа информации, поступающей из разнородных и информационно несогласованных АСМ в единую базу объектов мониторинга. Таким образом, имеет место противоречие между современными требованиями к уровню автоматизации и интеллектуализации процессов оперативного контроля и анализа надводной обстановки, складывающейся в локальной акватории и фрагментарностью и разобщенностью модельно-алгоритмического и методического обеспечения решения соответствующих задач позиционирования и мониторинга состояния судов в указанной акватории [1, 4-7].

Решение перечисленных проблем разработки и реализации методов синтеза гибких масштабируемых систем обработки данных реального времени требует предварительно произвести анализ существующих подходов к синтезу таких сложных технических систем, как системы поддержки принятия решений, системы обработки и интеллектуального анализа данных, поступающих в реальном масштабе времени, систем, построенных на использовании авто-

номных программных модулей (например, системы с сервисно-ориентированной архитектурой) [1, 7].

## 1 Анализ существующих подходов к комплексной автоматизации процессов мониторинга состояния сложных организационно-технических

Говоря о современном этапе развития автоматизированных систем (АС), в том числе и АСМ, следует указать на то, что в настоящее время достигнут достаточно высокий уровень развития аппаратно-программных средств сбора, передачи и обработки информации, которые входят в состав любой АС, постоянно происходит их модификация, улучшаются технико-экономические характеристики. Вместе с тем, в настоящее время всё большее число специалистов как на Западе, так и в России, начинают понимать всю важность комплексного подхода к автоматизации функционирования предприятий и организаций. На собственном горьком опыте и благодаря множеству публикаций в компьютерной прессе многие осознали, что эффективность автоматизации в первую очередь зависит от того, насколько широко она охватывает все сферы деятельности в конкретной предметной области [1, 3, 7-10].

Одной из подсистем АС, предназначенной для информационного обеспечения управления, является АСМ, главной функцией которой, по сути, является определение состояния или, более точно, проведение мониторинга состояний сложных технических объектов (СТО) как объектов управления АС. В условиях повышения требовательности к АС эффективность ее применения во многом определяется эффективностью АСМ как подсистемы АС. Тем более, что в рамках АСМ циркулируют большие и даже сверхбольшие потоки информации, значительная часть которой является измерительной и составляет свыше 80% от всего объема используемой в контуре АС информации. При этом требования к процессам обработки и представления результатов обработки этой доли информации достаточно жесткие, т.к. на ее основе осуществляется управление СТО в режиме реального времени.

Объектом дальнейшего рассмотрения в данной статье являются как сама АСМ, так и один из этапов ее функционирования – этап анализа измерительной информации (ИзИ), производимый с целью оценивания состояний (технических состояний) объектов анализа (ОА) – СТО. Здесь под техническим состоянием (ТС) ОА понимается совокупность изменяющихся в процессе производства, испытаний, эксплуатации свойств (качеств) ОА, характеризующих его функциональную пригодность в заданных условиях применения [1, 7]. При этом ТС определяется посредством оценивания параметров ТС, среди которых выделяются измеряемые и вычисляемые параметры. Измеряемыми параметрами ТС являются представимые в виде значений измеряемых (телеметрируемых) параметров показатели (характеристики) свойств ОА. Вычисляемыми параметрами ТС являются показатели (характеристики) свойств ОА, вычисляемые по различным алгоритмам на основе значений измеряемых параметров. Основным способом выявления (оценивания) ТС является сбор, обработка и анализ ИзИ. Сбор ИзИ – есть процесс получения (приема), распределения всех значений измеряемых параметров. Под обработкой ИзИ понимается процесс получения оценок измеряемых параметров ТС на основе собранных данных, снабженных показателем степени доверия к этим оценкам [1, 7].

Целью анализа ИзИ (как процесса) является получение обобщенных оценок совокупности параметров ТС, значения которых в явном виде указывают либо степень работоспособности рассматриваемого ОА, либо место и вид возникшей неисправности, либо являются оценками прогнозируемых явлений и процессов с заданной точностью и интервалом прогноза и т.п. Необходимо отметить, что в настоящее время результаты решения задач сбора и обработки ИзИ в достаточной мере удовлетворяют требованиям АСМ.

Задачи же анализа ИзИ до сих пор решаются, как правило, вручную, а поскольку целью АСМ как подсистемы АС все же является получение результатов анализа, то имеющиеся при этом характеристики получаемых таким способом результатов анализа (прежде всего, как по

оперативности их получения, так по их достоверности и т.п.) в большинстве случаев не удовлетворяют требованиям как для АСМ, так и АС в целом.

Современное состояние проблемы автоматизации управления СТО – как основного пути внедрения в практику управления перспективных ИТ – можно охарактеризовать как переход от «стихийного» этапа, когда применяется метод «проб и ошибок», к «осознанному», характерной чертой которого является обязательное обоснование методологических принципов построения разрабатываемого программного продукта [1, 7-9] с учетом всех ограничений и условий его применения. При этом еще на ранних этапах проектирования соответствующего специального программного обеспечения (СПО) необходимо определиться с принципиальной возможностью рассматриваемого вида автоматизации и оценить не только положительный эффект от применения программного комплекса, но и те трудности, с которыми придется столкнутся при создании, внедрении и эксплуатации как АСМ в целом, так и СПО анализа ИзИ. Действительно, в практике программирования подобных систем в последнее время сложилась парадоксальная ситуация [1, 7]. С одной стороны, благодаря впечатляющим успехам развития вычислительной техники в распоряжении специалистов имеются ЭВМ, которые работают быстрее первых серийных машин в сотни тысяч и миллионы раз. Производительность же труда программистов выросла всего лишь в десятки раз. В связи с этим неизбежный путь преодоления возникающих проблем – всесторонняя автоматизация самого процесса создания и сопровождения больших специализированных программных комплексов (ПрК), а значит, и развитие теории программирования, моделирующей объекты, явления, процессы, имеющиеся при создании таких ПрК. При этом главная цель развития теории и ее прикладных аспектов – решение фундаментальных проблем и поиск фундаментальных идей, приводящих к качественно новым решениям практики. Если с текущими задачами помогает справиться смекалка и опыт программиста – разработчика и инженера по сопровождению ПрК, то принципиально новые решения появляются как результат глубокого анализа основ разработки и сопровождения ПрК.

Фундаментальный вклад в становление методологической основы разработки и сопровождения ПрК автоматизированного анализа (АА) ИзИ, предназначенных для решения задач мониторинга состояний СТО, внесли выдающиеся отечественные и зарубежные ученые, развившие базовые элементы таких научных направлений, как теория автоматов, теория алгоритмов, теория искусственного интеллекта, математическая логика, общая топология, теория программирования (Computer Science), теория распознавания образов, теория принятия решений, теория управления, теория статистических выводов и решений, теория формальных языков и грамматик и др. [1–3, 7–15].

Проведенные исследования показали, что решение задач автоматизации анализа ИзИ целесообразно проводить по следующим основным направлениям: *системный анализ проблемных аспектов обеспечения своевременного получения достоверных оценок ТС СТО в условиях априорной неопределенности и возникающих нештатных ситуаций; разработка унифицированной модели представления слабо формализуемых знаний о состоянии СТО как ОА на основе парадигмы декларативного построения ИС; обоснование концепции инвариантности состояний ОА и состояний процесса АА ИзИ; разработка теоретических основ построения топологического пространства параметров ТС ОА; разработка и исследование методов автоматического синтеза программ АА ИзИ по заданной цели анализа; разработка и исследование методов верификации и оптимизации программ АА ИзИ; обоснование и исследование корректности алгебр на множестве вычислительных моделей (ВМ); обоснование и исследование унифицированных методов локального распознавания ТС на основе используемых ВМ при обеспечении достоверности результатов распознавания; разработка, обоснование и оценка применимости концепции использования современных ИТ при проектировании и сопровождении ПК АА ИзИ в реальном масштабе времени (РМВ).*

Следует подчеркнуть, что синтез облика ПК АА ИзИ должен осуществляться в рамках общей процедуры синтеза АС и ее основной подсистемы – АСМ. Центральной задачей при разработке и модернизации крупномасштабной АС (в том числе и АСМ) является выбор её структуры, под которой понимается состав элементов, соответствующая система взаимосвязей (отношений) между элементами и распределение функций, выполняемых АС. Применительно к АС принято выделять следующие базовые структуры [1, 2, 6, 7, 9–14]: структуру целей, функций и задач АС, технологическую структуру, техническую, организационную, топологическую структуры, структуры информационного, математического и программного обеспечения (ИО, МО, ПО) АС. Перечисленные шесть видов структур являются инвариантными для любого класса АС и должны рассматриваться в первую очередь при системном исследовании и комплексном моделировании соответствующей АС.

Важность задачи синтеза вышеперечисленных структур применительно к АС состоит в том, что от того какой окончательный вариант структуры АС выбран, во многом зависит эффективность применения указанной АС по целевому назначению. Дополнительную особенность рассматриваемая задача синтеза приобретает в том случае, когда учитывается такой важный аспект как динамика развития и реконфигурация структур проектируемой (эксплуатируемой) АС, которые, в свою очередь, обусловлены большой продолжительностью общего периода создания и использования АС, необходимостью учёта изменения и уточнения технических требований к параметрам и характеристикам АС по этапам развития; расширением круга решаемых задач; необходимостью учёта пространственно-временных, технических, технологических ограничений, связанных с проектированием, производством, испытанием, поставкой, внедрением, применением и совершенствованием основных элементов и подсистем АС [1, 9-14].

Таким образом, на практике мы сталкиваемся постоянно со структурной динамикой АС. В этих условиях для повышения (сохранения) уровня работоспособности и возможностей АС, либо обеспечения наилучших условий деградации указанных систем необходимо осуществлять управление их структурами (в том числе управление реконфигурацией структур АС).

Задачи управления структурной динамикой АС по своему содержанию относятся к классу задач структурно-функционального синтеза облика АС и формирования соответствующих программ управления их развитием.

К настоящему времени рассматриваемый класс задач структурно-функционального синтеза и управления развитием АС исследован недостаточно глубоко. Получены новые научные и практические результаты в рамках следующих направлений исследований: синтез технической структуры АС при известных законах функционирования основных элементов и подсистем АС (1 направление) [11-14]; синтез функциональной структуры АС или, по-другому, синтез программ управления основными элементами и подсистемами АС при известной технической структуре АС (2 направление) [1, 2, 7, 8-11, 15]; синтез программ создания и развития новых поколений АС без учёта этапа совместного функционирования существующей АС и внедряемой АС [3, 4, 22].

Известен ряд итерационных процедур получения совместного решения задач, исследования которых проводятся в рамках 1 и 2 направлений. В целом все существующие модели и методы структурно-функционального синтеза облика АС и формирования программ их развития используются на этапах внешнего и внутреннего проектирования облика АС, то есть тогда, когда фактор времени не является существенным. Однако, как показывают исследования, на этапах эксплуатации и развития наблюдается существенная структурная динамика АС [1, 6, 7]. В этих условиях особую актуальность начинают приобретать совместная постановка и решение проблем синтеза облика АС и управления развитием ее основных видов структур. К указанным задачам относятся также и задачи реконфигурации структур в случае их деградации.

Масштабность и сложность рассматриваемых проблем требует выбора в качестве базовой методологии – принципы, концепции, подходы современного обобщённого системного анализа, представляющего из себя одно из главных направлений реализации системного подхода, в рамках которого на основе гармоничного сочетания формально-математических и логико-эвристических методов осуществляется конструктивное решение разнородных и разно уровневых задач анализа и синтеза АС на различных этапах их жизненного цикла [1, 2, 6, 7, 9-14]. Конструктивное решение рассматриваемой проблемы поиска и выбора наилучших вариантов создания и развития АС предполагает, во-первых, построение соответствующего полимодельного комплекса, описывающего различные аспекты жизненного цикла существующей и создаваемой АС, во-вторых, разработку методов, алгоритмов и методик многокритериального синтеза структуры перспективной АС, и, в-третьих, разработку многоэтапной интерактивной процедуры поиска решения задачи синтеза АС и программ их развития. Анализ возможных путей решения задачи полимодельного многокритериального синтеза структур ИС показывает [1, 7, 9-11], что наиболее перспективными являются следующие два направления исследований.

В рамках ***первого подхода*** осуществляется формализация задачи синтеза облика АС и выбора программ перехода от «старой» к «новой» АС как задачи однокритериальной оптимизации на имитационной модели, описывающей процессы функционирования указанных АС на различных этапах их жизненного цикла. Далее осуществляется неформальная декомпозиция общей задачи (модели) на частные задачи (и соответствующие аналитические модели) учитывающие с необходимой степенью детализации различные аспекты функционирования АС. При этом размерность каждой из построенных аналитических моделей (АМ), описывающих указанные аспекты деятельности АС, во много раз меньше размерности исходной имитационной модели (ИМ). Окончательное согласование (координация) АМ и ИМ осуществляется на основе принципа Парето в ходе итерационного обмена информацией между данными моделями, а также интерактивного взаимодействия с лицом, принимающим решение (ЛПР) [1, 7, 10].

В рамках ***второго подхода*** осуществляется постановка задачи многокритериальной оптимизации АС на комплексе моделей [10]. При этом формирование и сужение множества недоминируемых альтернатив (множества Парето) осуществляется в интерактивном режиме с активным привлечением ЛПР. В качестве базовых моделей в этом случае предлагается рассматривать дискретные модели математического программирования, модели массового обслуживания, имитационные модели и модели управления развитием. Стягивание множества Парето на дискретных моделях осуществляется итеративно путём отсечения части элементов этого множества. Завершается процесс синтеза определением программ перехода от существующей к перспективной АС. Окончательный выбор одного из перечисленных подходов к решению задачи полимодельного многокритериального синтеза структур АС и соответствующих программ их развития определяется с учётом многочисленных факторов, в том числе: составом и структурой исходных данных, используемых при постановке и решении задачи, временем, отводимым на решение. К настоящему времени разработана обобщенная процедура динамического структурно-функционального синтеза облика современных и перспективных АС, в рамках которой удалось объединить преимущества перечисленных ранее подходов.

**Заключение**

Проведенные исследования показали, что задачу синтеза модельного, алгоритмического и программного обеспечения информационной поддержки и поддержки принятия решений в области мониторинга целесообразно решать в рамках разработанной авторами обобщенной процедуры структурно-функционального синтеза АС. Применительно к АСМ безопасности надводной обстановки в локальной акватории данную процедуру можно конкретизировать и представить в виде следующих четырех этапов. ***На первом этапе*** в этом случае должна решаться подзадача оперативной классификации объекта мониторинга, оперативного синтеза

технологий автоматизированного мониторинга наблюдаемых объектов и самой АСМ, обеспечивающий указанный мониторинг. ***На втором этапе*** – подзадача классификации ситуации, складывающейся в наблюдаемом квадрате локальной акватории, где информация о ситуации формируется на основе интеграции данных об объектах мониторинга в наблюдаемом квадрате, полученных в результате решения задачи первого этапа, так и информации метеорологического, экологического и организационного характеров, полученной от соответствующих подсистем АСМ безопасности надводной обстановки. ***На третьем этапе*** должна решаться подзадача прогнозирования поведения объектов мониторинга в наблюдаемом квадрате локальной акватории на основе данных, полученных в результате решения задачи второго этапа. ***На четвертом этапе*** будет решаться подзадача классификации спрогнозированной ситуации и определение рекомендуемой реакции диспетчерского центра.

**Благодарности**

Междисциплинарные исследования по рассматриваемой тематике проводились при финансовой поддержке РФФИ (гранты 10-07-00311-а, 11-08-01016-а, 11-08-00767-а, 12-06-00276-а. 12-07-00302-а), ОНИТ РАН (проект №2.11), Программы ESTLATRUS: проекты 1.2/ELRI-121/2011/13, 2.1/ELRI-184/2011/14.

**Список литературы**

[1] Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга состояния и управления структурной динамикой сложных технических объектов. - М. 2006.
[2] Балашов Е.П. Эволюционный синтез систем. - М.: Радио и связь 1985. 205 с.
[3] N. Bieberstein, S. Bose, M. Fiammante, K. Jones, R. Shah Service-Oriented Architecture Compass. – IBM Press, 2007.
[4] Приказ Минтранса РФ № 129 от 14.10.2002 “Об утверждении правил плавания по внутренним водным путям российской федерации” (в ред. Приказа Минтранса РФ №114 от 31.03.2003).
[5] ГОСТ 34.003-90 «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Термины и определения. - М.: ГОССТАНДАРТ, 1992.
[6] Калинин В.Н., Соколов Б.В. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления, 1995. N1. С. 149-156.
[7] Майданович О. В., Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Комплексная автоматизация мониторинга состояния космических средств на основе интеллектуальных информационных технологий. Приложение к журналу «Информационные технологии» №10/2011.
[8] Городецкий В.И., Серебряков С.В. Методы коллективного распознавания – «Автоматика и телемеханика» № 11/2008.
[9] Проблемы программно-целевого планирования и управления / Под ред. Г.С. Поспелова. М: Наука, 1981. 460 с.
[10] Резников Б.А. Анализ и оптимизация сложных систем. Планирование и управление в АСУ: Учебное пособие. - Л.: ВИКИ,1981.148 с.
[11] Ростовцев Ю.Г. Основы построения автоматизированных систем сбора и обработки информации: Учебник. СПб.: ВИКИ им. А.Ф.Можайского, 1992. 717 с.
[12] Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. М.: Наука, 1982. 200 с.
[13] Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К., Филиппов В.А. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем. М.: Наука, 1985.
[14] Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем (синтез и планирование развития). М.: Наука, 1993.
[15] Юсупов Р.М., Дмитриев А.К. Идентификация и техническая диагностика. М.:МО СССР, 1987. 521 с.

# ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ

**С.С. Анцыферов, К.Е. Русанов, Л.В. Маслова**
МГТУ МИРЭА
119454, Москва, проспект Вернадского, 78, Россия
lubovym@yandex.ru, c_standard@fel.mirea.ru
тел: +7 (495) 434-81-38

***Ключевые слова:*** *распределенная система, система защиты информации, база данных, система оценки качества (СОК), экспертная система (ЭС)*

**Abstract**
The problem of ensuring protection of information of the distributed systems of processing is one of the major at creation of reliable information structure. This problem covers both physical protection of data and system programs, and protection against unauthorized access to the data transferred on communication lines and being on stores. Unauthorized access is a result of activity of outsiders and special viruses. Not less important task is the quality rating of protection of information. The system of quality rating of protection of information of the distributed systems is offered in this article subject to the change dynamics of parameters.

## Введение

При решении широкого круга задач, связанных с передачей и обработкой интенсивных потоков данных, а также хранением информации всё более широко применяются распределённые системы, в частности, для решения задач медицинской диагностики. Для исключения возможной потери и искажения данных в результате посторонних воздействий создаются системы защиты информации. Основу построения этих систем составляют программные и аппаратно-программные средства: антивирусные и криптографические, архивации данных, идентификации и аутентификации пользователя, протоколирование и аудит, аппаратные ключи защиты, брандмауэры, шифрующие платы, устройства считывания индивидуальных характеристик человека. Вместе с тем системы с распределёнными параметрами являются динамично развивающимися. Изменениям может подвергаться как аппаратная, так и программная часть, а также конфигурация распределённых систем. Всё это приводит к необходимости создания систем защиты информации, обладающих свойством адаптивности к изменяющимся условиям. Важным моментом для достижения данной цели является разработка критериев оценки качества систем защиты информации. В качестве критериев оценки качества защиты информации, как правило, используются следующие: экономическая эффективность, трудоёмкость, техническая сложность программных и аппаратных средств, надёжность, устойчивость, вероятность преодоления защиты за определённое время, устойчивость к электромагнитному воздействию (возможность считывания информации), вероятность аппаратного сбоя на основании внешних воздействий, вероятность утечки и искажения информации из-за несанкционированных программных воздействий, вероятность снижения уровня защиты при переконфигурировании распределённой системы. Трудности оценки качества защиты обусловлены неопределенностью условий функционирования, а известные методики и рекомендации не учитывают динамику изменения параметров распределенных систем. В данной работе все указанные критерии рассматриваются с точки зрения динамики изменения параметров распределённых систем. Перспективным для решения указанной задачи представляется использование принципов экспертного оценивания критериев оценки качества защиты информации.

## 1 Цель работы

Целью данной работы является разработка принципов экспертного оценивания уровня качества защиты информации в распределенных системах обработки с учетом динамики изменения их параметров.

## 2 Постановка задачи

При создании нескольких взаимосвязанных центров обработки не всегда есть возможность использовать одинаковые операционные системы на всех узлах. При работе с каждой операционной системой могут быть свои особенности: устойчивость операционной системы к вирусам, наличие квалифицированного персонала, специализированное программное обеспечение, совместимое с операционной системой, широта применения операционной системы, управление всеми ресурсами системы, наличие встроенных механизмов, которые прямо или косвенно влияют на безопасность программ и данных, работающих в среде ОС, обеспечение интерфейса пользователя с ресурсами системы, размеры и сложность ОС.

Большинство ОС обладают дефектами с точки зрения обеспечения безопасности данных в системе, что связано с обеспечением максимальной доступности системы для пользователя. Рассмотрим типовые функциональные дефекты ОС, которые могут привести к созданию каналов утечки данных. Каждому ресурсу в системе должно быть присвоено уникальное имя – идентификатор. Во многих системах пользователи не имеют возможности удостовериться в том, что используемые ими ресурсы действительно принадлежат системе. Большинство пользователей выбирают простейшие пароли, которые легко подобрать или угадать. Хранение списка паролей в незашифрованном виде дает возможность его компрометации с последующим несанкционированным доступом к данным. Для предотвращения попыток несанкционированного входа в систему с помощью подбора пароля необходимо ограничить число таких попыток, что в некоторых ОС не предусмотрено. Во многих случаях программы ОС считают, что другие программы работают правильно. При использовании общей памяти не всегда после выполнения программ очищаются участки оперативной памяти. В случае разрыва связи ОС должна немедленно закончить сеанс работы с пользователем или повторно установить подлинность субъекта. При передаче параметров по ссылке возможно сохранение параметров в ОП после проверки их корректности, нарушитель может изменить эти данные до их использования). Система может содержать много элементов (например, программ), имеющих различные привилегии.

При оценке качества защиты следует учитывать следующие показатели:

- производительность;
- простота обслуживания;
- работа под управлением различных операционных систем;
- тиражирование;
- возможность динамического резервного копирования данных;
- сопряжение различных баз данных друг с другом;
- одновременный доступ нескольких пользователей;
- распределенная обработка транзакций;
- параллельное резервное копирование;
- возможность запрета пользователю непосредственного доступа к данным.

Все эти показатели носят динамический характер. И для обобщенной оценки необходима система количественных критериев, назначаемых экспертами. Учитывая большое количество этих оценок и их динамичность, возникает необходимость в создании соответствующей экспертной системы. В качестве количественных критериев предлагается использовать следующие:

а) относительно баз данных:

- степень надежности базы данных;
- применимость;
- сложность освоения;
- стоимость;
- производительность;
- требовательность к системным ресурсам;

б) относительно операционных систем:

- стоимость;
- распространенность;
- устойчивость к антивирусным атакам;

в) относительно антивирусных средств:

- требовательность к системным ресурсам;
- обнаружение большинства вирусов;
- успешное «лечение» большинства вирусов;
- оставляет ли «следы» после удаления;
- обнаружение потенциально опасных объектов, которые, возможно, являются новыми вирусами;
- имеют ли место ложные срабатывания при попытке обнаружения потенциально опасных объектов;

г) относительно степени надежности аппаратных средств;

д) применение специализированных программных и аппаратно-программных средств:

- скрытая операционная система;
- аппаратные ключи;
- программные и аппаратно-программные межсетевые экраны;
- средства резервного копирования данных;

е) влияние человеческого фактора:

- уровень квалификации персонала;
- добросовестность персонала.

## 3 Экспертное оценивание качества защиты

Будем считать, что функционирование СОК, связанное с оценкой показателей качества, носит стохастический (вероятностный) характер. Положим в основу алгоритмов функционирования байесовский принцип определения апостериорных распределений векторов показателей качества. Используемое в данных алгоритмах сравнение вычисленных значений апостериорных вероятностей с порогами значимости позволяет, казалось бы, достаточно просто, реализовать идею распознавания образов векторов показателей качества. Однако, байесовский принцип предполагает наличие существенной априорной информации, носителями которой являются специалисты. В силу этого, получаемые апостериорные вероятностные распределения носят по существу субъективный характер. В связи с этим возникает необходимость в экспертной оценке получаемых результатов. Эта необходимость обуславливается неполнотой, неточностью, а иногда и противоречивостью имеющейся априорной информации и использованием вследствие этого правил правдоподобных рассуждений, не гарантирующих логической истинности того или иного заключения.

Использование экспертных оценок правдоподобия позволит: формализовать правдоподобный вывод; интерпретировать весь ход рассуждений и упорядочить возможные результаты по степени доверия к ним. Всё это выгодно отличает экспертные системы от систем распознавания образов.

В предлагаемой ЭС используется общая схема представления знаний в виде системы продукций. Система продукций задаётся своим алфавитом, когда элементарные события выражаются в виде значений переменных из конечного набора. Событие может содержать несколько элементарных событий, связанных операциями конъюнкции и отрицания. На множестве событий обычно задаётся частично определённая функция, отражающая меру определённости или оценку правдоподобия события. Такая система знаний представляет собой сеть вывода, где вершины соответствуют событиям, а ориентированные рёбра определяют переход от одних событий к другим по определённым правилам. В задачу ЭС входит определение оценок правдоподобия для событий, на которых они (оценки) не заданы. Кроме того, ЭС должна производить пересчёт той или иной оценки при изменении оценок других событий, а также коррекцию правил перехода при поступлении новых знаний.

ЭС содержит следующие блоки: БЗ – база знаний, хранящая множество продукций (в общем случае правил); БД – база данных, хранящая данные (рабочая память); И – интерпретатор, решающий на основе имеющихся в системе знаний, предъявленную ему задачу; ЛП – лингвистический процессор, осуществляющий диалоговое взаимодействие с пользователем (экспертом) на естественном для него языке (естественный язык, профессиональный язык, язык графики и т.п.); ПЗ – приобретение знаний; ОД – объяснение действий системы с ответом на вопросы о том, почему некоторые заключения были сделаны или отвергнуты.

ЭС работает в двух режимах: приобретения знаний и решения задач. В режиме приобретения знаний в общении с ЭС участвует эксперт (через посредство инженера по знаниям). В этом режиме эксперт наполняет систему знаниями (правилами), которые позволят ей в режиме решения самостоятельно решать задачи из проблемной области. Эксперт вводит в систему продукции, представляемые на естественном языке. Объединение вновь вводимых продукций с базой знаний осуществляется блоком ПЗ. В режиме решения задач в общении с ЭС участвует пользователь, которого интересует результат, способ получения решения. В этом случае данные о задаче после обработки их лингвистическим процессором поступают в рабочую память (БД). ЛП преобразует входные данные с естественного языка пользователя во внутренний язык системы и преобразует сообщения системы с внутреннего языка в естественный язык. Интерпретатор на основе входных данных, продукционных правил и общих сведений о проблемной области формирует решение задачи. Если ответ системы не понятен пользователю, то он может потребовать, чтобы система объяснила, как этот ответ был получен. Блок ОД сообщает о том, как правила используют информацию пользователя; почему использовались (не использовались) данные правила; какие были сделаны выводы. Все объяснения даются на ограниченном естественном языке.

В составе СОК экспертная система оценки качества и выбора управляющих воздействий выполняет роль вспомогательного элемента и предназначена для объективизации (повышения надёжности) оценок правдоподобия, т.е. полученных апостериорных вероятностных распределений.

В рамках предложенной в данной работе стохастической модели функционирования СОК, для продукционного правила $S \Rightarrow s(l)$ (где $S$ – конъюнкция элементарных событий или их отрицание; $s$ – элементарное событие; $l$ –оценка правдоподобия элементарного события, зависящая от оценки элементарных событий из $S$ и правила перехода от $S$ к $s$) оценку правдоподобия будем задавать парой условных вероятностей $P(s|S)$ и $P(s|\overline{S})$. Априорную вероятность каждого события будем считать равной 0.5, что соответствует полной неопределённости. ЭС начинает работать, когда становятся известными апостериорные вероятности некоторых событий: $P(S|\varsigma) \neq 0.5$ ($\varsigma$ – факторы, обуславливающие то или иное событие). Применение продукции $S \Rightarrow s$ изменяет апостериорную вероятность $P(s|\varsigma)$ следующим образом:

(1) $P(s|\varsigma) = P(s|\overline{S}) + \dfrac{P(s) - P(s|\overline{S})}{P(S)} P(S|\varsigma)$ для $0 \le P(S|\varsigma) \le P(S)$;

(2) $P(s|\varsigma) = \dfrac{[P(s) - P(s|S)]P(S) + [P(s|S) - P(s)]P(S|\varsigma)}{1 - P(S)}$ для $P(S) \le P(S|\varsigma) \le 1$.

Другими словами, $P(s|\varsigma)$ линейно интерполируется между $P(s)$ и $P(s|\overline{S})$, если апостериорная вероятность $P(S|\varsigma)$ меньше априорной $P(S)$, т.е. появились сомнения в событии *S*, и $P(s|\varsigma)$ интерполируется между $P(s)$ и $P(s|S)$, если апостериорная вероятность стала больше априорной, т.е. событие подтверждается.

Следует отметить, что для полностью подтверждённых $(P(S|\varsigma) = 1)$ или полностью опровергнутых $(P(S|\varsigma) = 0)$ событий апостериорная вероятность $P(s|\varsigma)$ равна условной вероятности $P(s|S)$ или $P(s|\overline{S})$ соответственно.

Повышение апостериорной вероятности $P(s|\varsigma)$ за счёт применения продукции $S \Rightarrow s$ повышает оценку правдоподобия

(3) $l(s|\varsigma) = \dfrac{P(s|\varsigma)}{P(\overline{s}|\varsigma)} = \dfrac{P(s|\varsigma)}{1 - P(s|\varsigma)}$.

Если в базе знаний накоплено несколько продукций, дающих различные оценки правдоподобия

$S_1 \Rightarrow s \; l_1 \; (s|\varsigma)$,

$S_2 \Rightarrow s \; l_2 \; (s|\varsigma)$,

……

$S_n \Rightarrow s \; l_n \; (s|\varsigma)$,

то необходимо вычислить оценку

$l(s|\varsigma) = h_1 \ldots h_n \, l(s)$,

где

$h_i = \dfrac{l_i \; (s|\varsigma)}{l(s)}$.

При этом предполагается независимость $S_1, \ldots, S_n$.

Оценка правдоподобия продукционных правил определяется по формуле Байеса

(4) $P(s|S) = \dfrac{P(s) \; P(S|s)}{P(S)}$ .

Это соотношение может быть использовано для обоснованного выбора оценки показателей качества. Однако, полученные таким образом оценки правдоподобия обладают определённой неустойчивостью, т.к. небольшие вариации исходных вероятностей, как правило задаваемых экспертами, могут приводить к изменениям получаемых оценок, что особенно сказывается вблизи их экстремальных значений. Для устранения неустойчивости можно дополнительно использовать операцию интервального оценивания. В этом случае каждое событие S характеризуется нижней границей $P_н(S)$ вероятности $P(S)$ и нижней границей $P_н(\overline{S})$ вероятности $P(\overline{S})$, т.е.

$P_н(S) \le P(S) \le 1 - P_н(\bar{S})$.

Если $S$ есть конъюнкция $s_1 \ldots s_n$, то согласно тождествам теории вероятности, это означает, что имеют место следующие ограничения:

$$P_н(S) \ge 1 - \sum_i [1 - P_н(s_i)],$$

$$P_н(\bar{S}) \ge P_н(\bar{s}_i),$$

(5) $$P_н(s_i) \ge P_н(S),$$

$$P_н(\bar{s}_i) \ge P_н(\bar{S}) - \sum_{j \ne i} [1 - P_н(s_j)].$$

Изменения значений оценок $P_н(S)$ и $P_н(\bar{S})$ для события $P(S)$ приводят к пересчёту всех вершин сети вывода, в которые ведут пути из S. Пересчёт осуществляется на основе системы неравенств (5) и проводится независимо для $P_н(S)$ и $P_н(\bar{S})$. Противоречием считается ситуация, когда для некоторого s установлено $P_н(S) + P_н(\bar{S}) > 1$. В этом случае включается процедура поиска лучших минимальных изменений в первоначальных оценках, ликвидирующих противоречивость.

Проектирование ЭС существенно отличается от проектирования обычного программного продукта. Использование при их проектировании методологии, принятой в традиционном программировании, либо чрезмерно затягивает процесс создания ЭС, либо вообще приводит к отрицательному результату. Неформализованность указанных задач, отсутствие завершённой теории ЭС и методологии их проектирования приводит к необходимости модифицировать принципы и способы построения ЭС, как в ходе процесса их проектирования, так и создания наукоёмкого продукта, по мере того, как увеличиваются знания разработчиков (АЭ) о проблемной области. В связи с этим целесообразно использование концепции «быстрого прототипа». Согласно этой концепции, вначале создаётся прототип ЭС, который должен удовлетворять двум противоречивым требованиям: решать задачи конкретного приложения; трудоёмкость его разработки должна быть весьма незначительной.

Предлагаемый принцип экспертного оценивания был практически апробирован при решении задачи управления качеством защиты информации распределенной системы обработки диагностической информации, полученной с помощью компьютерной томографии. Преобразование прототипа ЭС в конечный продукт приводит к перепрограммированию ЭС на языках низкого уровня, обеспечивающих как увеличение быстродействия ЭС, так и уменьшение занимаемой ею памяти.

**Заключение**

В статье рассмотрены основные положения, связанные с оценкой качества защиты. Для решения поставленной задачи предложен принцип экспертного оценивания системы защиты информации в распределенных системах. Предварительные испытания предложенного принципа показали его достаточную эффективность при оценивании уровня качества защиты информации в распределенных системах обработки с учетом динамики изменения их параметров.

## Список литературы


[1] Анцыферов С.С. Общие принципы построения и закономерности функционирования интеллектуальных систем. // Искусственный интеллект, №3, 2011, с. 6-15.

[2] Сигов А.С., Анцыферов Е.С., Голубь Б.И., Анцыферов С.С. Методология адаптивного управления качеством наукоемкой продукции. // Материалы МНТК «Искусственный интеллект. Интеллектуальные и многопроцессорные системы: ИИИМС 2006», Таганрог-Донецк-Минск, 2006 г., т.1.

[3] Сигов А.С., Анцыферов Е.С., Голубь Б.И., Анцыферов С.С. Системные принципы управления качеством проектирования адаптивных информационно-распознающих систем. // Известия ТРТУ, №10, 2005, с. 167-174.

[4] Сигов А.С., Анцыферов Е.С., Голубь Б.И., Анцыферов С.С. Управление качеством синтеза структуры адаптивных информационно-распознающих систем. // Материалы МНТК «Интеллектуальные и многопроцессорные системы: ИМС 2005», Таганрог-Донецк-Минск, 2005 г., т.1, с. 104-109.

[5] Сигов А.С., Анцыферов Е.С., Голубь Б.И., Ширяев С.В. Адаптивное управление качеством интеллектуальной продукции. // Известия ТРТУ, 2004, №9, с. 15-20.

[6] Сигов А.С., Анцыферов Е.С., Голубь Б.И., Ширяев С.В. Экспертное управление качеством интеллектуальной продукции. // Материалы МНТК «Искусственный интеллект. Интеллектуальные и многопроцессорные системы», Таганрог-Донецк, 2004, т.2, с. 63-67.

[7] Сигов А.С., Анцыферов Е.С., Голубь Б.И. Управление качеством проектирования адаптивных информационно-распознающих систем с программируемой структурой. // Материалы МНТК «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения – INTERMATIC-2004», Москва, 2004, с. 193-195.

[8] Анцыферов С.С., Евтихиев Н.Н. Адаптивные информационно-распознающие системы. // Известия ТРТУ, 2004, №9, с. 183-190.

[9] Анцыферов С.С. Метрология виртуальных систем. // Измерительная техника, 2003, №5, с. 17-21.

[10] Запечников С.В., Милославская Н.Г., Толстой А.И., Ушаков Д.В. Информационная безопасность открытых систем. //Москва, «Горячая линия - Телеком», 2008.

[11] Прохода А.Н. Обеспечение Интернет-безопасности. // Москва, «Горячая линия - Телеком», 2008.


## Biography

*Antsyferov S.S.* is a graduate of the Bauman Moscow State Technical University, professor. Doctor of engineering sciences, full member of the Academy of the Quality Problems.

*Rusanov K.E.* is a graduate of the Moscow state institute of electronics and mathematics, associate professor. Candidate of engineering sciences.

*Maslova L.V.* is a graduate of the Moscow state technical university MIREA, post-graduate student.

# ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПОДХОДА ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ

**В.А. Яровенко, С.А. Фоменков**

Волгоградский государственный технический университет
400005, Волгоград, пр. Ленина, 28, Россия
yavapro@gmail.com, saf@vstu.ru
тел: +7 (904) 779-5242, +7 (8442) 24-81-00

***Ключевые слова:*** *физический эффект, мультиагентная система, агент, протоколы общения агентов, FreeAgent, интеграция*

**Abstract**

The creating of the integrated system for processing of structured physical knowledge using multi-agent approach is described. The developed system integrates the structured physical knowledge processing and provides the single user interface for interaction with a physical effects database.

## Введение

В [1] рассмотрены различные способы увеличения эффективности работы автоматизированных систем обработки физических эффектов (ФЭ): совершенствование модели ФЭ, разработка единой модели базы данных ФЭ, разработка системы администрирования базой данных ФЭ.

В ходе дальнейшего анализа автоматизированных систем обработки базы данных ФЭ (система поиска ФЭ [2], система синтеза цепочек ФПД [3,4], система извлечения ФЭ из первоисточников [5]) был выявлен ряд недостатков:

- при выполнении процедур синтеза цепочек ФПД и извлечения ФЭ из первоисточников соответствующие системы самостоятельно производят поиск ФЭ, дублируя работу системы поиска. Такой подход снижает эффективность функционирования данных систем;
- пользователю приходится использовать системы обработки базы данных ФЭ по отдельности. В результате чего увеличивается время поиска результата, а также возникает вероятность того, что пользователь не использует одну из систем и решение не будет найдено. Целесообразнее использование единой системы обработки базы данных ФЭ, которая бы включала существующие системы обработки ФЭ в качестве подсистем;
- отсутствует единая база данных: каждая система обработки ФЭ работает со своей (локальной) базой данных, и взаимодействие между системами отсутствует. Например, изменения, вносимые системой извлечения ФЭ из первоисточников, недоступны автоматически другими системами.

Для решения выявленных недостатков необходимо интегрировать автоматизированные системы обработки базы данных ФЭ в единый программный комплекс обработки базы данных ФЭ[6].

## 1 Мультиагентная система для обработки базы данных ФЭ

Для решения задачи интеграции существующих автоматизированных систем обработки базы данных ФЭ и проектирования единой системы обработки базы данных ФЭ использовался мультиагентный подход. В результате работы интегрированная система обработки баз данных

ФЭ была реализована в виде мультиагентной системы (МАС), в которой главными элементами являются программные агенты, решающие задачу интеллектуальной обработки и интеграции информации о ФЭ [7]. На рисунке 1 изображена общая архитектура системы.

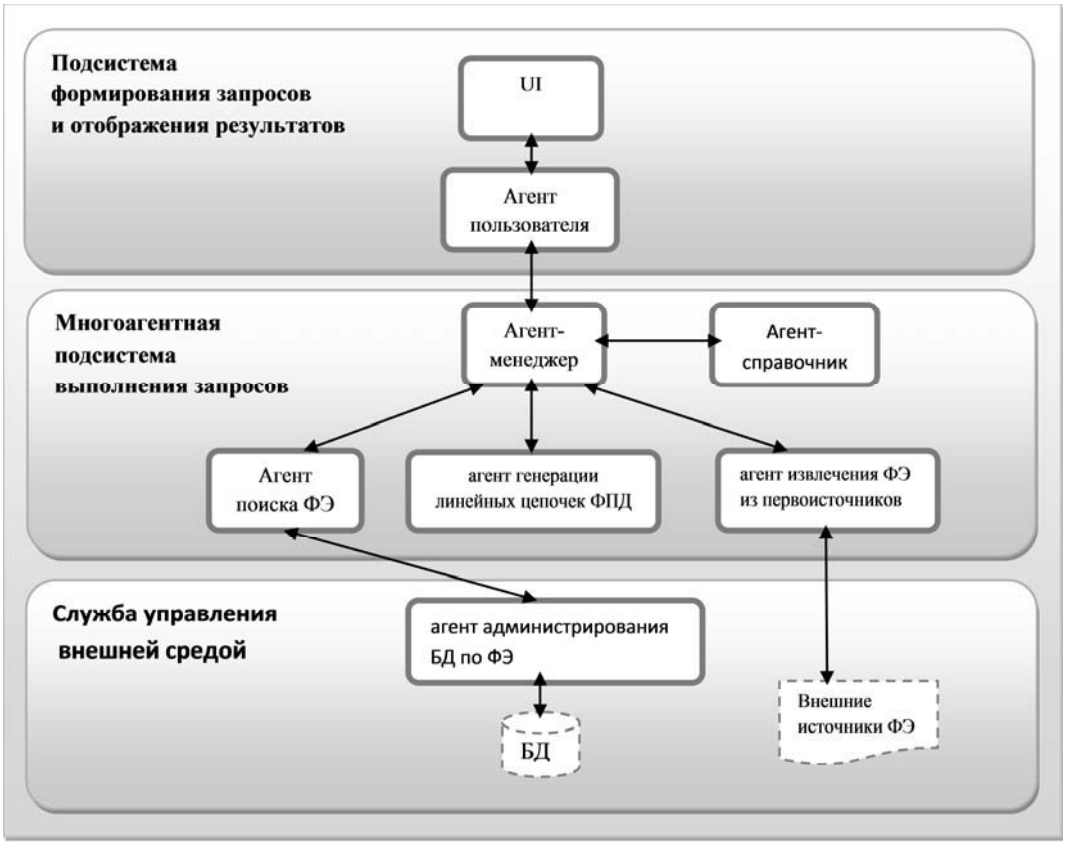



Рисунок 1 – Архитектура мультиагентной системы обработки БД по ФЭ

Система состоит из трех основных компонентов. Подсистема формирования запросов пользователей преобразует команды пользователей в запросы и отображает результаты. Служба управления внешней средой включает в себя централизованную базу данных ФЭ, инвариантную по отношению к предметной области [1] и внешние источники информации (файлы на диске, веб-страницы в сети Интернет). Подсистема выполнения запросов реализована в виде МАС. МАС выполняет обработку запросов, поступающих от агентов пользователя или от других агентов МАС. Проблемная среда МАС включает в себя следующие элементы:

(1) $MAC = <S, O, Pr, En>$,

где S – субъекты системы (пользователи); O – объекты системы (агенты); Pr – средства коммуникации как субъектов с объектами, так и объектов с объектами (протокол общения); En – внешняя среда агента (база данных ФЭ и внешние хранилища информации).

Основной задачей для агента является выполнение запросов от субъектов или других агентов. Каждый агент имеет уникальное имя в системе. По этому имени можно обратиться к агенту. Кроме того, модель каждого агента включает: список выполняемых запросов, алгоритм функционирования. В системе определены следующие типы агентов:

- агент-менеджер (распределяет запросы пользователя между агентами-исполнителями);

- агент-справочник (хранит информацию о зарегистрированных в среде агентах-исполнителях, а также историю выполнения запросов);
- агент-исполнитель (выполняет определенную задачу обработки базы данных ФЭ);
- агенты пользователя, преобразующие запросы пользователей в запросы к другим агентам.

Взаимодействие между агентами реализовано в виде «запроса-ответа». Для этого используется передача протоколов между агентами. Протокол определен набором команд. Каждый агент может выполнять часть команд из этого набора. Протоколы общения имеют следующий вид:

(2) $Query = < Name, Params, Result, Objects, Type, S, D>,$

где Name – наименование запроса; Params – список параметров, используемый для запроса; Result – метка о выполнении запроса; Objects – список объектов результата запроса; Type – тип сообщения (запрос / ответ); S – агент-источник; T – агент-приемник.

Для реализации мультиагентной системы рассматривались различные платформы проектирования мультиагентных систем. Основными критериями при выборе платформы были: поддержка dot.net, наличие документации, открытые исходные коды. В результате анализа была выбрана платформа AgentService [8]. Данная платформа работает на dot.net версии 2.0 и выше. Все коды открыты. В наличие имеется документация и примеры разработки агентов.

Тестовые испытания программы AgentService выявили ошибки в работе платформы. При изучении исходных кодов программы были выявлены нарушения правил проектирования и кодирования. В результате этих ошибок работа платформы была нестабильная и всегда приводила к экстренной остановке в работе программы.

В ходе данной работы была реализована собственная платформа разработки мультиагентных систем под dot.net. Программа разрабатывалась на языке программирования c#. При этом использовались знания и опыт, полученные при изучении платформы AgentService. Данная платформа получила название FreeAgent. Было реализовано несколько простых мультиагентных систем. Проведенные испытания показали хорошую работоспособность платформы: агенты отработали без ошибок, общались друг с другом, знания агентов сохранялись на внешний носитель информации.

После тестовых испытаний на платформе FreeAgent была реализована мультиагентная система обработки базы данных по ФЭ. Кроме того, была создана библиотека функций, содержащая набор объектов и методов, позволяющая упростить процесс разработки новых агентов для FreeAgent. Набор объектов и методов содержит понятия из предметной области обработки базы данных ФЭ. В ходе работы были разработаны следующие агенты МАС:

- агент-менеджер;
- агент-справочник;
- агент поиска ФЭ (агент-исполнитель). Выполняет поиск ФЭ;
- агент генерации линейных цепочек ФПД (агент-исполнитель). Выполняет построение линейных цепочек ФПД;
- агент извлечения ФЭ из первоисточников (агент-исполнитель). Осуществляет поиск информации о ФЭ в сети Интернет.
- пользовательский агент. Получает от пользователя команды и преобразует их в запросы к агенту-менеджеру.

Агенты поиска ФЭ, генерации линейных цепочек ФПД, извлечения ФЭ из первоисточников разрабатывались на базе существующих автоматизированных систем обработки базы данных ФЭ.

## 2 Особенности применения мультиагентного подхода

МАС имеет централизованное управление. Все запросы от пользователей и других агентов системы поступают к агенту-менеджеру. Данный агент распределяет задачи между другими агентами системы. Для этого он использует знания агента-справочника об ранее выполненных запросах.

Разработанная МАС имеет несколько особенностей. Логика обработки базы данных по ФЭ заключена в функциях агентов, что позволяет упростить процесс доработки программы путем добавления новых агентов с необходимой функциональностью. В МАС возможно использование нескольких агентов одного типа, т.е. параллельное использование нескольких алгоритмов обработки ФЭ. Кроме того, снижаются требования к программе. Нет необходимости в комментировании всего кода. В МАС важно документировать те функции системы, которые доступны разработчикам для реализации агентов.

В МАС намного эффективнее решаются задачи оптимизации кода. Например, с базой данных по ФЭ работает только агент поиска ФЭ. Другим агентам при необходимости обращения к базе данных достаточно создать запрос к данному агенту. Таким образом, один агент может использовать результаты работы другого агента. Например, агент генерации ФПД строит цепочки из ФЭ, а поиск ФЭ осуществляет агент-поиска.

## Заключение

Использование мультиагентного подхода позволило объединить автоматизированные системы обработки ФЭ в единый комплекс и эффективно организовать взаимодействие между системами. Агенты взаимодействуют друг с другом для решения запросов пользователей.

С использованием мультиагентного подхода появляется возможность легко добавлять новые методы обработки ФЭ без изменения существующей системы. Для этого необходима только реализация нового агента.

В мультиагентной системе используется единая база данных ФЭ, поэтому все изменения в базе данных становятся доступны всем. При этом нет необходимости каждому агенту реализовывать работу с базой данных. Достаточно реализовать одного агента, а остальные агенты будут работать с ним.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 10-01-00135-а).

## Список литературы

[1] Яровенко, В. А. Совершенствование модели представления и средств управления массивом данных физических эффектов/ В. А. Яровенко, С. А. Фоменков// Вестник компьютерных и информационных технологий, 2010. - №9.- С. 28-31.

[2] Герасимов, А. М. Автоматизированная система поиска физических эффектов «Полезный эффект»/ А. М. Герасимов, П. А. Колчин, С. А. Фоменков// Программные продукты и системы, 2007.- № 4. – С. 38-39.

[3] Гопта, Е. А. Автоматизация процесса линейного синтеза физического принципа действия/ Е. А. Гопта, С. А. Фоменков, Г. А. Карачунова// В межвузовском сб. научных статей «Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып.9» - Волгоград: ВолгГТУ, 2010. - №11(71). - С. 129-133.

[4] Давыдов, Д. А. Автоматизированное проектирование линейных структур физических принципов действия технических систем/ Д. А. Давыдов, С. А. Фоменков. – Машиностроитель, 2002.- № 2. – С. 33-35.

[5] Коробкин, Д. М. Методы выделения структурированной физической информации в виде физических эффектов из текста/ Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков// Вестник компьютерных и информационных технологий, 2009.- № 10.- С. 35-39.
[6] Яровенко, В. А. Особенности применения мультиагентного подхода при разработке системы обработки структурированных физических знаний/ В. А. Яровенко, С. А. Фоменков// В межвузовском сб. научных статей «Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып.8» - Волгоград: ВолгГТУ, 2010.- №6(66). – С. 132-134.
[7] Яровенко, В.А. Формирование интегрированной системы обработки структурированных физических знаний с применением мультиагентного подхода/ В. А. Яровенко, С. А. Фоменков// В межвузовском сб. научных статей «Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып.7» - Волгоград: ВолгГТУ, 2009.- №12(60).- С. 126-128.
[8] AgentService. [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: http://www.agentservice.it.

**Author index**
**Индекс авторов**


**А**
Андреев Е.И., 370
Андреев М.В., 735
Андрюшкевич С.К., 376
Антропов А.А., 172
Анцыферов С.С., 804
Апанович З.В., 164
Арсеньев Д.Г., 556
Асанов А.З., 256, 524, 577, 583

**Б**
Бабанин И.О., 724
Батищев В.И., 532
Батышкина В.В., 286
Беленький Л.Б., 602
Белоконь С.А., 441
Белопухов В.Н., 607
Берковский Н.А., 556
Блинов С.В., 741
Богомолов В.П., 184
Богомолов Д.В., 184
Боргест Н.М., 211
Боровик С.Ю., 607
Боровский А.С., 692
Бреер В.В., 780
Буклешева М.С., 414

**В**
Валеев Д.Х., 524
Виноградов И.Д., 232
Виттих В.А., 46, 112, 125, 389
Волков В.Ю., 278, 286
Волков О.В., 710
Вольман С.И., 248
Вылегжанин А.С., 735

**Г**
Габдуллина Э.Р., 138
Габидулин М.А., 617
Гвоздев В.Е., 299, 356
Гермизина А.А., 414
Гинзбург А.Н., 159
Глухова Л.В., 498
Горелов Ю.Н., 507
Горельская Е.В., 692
Горемыкина Г.И., 291
Гридасов Г.Н., 389
Гриценко А.Е., 518
Гриценко Е.А., 389, 408
Губанов Н.Г., 532

**Д**
Данилов С.Б., 507
Демьянов Д.Н., 583
Дилигенский Н.В., 321, 326
Дмитриев Д.В., 724
Долотовская Н.В., 343
Долотовский И.В., 343
Драгунова Г.П., 262
Дык Л.Х., 278

**Е**
Ефимов А.П., 326

**Ё**
Ёлкин Д.А., 248

**З**
Заболотнов Ю.М., 550
Заплаткин Ю.Ю., 131
Засов В.А., 538

Захаревич М.А., 131
Звонков В.Б., 786
Зеленцов В.А., 686
Золотухин Ю.Н., 441, 449

**И**
Ивченко В.Д., 239
Игнатьев М.В., 125, 159
Ильина М.Н., 669
Ильясов Б.Г., 138, 569
Ирзаев Г.Х., 219

**К**
Казанцев В.Н., 680
Карбовничий В.П., 710
Каримов В.С., 577
Касимов А.М., 472
Кведер Л.В., 414
Кириллов Н.П., 116
Кистанов А.М., 243
Китлер С.В., 433
Кичигин В.В., 100
Клейменова Е.М., 718
Ковалёв С.П., 376
Кожевников С.С., 724
Кольбова Э.В., 735
Кондратьев А.С., 680
Котенев В.Д., 680
Котов В.Е., 4
Кочемасова Е.И., 669
Кравцов С.В., 634
Крыжановский Г.А., 746
Кубышкин А.С., 376
Кузнецов А.В., 641
Кузнецов В.Е., 641
Кузнецов Н.А., 724
Кузнецов С.В., 389
Кузнецов С.И., 389
Кузьмук Е.В., 414
Купин В.В., 746
Курбатов Е.В., 724
Курганская Л.В., 507
Кутейникова М.М., 589, 595
Кычкин А.В., 370

**Л**
Лапицкая М.Х., 87
Ларин Е.А., 343
Ларюхин В.А., 718, 741
Левков А.А., 227
Ленькова А.В., 343
Лопота А.В., 656
Лузинский В.Т., 669
Лычев А.О., 625
Любимов А.Г., 656
Любимов В.В., 492

**М**
Майданович О.В., 478, 798
Макарова Е.А., 138
Максименко М.Ю., 100
Максимов А.И., 100
Малышев В.И., 492
Мальцев А.С., 441
Мамедли Э.М., 472
Мантуров А.И., 507
Маслова Л.В., 804
Матюшин М.М., 699, 710
Мелентьев В.С., 625
Мельников Л.И., 472
Меньшиков В.Ф., 60
Миляков Д.А., 458
Минаков И.А., 248
Миронов А.А., 625
Морозова М.В., 507
Мышкина И.Ю., 256

**Н**
Назаркина И.М., 389, 426
Нестеров А.А., 441, 449

Нестеров А.Ю., 109
Никольский А.Е., 184

**О**
Ольшанский В.Ю., 612
Онищенко Г.В., 741
Осинцев М.С., 663
Охтилев М.Ю., 798
Очков Д.С., 741

**П**
Павлов В.А., 680
Павлова А.Н., 138
Палицын В.А., 798
Паршина И.Ф., 612
Петров И.О., 466, 478
Печенков А.Ю., 100
Пешков Л.И., 351
Плешивцева Ю.Э., 87
Позняк И.В., 93, 100
Полукаров Д.Ю., 268
Пономарёва М.А., 291
Потрясаев С.А., 686
Пунда Д.И., 201

**Р**
Райков Б.К., 595
Рапопорт Э.Я., 75
Ровнейко Н.И., 299
Ромкин М.В., 538
Русанов К.Е., 804

**С**
Сабитов И.И., 569
Савинков А.С., 524
Сазонникова Н.А., 484
Сазуров С.В., 724
Саитова Г.А., 569
Самаха Б.А., 286
Саушев А.В., 649
Секисов Ю.Н., 589
Сельвесюк Н.И., 562
Сергеев С.Ф., 131
Сердюк В.Е., 741
Серебряков А.В., 612
Сесекин А.Н., 760
Сёмкин Н.Д., 492
Сидорова Е.А., 753
Симонова Е.В., 710, 718, 724
Скобелев О.П., 595, 602
Скобелев П.О., 710, 718, 724, 735, 741
Смирнов С.В., 125, 172, 177, 232, 262
Соболев В.А., 663
Соколов Б.В., 686, 798
Соллогуб А.В., 710
Соловьев В.А., 18
Соловьев В.И., 776
Степанов М.Е., 724
Степановская И.А., 305
Степашкин В.Н., 518
Стуликова К.А., 268
Суворова Е.Г., 177
Сузанский Д.Н., 452
Сюсин И.А., 710, 718

**Т**
Таназлы А.И., 356
Таназлы Г.И., 356
Темичев А.А., 370
Тимбай И.А., 498
Тимофеев А.И., 770
Томин В.А., 741
Трегубов А.М., 376
Тюпикова Т.В., 399
Тюрин И.Ю., 735
Тяпухина Т.В., 389, 414

**Ф**
Федосеева Л.С., 389, 426
Федянин Д.Н., 764
Феоктистов А.Л., 718
Филатов Д.М., 641
Филимонов А.Б., 546
Филимонов Г.А., 239
Филимонов Н.Б., 546
Филиппов М.Н., 441, 449
Фоменков С.А., 811
Фурасов В.Д., 399

**Ц**
Цапенко М.В., 335
Царев А.В., 710, 718, 724, 741
Цивирко Е.Г., 686

**Ч**
Чекалов Л.Л., 191
Ченцов А.А., 760
Ченцов А.Г., 760
Черленяк Н.Н., 710
Чехов В.А., 724
Чжан Я., 641
Чуваков А.В., 532
Чуприков А.А., 466

**Ш**
Шабунин А.Б., 724
Шатунов А.Н., 93, 100
Шелудько Л.П., 351
Шепилов Я.Ю., 735
Шошмин В.А., 649

**Я**
Янковская А.Е., 433
Яновская А.В., 676
Яровенко В.А., 811

**B**
Bijl A., 150

**I**
Inden U., 23

**K**
Kretov S., 52

**R**
Rzevski G., 3

Научное издание

**Труды XIV Международной конференции**

# ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

19-22 июня 2012, Самара, Россия

**Редакторы:**

**академик Е.А. Федосов**

**академик Н.А. Кузнецов**

**профессор В.А. Виттих**

**Proceedings of the XIV International Conference**

# COMPLEX SYSTEMS: CONTROL AND MODELING PROBLEMS

June 19-22, 2012, Samara, Russia

**Editors:**

**academician E.A. Fedosov**

**academician N.A. Kuznetsov**

**professor V.A. Vittikh**