

На правах рукописи

*Васильев*

**Васильев Евгений Михайлович**

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ В КРИТИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ  
НА ОСНОВЕ ЭВОЛЮЦИОННОГО ПОДХОДА**

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Воронеж – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет».

**Научный консультант** **Подвальный Семён Леонидович,**  
заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты** **Большаков Александр Афанасьевич,**  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Институт компьютерных наук и технологий, профессор

**Громов Юрий Юрьевич,**  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Институт автоматизации и информационных технологий, директор

**Хаустов Игорь Анатольевич,**  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий», кафедра информационных и управляющих систем, заведующий кафедрой

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук"

Защита состоится 19 марта 2024 года в 12 часов на заседании диссертационного совета 99.2.031.03, созданного на базе ВГТУ, ВГУ и ЛГТУ, по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14, аудитория 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Воронежского государственного технического университета и на сайте [www.cchgeu.ru](http://www.cchgeu.ru).

Автореферат разослан

2023 г

Учёный секретарь  
диссертационного совета 99.2.031.03  
доктор технических наук, профессор

Белецкая Светлана Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Возрастающая сложность процессов управления техническими системами обусловлена стремлением вывести человека из непосредственного участия в этих процессах и исключить влияние так называемого «человеческого фактора» на результаты такого управления. Особенно актуально устранение этого влияния при управлении структурно неустойчивыми объектами и сложными объектами с высокой и неопределённой динамической размерностью (объекты энергетического комплекса, процессы химического производства, космические, воздушные и подводные аппараты, в том числе и полностью автономные).

Достаточно распространённым свойством этих объектов является существование в них качественно отличающихся режимов работы с граничным – критическим состоянием между этими режимами. В системах с такими объектами состояние нормального функционирования может занимать окрестность, близкую к критическому режиму (синхронизированные энергосистемы, структурно неустойчивые объекты, летательные аппараты, балансирующие объекты), либо осуществлять управляемый переход от одного режима к другому (многорежимные технологические процессы), или, напротив, переход через критический режим может быть недопустимым (потенциально опасные технологические процессы, котельные и газодинамические установки).

Распространяя понятие управления на системы принятия решений, к критическому состоянию можно отнести малую область глобального экстремума, достижение которого является целью функционирования такой системы.

Потеря управления в системах с критическими режимами во многих случаях приводит к катастрофическим последствиям и значительным экономическим убыткам. Это обстоятельство позволяет отнести рассматриваемые системы к более широкому классу – к системам критического назначения, отказы в которых недопустимы из-за угрозы возникновения аварий экологического масштаба и человеческих жертв.

### **Степень разработанности.**

Сложность и разнообразие задач управления объектами критического назначения приводит к так называемой проблеме «неупрощаемой сложности» – возникновению противоречия между степенью усложнения систем управления и показателями их качества: с ростом сложности надёжность функционирования этих систем начинает снижаться (Красовский А.А., Колесников А.А.). Это противоречие усугубляется трудностями практического внедрения современных алгоритмов управления в промышленность (Бобцов А.А., Холунин С.А., Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л.). Указанное расхождение между теорией и практикой в современной науке об управлении приобретает в настоящее время характер методологического кризиса, выражающегося в отрыве математических методов управления от физического содержания решаемых задач (Новиков С.П., Филимонов Н.Б., Abbott D.).

Изложенные выше обстоятельства позволяют сделать вывод о существовании важной научной и практической проблемы построения систем управления, обеспечивающих высокую надёжность и качество функционирования сложных объектов с критическими режимами.

В то же время следует указать на несколько направлений в теории управления, существо которых в значительной степени опирается именно на физическое содержание решаемых задач. Сюда в первую очередь следует отнести:

– системы с переменной структурой (Лётов А.М., Емельянов С.В., Уткин В.И., Краснова С.А.);

- системы подчинённого регулирования (Kessler С., Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г.);
- идеи гомеостатического управления (Горский Ю.М., Новиков Д.А., Новосельцев В.Н., Филимонов Н.Б., Forrest J.);
- диверсные (от англ. diversity – разнообразие) системы защиты (МАГАТЭ, Большаков А.А., Кулик А.А., Сергушов И.В., Скрипаль Е.Н., Андропов Е.В., Коган И.Р., Поваров В.П., Павлов Л.П., Алпеев А.С., Зверков В.В.);
- системы синергетического управления (Колесников А.А., Веселов Г.Е., Кузьменко А.А., Попов А.Н., Хакен Г.);
- киберфизические системы (Большаков А.А., Кравец А.Г., Цветков В.А., Щербаков М.В., Громов Ю.Ю., Исхаков А.Ю., Мещеряков Р.В., Фомин Н.А., Lee E.A., Rajeev A., Seshia S.A, Song H.).

Большинство из перечисленных направлений работ традиционно относилось к разным разделам теории управления, и длительное время развивались независимо.

Идея о существовании системообразующего единства указанных направлений была высказана С.Л. Подвальным в 1970-х годах и сформулирована в виде концепции многоальтернативности строения и функционирования сложных управляемых систем. В рамках этой концепции им предложен ряд принципов её реализации, которые не требуют усложнения систем управления и опираются на то эмпирически установленное обстоятельство, что в биологических системах с ростом их сложности никогда не возникают перечисленные выше трудности высокой размерности, но проявляется противоположное свойство, получившее название «неусложняемой простоты» – чем сложнее биологическая система, тем устойчивее она функционирует в изменяющихся условиях внешней среды. Конструктивный характер этого обстоятельства долгое время оставался незамеченным, в то время как искусственная реализация механизмов многоальтернативности живых систем позволяет воспроизвести указанное свойство в технических системах и открывает новые возможности в управлении сложными объектами с критическими режимами. Раскрытию этих возможностей и их методической разработке посвящена настоящая работа.

Тематика работы соответствует Стратегии научно-технического развития Российской Федерации, утверждённой Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 (ред. от 15.03.2021 г. № 143) и приоритетному направлению в рамках этой Стратегии: – «Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта». Исследование выполнено в русле основного научного направления Воронежского государственного технического университета «Вычислительные комплексы и проблемно-ориентированные системы управления» (приказ № 246 от 20.05.2021 г.).

**Объект исследования** – сложные динамические объекты с критическими режимами функционирования: структурно неустойчивые, многорежимные и динамически неопределённые объекты, объекты с нестационарными параметрами, а также комбинаторные объекты высокой размерности.

**Предмет исследования** – методологический подход к проектированию систем управления сложными техническими объектами, направленный на воспроизведение в этих системах эволюционных свойств многоальтернативности живых систем.

**Цель работы** – теоретическое обоснование и разработка методологии построения систем многоальтернативного управления сложными объектами с критическими режимами с целью повышения показателей качества этих систем и сохранения работоспособности в указанных режимах без аварийного отключения или завершения работы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Моделирование и исследование механизмов многоальтернативности биологических систем как эволюционной стратегии их существования.
2. Анализ кибернетического содержания основных принципов многоальтернативности управления сложными системами, определяющего методы, способы и приёмы построения этих систем на основе эволюционного подхода.
3. Разработка методологии построения систем многоальтернативного управления на базе эволюционных принципов многоальтернативности.
4. Моделирование и исследование свойств многоальтернативного управления в детерминированных системах с критическими режимами.
5. Разработка моделей и алгоритмов многоальтернативного управления в стохастических системах.
6. Разработка моделей и алгоритмов многоальтернативного управления в системах с хаотическими режимами.
7. Разработка многоальтернативных систем с существенной неопределённостью.
8. Построение систем многоальтернативного управления с синергетическими свойствами.
9. Разработка многоальтернативных систем принятия решений на основе эволюционного подхода.
10. Апробация результатов исследований и их реализация при решении практических задач на производстве.

**Научная новизна работы** характеризуется следующими результатами:

1. Предложены новые математические модели эволюционных процессов биологических систем с учётом кризисных – критических – периодов эволюции, раскрывающие, в отличие от известных моделей, влияние на эти процессы механизмов многоальтернативности их строения и функционирования, которые обеспечивают живым системам устойчивое существование и развитие в изменяющихся условиях внешней среды (глава 2; п. 3 паспорта специальности 2.3.3).
2. Раскрыто конструктивное содержание принципов многоальтернативного управления сложными системами, впервые определяющее степень общности этих принципов и позволяющее включить их в перечень базовых принципов кибернетики (глава 2; п. 3 паспорта специальности 2.3.3).
3. Предложена методология построения систем управления сложными техническими объектами с критическими режимами, основанная, в отличие от известных, на направленном воспроизведении в этих системах эволюционных свойств живых систем, определяющих способность последних успешно преодолевать кризисные периоды своего развития (главы 2-7,8; п. 3 паспорта специальности 2.3.3).
4. Разработаны новые модели и методы реализации эволюционных принципов многоальтернативности в системах управления объектами с критическими режимами с различной степенью неопределённости: детерминированными (глава 3), стохастическими (глава 4), хаотическими (глава 4) и с существенно неопределёнными параметрами и отношениями между переменными (глава 5). Отличие этих моделей и методов заключается в использовании в своей основе разработанной в диссертации эволюционной методологии

построения систем управления, в результате чего достигается улучшение показателей качества этих систем (пп. 4,5,8,14 паспорта специальности 2.3.3).

5. Разработаны модели и методы реализации принципов многоальтернативности при построении синергетических систем управления объектами с критическими режимами, отличающиеся тем, что эти модели и методы обеспечивают указанное свойство синергетичности в результате связанного регулирования, основанного на принципах многоуровневой передачи управления и блочного строения регулятора сообразно с собственным движением объекта (глава 6; пп. 4,5 паспорта специальности 2.3.3).

6. Предложены системы интеллектуальной поддержки принятия решений в системах управления с критическими режимами, использующие, в отличие от известных, активные нейросетевые модели с перестраиваемой структурой, которые позволяют исключить эффект переобучения в системе и улучшить её обобщающие свойства (глава 7; п. 6 паспорта специальности 2.3.3).

7. Разработаны модель и метод принятия решений в задачах управления с комбинаторной неопределенностью, отличающиеся использованием в своей основе эволюционного механизма матричной репликации, обеспечивающего повышение вероятности нахождения глобального экстремума в задачах управления комбинаторного типа (глава 7; п. 6 паспорта специальности 2.3.3).

**Теоретическая значимость работы** состоит в разработке методологии построения систем многоальтернативного управления сложными объектами на основе эволюционного подхода, обеспечивающего повышение надёжности и качества функционирования этих объектов в критических режимах, в частности:

- в разработке единого теоретического подхода к построению систем управления сложными объектами с критическими режимами, основанного на направленном воспроизведении в них эволюционных механизмов биологических систем;

- в построении моделей эволюции биологических объектов и систем, позволивших выделить и сформулировать в качестве таких механизмов принципы многоальтернативности строения и функционирования сложных систем любой природы;

- в раскрытии кибернетического содержания эволюционных принципов многоальтернативности, указывающего на конкретные пути воспроизведения этих принципов в искусственных системах управления;

- в разработке общей структуры систем многоальтернативного управления сложными объектами с критическими режимами различной физической природы.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке конкретных моделей, методов, способов и приёмов реализации систем многоальтернативного управления сложными объектами с критическими режимами функционирования: детерминированными, вероятностными, хаотическими, с существенно неопределёнными состояниями, а также в системах интеллектуальной поддержки принятия решений.

Разработанные в диссертации модели и методы раскрывают конструктивный – практический характер эволюционных принципов многоальтернативности:

- принцип многоуровневости и иерархии строения и функционирования – обеспечивает возникновение в сложных системах свойства гомеостазиса;

- принцип многообразия и разделения функций подсистем – позволяет реализовать адаптивную передачу управления между ними и высокую гибкость системы в целом в условиях её открытого взаимодействия с изменяющейся внешней средой;

– принцип модульности – порождает комбинаторное многообразие вариантов построения и возможных режимов работы системы при ограниченном количестве отличающихся типовых модулей.

Реализация указанных принципов при построении систем управления сложными промышленными объектами позволяет повысить надёжность и качество их функционирования в критических режимах, приближая их в этом отношении к свойству гомеостаза живых систем.

### **Реализация и внедрение результатов работы.**

Результаты работы использованы при разработке системы электроснабжения научно-энергетического модуля Международной космической станции (АО «Орбита» (г. Воронеж)), для построения диверсных систем защиты и предотвращения аварийных ситуаций на Нововоронежской атомной станции, для оценки влияния на надёжность работы автоматизированной системы радиоконтроля при интеграции новых компонентов (ОСП АО «ИРКОС» (г. Воронеж)), при разработке подсистем диспетчерского контроля электрической сети Россети центр Воронежэнерго (ООО «Новые информационные системы 21»), в технологическом процессе тепловлажностной обработки бетонных изделий (ООО «СТК Бетон» (г. Воронеж)), при разработке прямохаотических систем широкополосной связи с защищёнными каналами (АО ВЦКБ «Полюс» (г. Воронеж)). Результаты исследований внедрены в учебный процесс Воронежского государственного технического университета (направление подготовки «Управление в технических системах»). По результатам исследований получено два патента РФ на изобретения, и зарегистрированы две программы для ЭВМ в Федеральном государственном центре информационных технологий и систем – ЦИТИС [64-67].

**Методология и методы исследования.** Общей методологической основой работы является воспроизведение в искусственных системах управления и принятия решений механизмов адаптивной эволюции живых систем. При выполнении конкретных исследований использовались методы теории автоматического управления, методы системного анализа и принятия решений, оптимизации и нечёткой логики. Проверка теоретических положений и адекватности разработанных в диссертации моделей проводилась использованием технологий компьютерного моделирования и сравнением с практическими результатами.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Математические модели эволюционных процессов биологических систем, с помощью которых показано, что открытые живые системы достигли высокой степени адаптивного взаимодействия с внешней средой на основе механизмов многоальтернативности их строения и функционирования (глава 2).

2. Конструктивное содержание принципов многоальтернативности строения и функционирования сложных систем:

– принцип многоуровневости и иерархии, обеспечивающий возникновение в сложных системах свойства гомеостаза;

– принцип многообразия и разделения функций подсистем, позволяющий добиться упрощения каждой подсистемы, а также обеспечить способность системы в критических ситуациях выполнять свои функции в ограниченном объёме, т.е. обеспечить свойство живучести;

– принцип модульности, порождающий комбинаторное многообразие вариантов построения и возможных режимов работы системы. Реализация этого принципа в сложной системе предотвращает, в частности, возникновение каскадного нарастания

аварийных ситуаций в критических режимах функционирования многомодульной системы (глава 2).

3. Методология построения систем управления сложными объектами, основанная на направленном воспроизведении в них эволюционных механизмов биологических систем и открывающая, благодаря этой аналогии, новые возможности в управлении наиболее ответственными, критическими режимами функционирования объектов высокой размерности (главы 2-7,8).

4. Прикладные модели и методы реализации принципов многоальтернативности в системах с критическими режимами различной физической природы и назначения: в детерминированных системах (глава 3), в стохастических системах (глава 4), в системах с хаотическими режимами (глава 4), в системах с нечётким управлением (глава 5), – с помощью которых формируется логическая структура разрабатываемой методологии многоальтернативного управления и обеспечивается её результативность.

5. Модели и методы реализации принципов многоальтернативности при построении синергетических систем управления объектами с критическими режимами, обеспечивающие воспроизведение в них указанного свойства в силу методологического единства принципов многоальтернативного и синергетического управления (глава 6).

6. Модель многоальтернативной системы интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении распределённой энергосистемой с критическими режимами – отказами, использующая в своей основе активную нейросеть фасетного типа с перестраиваемой структурой, которая позволяет исключить эффект переобучения в системе и улучшить её обобщающие свойства (глава 7).

7. Модель и метод принятия решений, реализующие эволюционный механизм матричной репликации и обеспечивающие повышение вероятности нахождения глобального экстремума в задачах управления комбинаторного типа (глава 7).

#### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность защищаемых положений работы, работоспособность и результативность предлагаемых решений подтверждается приведёнными в диссертации:

- результатами компьютерного моделирования;
- результатами анализа и синтеза как известных, так и новых примеров систем управления, использующих в своей основе принципы многоальтернативности строения и функционирования, и охватывающих широкий класс объектов различной физической природы с критическими режимами: структурно неустойчивые, многорежимные и динамически неопределённые объекты, объекты с нестационарными параметрами, а также систем принятия решений в задачах высокой размерности комбинаторного типа;
- практическим внедрением результатов работы на ряде промышленных предприятий и в учебном процессе.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях и совещаниях: XII, XIII Всероссийских совещаниях по проблемам управления (Москва, 2014,2019), XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» (Старый Оскол, 2014), Международной научно-практической конференции «Комплексные проблемы техносферной безопасности» (Воронеж, 2015-2017), VIII-XII Международных конференциях «Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий» (Воронеж, 2015–2019), International Conference «Stability and Control Processes» in Memory of V.I. Zubov (Saint-Petersburg, 2015), Международной научно-технической конференции «Вопросы кибербезопасности, моделирования и



обработки информации в современных социотехнических системах» (Курск, 2016), IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Моделирование и наукоёмкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах» (Новокузнецк, 2016), V International Workshop on Mathematical Models and their Applications (Krasnoyarsk, 2016), XII международной научно-практической конференции «Современные сложные системы управления» (Липецк, 2017), XII International Symposium Intelligent Systems, (Moscow, 2016), VIII Международной научной конференции «Системный анализ, управление и обработка информации» (Ростов-на-Дону, 2017), XI International Conference on Application of Information and Communication Technologies (Moscow, 2017), Международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологиях» (Санкт-Петербург, 2017,2020), International Russian Automation Conferences (Sochi, 2018,2019,2022), VI International Conference on Nonlinear Analysis and Extremal Problems (Irkutsk, 2018), XIII,XIV International Scientific-Technical Conferences on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings», (Saint Petersburg, 2018, Kursk, 2019), International Science Conference «Business Technologies for Sustainable Urban Development», (Saint Petersburg, 2018), XXI International Conference Complex Systems «Control and Modeling Problems» (Samara, 2019), Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные информационные системы» (Воронеж, 2019), International Conferences on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (Sochi, 2019,2022), II International Theoretical and Practical Conferences on Alternative and Smart Energy (Voronezh, 2020), International Conference Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling (Divnomorskoe, 2021), International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (Lipezk, 2022), International Conference for Information Systems and Design (Tashkent, 2022).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 98 научных работ, в том числе: 36 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 26 – в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, одна монография. По итогам выступлений на конференциях опубликовано 42 работы. Получено два патента РФ на изобретения, зарегистрированы две программы для ЭВМ в Федеральном государственном центре информационных технологий и систем ЦИТИС. Основные публикации приведены в конце автореферата.

**Личный вклад соискателя.** В работах, опубликованных в соавторстве по теме диссертации, лично автором получены и выносятся на защиту:

- теоретическое обоснование эволюционных принципов многоальтернативного управления [17,18,20,27,31,37,38,39,46,54,56,63,73,76];
- кибернетическое содержание этих принципов [31,63];
- общая функциональная схема систем многоальтернативного управления [18,21,63,72];
- прикладные модели, методы и алгоритмы реализации принципов многоальтернативности:
  - в детерминированных системах с критическими режимами [1,2,6,7,9,16,17,23,26,29,33,36,43,48,51,52,53,57,60,63,64,65,68,69,70,71,74,75,78,83];
  - в стохастических системах [13,15,18,19,21,22,32,59,63];
  - в системах с хаотическими режимами [8,10,11,14,18,50,63,81];
  - в системах с нечётким управлением [12,25,30,40,45,63];
  - в синергетических системах управления [5,34,44,47,49,55,61,63,77,79];
  - в системах принятия решений [3,4,21,24,28,35,41,42,58,62,63,66,67,82].

**Тематика исследований** соответствует пунктам паспорта специальности ВАК 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами:

3. Методология, научные основы, средства и технологии построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т.д.

4. Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами.

5. Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами.

6. Научные основы и методы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами.

8. Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников.

14. Теоретические основы и прикладные методы резервирования контуров управления, повышения эффективности, надежности и живучести АСУ на этапах их разработки, внедрения и эксплуатации.

**Структура и объём диссертации.** Работа включает в себя введение, 8 глав, заключение, список литературы (458 наименований), приложение (акты внедрения). Диссертация содержит 399 страниц основного текста, включая 174 рисунка и 18 таблиц.

**Благодарности.** Выражаю глубокую благодарность своему учителю, профессору Подвальному Семёну Леонидовичу, за тот терпеливый труд и активную поддержку, которые завершились появлением настоящей диссертации.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, её цель и решаемые задачи, представлены основные результаты, научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе «Истоки и история становления эволюционного подхода к управлению сложными объектами в критических режимах»** проведена укрупнённая классификация критических режимов сложных объектов безотносительно их физической природы (Таблица 1.1), которая свидетельствует о значительном разнообразии указанных режимов и указывает на необходимость рассмотрения в работе широкого класса объектов с различным характером отношений между переменными состояния: детерминированных, со случайными и хаотическими процессами, с существенной неопределённостью.

Задача автоматического управления объектами с указанными критическими режимами сталкивается с необходимостью поддержания их работоспособности в этих режимах без аварийных отключений или завершений работы в условиях высокой размерности систем и их структурной и параметрической изменчивости. Стремление преодолеть эти трудности на основе общеизвестных методов адаптивного и робастного управления приводит к дальнейшему усложнению и повышению динамического порядка систем, требует значительных вычислительных ресурсов и, как следствие, не находит широкого практического применения.

Таблица 1.1 – Критические режимы сложных объектов и систем

Режимы функционирования	Характеристика режима или системы
Предаварийные состояния	Невозможность реализации основных функций системы
Структурная и параметрическая неустойчивость	
Приграничные состояния между качественно отличающимися режимами	Многорежимные системы. Системы многоцелевого назначения
Неравновесные динамические режимы функционирования	Хаотические процессы тепло- и массообмена, в электронных устройствах
Многоэкстремальность функции цели комбинаторного типа	Системы поиска наилучших управленческих решений

Указанные обстоятельства явились основанием для обращения к биологическим прототипам рассматриваемых систем, эволюционные процессы в которых характеризуются непрерывной чередой кризисных – критических – состояний, вызванных изменениями условий внешней среды.

В п. 1.2 на основе анализа биологических аналогий сделан вывод о том, что открытые живые системы достигли высокой степени адаптивного взаимодействия с внешней средой на основе набора некоторых простых механизмов, связанных с многообразием их внутреннего строения и принципов функционирования, и не испытывают ограничений, связанных с растущей сложностью организмов. Результаты исследований указанных механизмов позволили объединить их в несколько общих принципов, которые составили в своей совокупности содержание эволюционной концепции многоальтернативного управления сложными системами, п. 1.3:

- принцип многоуровневости и иерархии строения и функционирования, обеспечивающий возникновение в сложных системах свойства гомеостазиса;
- принцип многообразия и разделения функций подсистем, позволяющий реализовать адаптивную передачу управления между ними и высокую гибкость системы в целом в условиях её взаимодействия с изменяющейся внешней средой;
- принцип модульности, порождающий комбинаторное многообразие вариантов построения и возможных режимов работы системы при ограниченном количестве отличающихся типовых модулей.

В эволюционном плане эти принципы неразрывно связаны с механизмом естественного отбора и дополняют его.

Результаты главы определяют собою основные задачи, решаемые в последующих главах работы:

- моделирование и изучение эволюционных механизмов многоальтернативности в живых системах с целью их воспроизведения в задачах управления искусственными сложными системами с критическими режимами;
- построение моделей и методов многоальтернативного управления объектами с критическими режимами с детерминированными, случайными и хаотическими процессами, а также в системах с существенной неопределённостью, включая системы принятия решений;
- обобщение полученных результатов до эволюционной методологии многоальтернативного управления.

**Во второй главе «Модели эволюционных процессов биологических систем с учётом роли механизмов многоальтернативности в кризисных – критических – периодах эволюции»** с целью теоретического обоснования перечисленных выше принципов многоальтернативности представлены модели эволюции для трёх уровней организации жизни: добиологического уровня возникновения макромолекул (модели квазивидов и сайзеров, п. 2.1), для уровня популяций (модель взаимодействия популяции с внешней средой в виде дискретного марковского процесса, п. 2.2), и для уровня экосистем (система дифференциальных уравнений массового баланса между элементами экосистемы, п. 2.3).

Анализ полученных моделей эволюционного поведения рассматриваемых систем позволил установить, что в основе этого поведения лежит общая системообразующая стратегия – стратегия многоальтернативности:

**на добиологическом этапе** возникновения жизни эта стратегия выражается в перекрёстных мутационных вариациях селективной ценности макромолекул, исключающих полное доминирование только одного типа из них, т.е. обеспечивающих совместное, но в то же время конкурирующее существование разнообразных типов макромолекул. В гомогенной среде устойчивая репликация этих молекул становится невозможной.

**для биосистем на уровне популяций** определяющим условием эволюции является увеличение генетического многообразия популяции со скоростью, превышающей скорость потока критических событий внешней среды. Нарушение этого условия, обусловленное, например, падением численности популяции ниже некоторого критического значения, приводит к её вырождению.

**эволюционные процессы в крупных экосистемах** принципиально осуществимы только в многоуровневой иерархической структуре системы при наличии многообразия видов с дифференцированными адаптационными функциями на каждом её уровне. Результаты моделирования показали, что с увеличением структурного и видового многообразия устойчивость экосистемы к кризисным ситуациям и её способность к сохранению сбалансированной траектории своего развития также возрастает. Это уникальное эволюционное свойство «неусложняемой простоты» сложных биологических систем является следствием многоальтернативной стратегии их строения и функционирования.

Таким образом, в главе на основе соответствующих моделей выработан базовый подход к достижению цели работы: применение эволюционных принципов многоальтернативного функционирования живых систем для построения искусственных систем управления сложными объектами с критическими режимами.

В последующих главах разработаны модели и методы реализации этого подхода в системах управления различными объектами с критическими режимами. Разнообразие классов указанных объектов и единый подход к их управлению позволили построить достаточно общие модели и методы многоальтернативного управления, которые пригодны для решения широкого круга практических задач и дают основание обобщить полученные результаты в общую методологию многоальтернативного управления.

**В третьей главе «Модели и методы многоальтернативного управления в детерминированных системах с критическими режимами»** разработан ряд моделей и алгоритмов указанных систем, и показано, что целенаправленное применение принципов этого управления позволяет добиться улучшения показателей качества систем сравнительно простыми техническими решениями. При этом во всех случаях под качеством системы будем понимать её способность выполнять функции, определяемые

назначением системы. Для количественной оценки этой способности в каждом конкретном примере будут использоваться соответствующие показатели качества. Кроме того, подразумевается, что вектор состояния системы связан с вектором управления детерминированно.

В п. 3.1 разработана система многоальтернативного управления многорежимным процессом тепловлажностной обработки бетона, которая использует принцип разделения функций подачи пара между исполнительными устройствами в каждом режиме: нагреве, выдерживании и остывании. Традиционный – одноканальный способ релейного управления этим процессом характеризуется двумя недостатками: большим числом переключений клапана подачи пара, ресурс которого по этой причине быстро исчерпывается, и заметными пульсациями температуры в камере. Применение многоальтернативного подхода к управлению этим процессом уже в его простейшем виде – введением нескольких каналов подачи пара, позволяет существенно уменьшить эти недостатки. На Рисунке 3.1а показан процесс регулирования температуры  $T(t)$  в камере с одним каналом подачи пара, мощностью  $W_{\text{осн}}(t)$ , а на Рисунке 3.1б – с тремя каналами: основным и двумя дополнительными с мощностями  $W_{\text{пост}}$  и  $W_{\text{доп}}(t)$ , причём канал с малой мощностью  $W_{\text{пост}}$  включен постоянно, канал средней мощности  $W_{\text{доп}}(t)$  включается при малых отклонениях  $T(t)$  от требуемой  $T_{\text{тр}}(t)$ , канал основной мощности  $W_{\text{осн}}(t)$  подключается только при относительно больших отклонениях температуры.

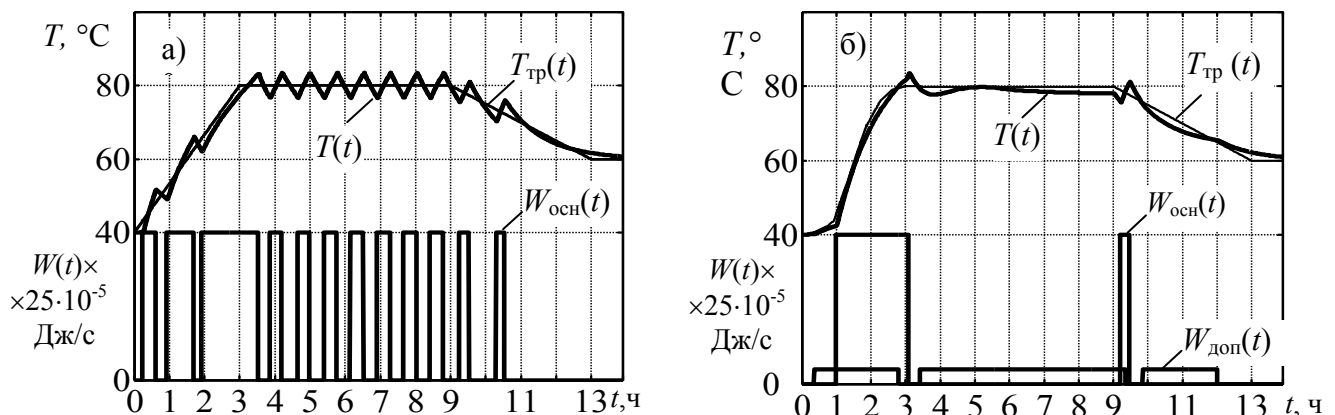


Рисунок 3.1 – Процесс регулирования в системе с основным каналом (3.1а), и с двумя дополнительными каналами  $W_{\text{пост}}$  и  $W_{\text{доп}}(t)$ , (3.1б)

Сравнение Рисунков 3.1а и 3.1б свидетельствует о том, что переход к многоальтернативному управлению позволяет уменьшить среднюю ошибку регулирования примерно в 5 раз, и существенно повысить надёжность системы за счёт снижения числа переключений паровых клапанов: для основного клапана – в 6 раз, для всех клапанов суммарно – в 2 раза.

В п. 3.2 предложены модель и метод синтеза робастного модального регулятора с использованием многоальтернативного принципа разделения функций, который позволяет разделить собственные числа характеристической матрицы системы на части, одна из которых формирует требуемый характер переходного процесса в нестационарной системе, а другая обеспечивает свойство грубости модальному регулятору. Такое разделение функций значительно упрощает совместную практическую реализацию указанных свойств в системе.

В п. 3.3 разработана модель управления системой электроснабжения научно-энергетического модуля Международной космической станции с тремя подсистемами: подсистемой солнечных батарей, аккумуляторными батареями и подсистемой получения электрической энергии от внешнего источника. Основным требованием к этой системе является обеспечение высоких показателей качества электроэнергии и сохранение работоспособности (живучести как способности системы в критических ситуациях выполнять свои функции в ограниченном объёме) при длительной автономной работе в условиях существенного изменения освещённости станции, неопределённой степени работоспособности узлов самой системы и значительных изменений тока нагрузки.

Показано, что выполнение этих требований достигается в результате применения эволюционных алгоритмов многоальтернативного управления. В частности, система регулирования из  $N_{СБ}$  параллельно работающих солнечных батарей в широком диапазоне изменения тока нагрузки построена на эволюционном принципе многоуровневости управления, в соответствии с которым по мере роста тока нагрузки поочередно подключается необходимое число  $n \leq N_{СБ}$  батарей таким образом, что  $n-1$  батарей отдают в нагрузку максимально возможный ток  $I_{СБ, \max}$ , определяемый их вольтамперными характеристиками, температурой  $T$  и плотностью светового потока  $W$ , одна батарея с условным номером  $n$ , подключившаяся последней, работает в режиме широтно-импульсного регулирования отдаваемого тока, а оставшиеся  $N_{СБ} - n$  батарей остаются незадействованными.

В результате, при любом значении тока нагрузки осуществляется регулирование не всей отдаваемой подсистемой солнечных батарей мощности, а только той её части, которая приходится на одну батарею. Этим достигается не только существенное упрощение задачи обеспечения устойчивости и показателей качества системы регулирования, но и возможность унификации контуров управления каждой батареей и блочного построения подсистемы из взаимозаменяемых блоков, что в совокупности обеспечивает надёжное функционирование подсистемы в широком диапазоне изменения её параметров, нагрузок, и при отказах отдельных блоков.

Для технического воплощения изложенного принципа работы подсистемы солнечных батарей используется разбиение общей зоны её регулирования на неперекрывающиеся диапазоны активного регулирования для каждой батареи. На Рисунке 3.2 показан пример такого разбиения для  $N_{СБ} = 3$ , где  $u$  – сигнал управления на входе широтно-импульсного преобразователя,  $I_{СБ1}, \dots, I_{СБ3}$  – токи солнечных батарей  $СБ_1, \dots, СБ_3$ , отдаваемые в нагрузку.

Таким образом, живучесть рассматриваемой системы достигается в результате применения эволюционных принципов многоальтернативного управления. На основе этих принципов в системе реализуется свойство технического гомеостаза.

В п. 3.4 предложена система адаптивной идентификации нелинейных объектов. Потребность в такой идентификации ощущается в высококачественных

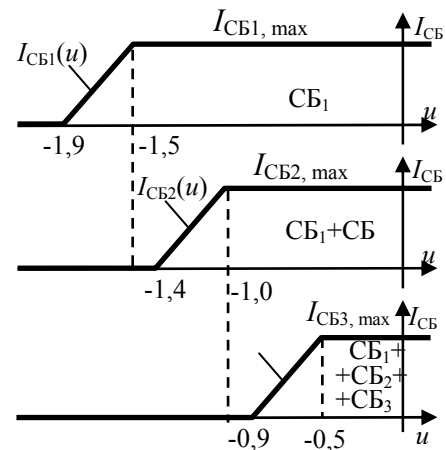


Рисунок 3.2 – Регулировочные характеристики для трёх солнечных батарей

каналах передачи данных, в которых необходимо обеспечить низкий уровень нелинейных искажений в условиях нестационарности параметров этих каналов. Построенная на основе принципов многоальтернативности модель системы адаптивной идентификации таких объектов даёт возможность:

- отказаться от моделирования нелинейной системы в виде «чёрного ящика», поскольку такой подход к моделированию в силу некоммутативности нелинейных и динамических линейных частей системы не позволяет получить её адекватную модель в сосредоточенном – однокаскадном – виде;

- воспроизвести в модели внутреннюю структуру исходной нелинейной системы и реализовать покаскадную идентификацию. Идентичность структур реальной системы и её модели снижает сложность задачи идентификации, сводя её к параметрическому типу;

- использовать в процессе идентификации системы вектор её состояния и сформировать многоуровневую структуру процесса адаптации. Реализация многоуровневой структуры создаёт предпосылку для декомпозиции общей задачи многомерной идентификации на простые подзадачи малой размерности.

Пример структуры системы идентификации представлен на Рисунке 3.3.

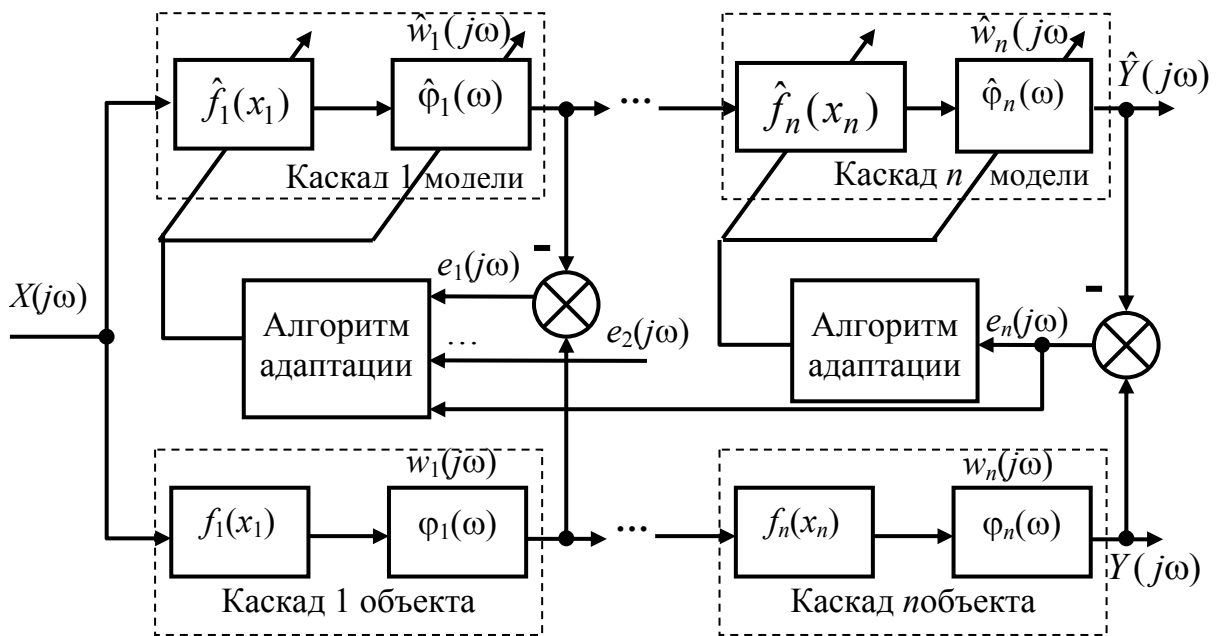


Рисунок 3.3 – Покаскадная идентификация по вектору состояния системы

В модели на Рисунке 3.4 для одного каскада использовались соотношения:

$$\hat{f}_1(x_1) = \sum_{i=1}^3 h_{1i} x_1 |x_1|^{i-1} = h_{11} x_1 + h_{12} x_1 \cdot |x_1| + h_{13} x_1 \cdot |x_1|^2, \quad \hat{W}_1(j\omega) = \frac{\hat{k}_1}{1 + j\omega \hat{T}_1},$$

$$e_1(h_{11}, h_{12}, h_{13}, \hat{T}_1, \hat{k}_1) = \sum_{i=1}^m (x_2(i) - \hat{x}_2(i))^2 \rightarrow \min.$$

где  $h_{11}, h_{12}, h_{13}, \hat{T}_1, \hat{k}_1$  – настраиваемые параметры.

Показатели покаскадной идентификации в сравнении с сосредоточенной – однокаскадной – даны в Таблице 3.1, и подтверждают преимущество предложенной модели: при меньшем порядке модели обеспечивается меньшее значение ошибки

Таблица 3.1 – Сравнение ошибок идентификации различными моделями

№	Вариант модели	Порядок модели	Среднее квадратическое значение ошибки, дБ
1	Однокаскадная (типовая) сосредоточенная модель с адаптацией по выходу	7	-31
2	Двухкаскадная модель с адаптацией по вектору состояния	5	-40

В п. 3.5 разработана детерминированная система сигнальной адаптации с нестационарным объектом и эталонной моделью, использующая принципы эволюционной концепции многоальтернативного управления, в частности – принципы многоуровневости и модульности.

Целью построения такой системы является увеличение рабочего диапазона (глубины) адаптации при сохранении классического преимущества схем сигнальной адаптации – их простоты. Для этого предложено из полного объекта высокого порядка физически выделить подобъекты первого и второго порядков, и для каждой из этих выделенных частей сформировать отдельную схему адаптации. Структура такой схемы для объекта третьего порядка показана на Рисунке 3.4, на котором обозначены:  $W_1(s)$ ,  $W_2(s)$  – передаточные функции каскадов соответственно первого и второго порядков в объекте;  $\hat{W}_1(s)$ ,  $\hat{W}_2(s)$  – аналогичные передаточные функции каскадов эталонной модели;  $k_1$ ,  $k_2$  – коэффициенты контуров адаптации.

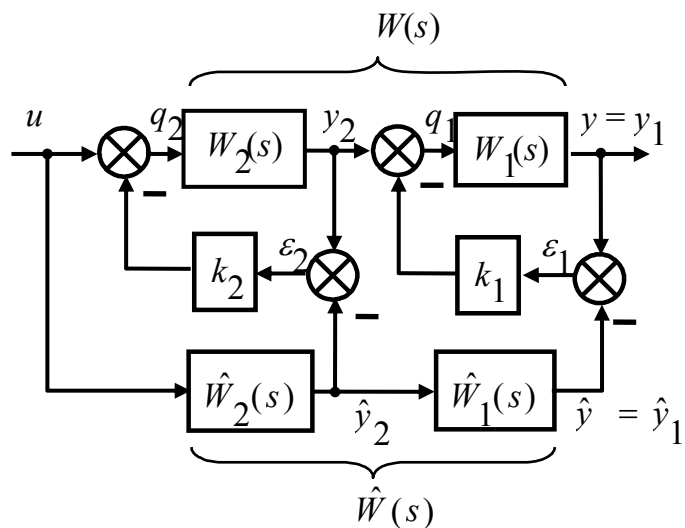


Рисунок 3.4 – Структурная схема системы двухуровневой сигнальной адаптации

Передаточная функция  $\tilde{W}(s)$  структуры на Рисунке 3.4:

$$\tilde{W}(s, k_1, k_2) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{W(s)(k_2 \hat{W}_2(s) + 1)}{(1 + k_1 W_1(s))(1 + k_2 W_2(s))} + \frac{W_1(s) k_1 \hat{W}(s)}{1 + k_1 W_1(s)}.$$

Очевидно, что

$$\lim_{\substack{k_1 \rightarrow \infty \\ k_2 \rightarrow \infty}} \tilde{W}(s, k_1, k_2) = \hat{W}(s).$$

Для проверки качества адаптации использованы эталонная модель и объект с передаточными функциями:



$$\hat{W}(s) = \frac{1}{s+1} \cdot \frac{1}{s^2 + 2s + 1}, \quad W(s) = \frac{b_0^1}{s+c_0^1} \cdot \frac{b_0^2}{s^2 + c_1^2 s + c_0^2},$$

и нестационарными параметрами, указанными в Таблице 3.2. Среднегеометрический диапазон  $R$  разброса параметров составляет 5,5.

$$R = \sqrt[5]{\frac{10}{0.2} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{0.2} \cdot \frac{0.2}{0.1} \cdot \frac{1}{0.1}} = 5,5.$$

Результаты моделирования показаны на Рисунке 3.5 и подтверждают высокие адаптационные свойства системы.

В п. 3.6 составлена и исследована математическая модель многоагентной системы со стратегией магистрального движения. В качестве примера решена задача формирования магистральной траектории роста экономических показателей региона с помощью директивного и конкурсного механизмов управления процессами рыночного взаимодействия отраслей. Полученная траектория подтверждает целесообразность предложенного альтернативного управления: сначала – под действием директивного управления – быстрый выход на магистральную траекторию, а затем движение по магистрали при конкурсном управлении. Предложенный способ многоальтернативного управления может быть использован для многоагентных систем, в которых агенты образуют единую систему, но их взаимодействие носит конкурентный характер.

**В четвёртой главе «Модели и методы многоальтернативного управления в стохастических и хаотических системах с критическими режимами»** рассматриваются системы, в которых нельзя установить детерминированное соответствие между управлением и состоянием системы, т.е. имеет место неопределённость этого соответствия.

В п. 4.2 разработана модель стохастической системы замкнутого цикла, демонстрирующая, в отличие от известных моделей, способность такой системы при критическом изменении условий функционирования восстанавливать состояние равновесия за счёт альтернативного управления: внутреннего резерва ресурсов, готовых при необходимости к включению в процесс работы системы, т.е. к возобновлению её полной работоспособности, Рисунки 4.1 и 4.2.

Случайный характер расходования и восстановления ресурсов во времени позволил представить функционирование системы в виде дискретного марковского процесса с множеством состояний  $S_0, S_1, \dots, S_r, \dots, S_n, \dots, S_{N+r}$ .  $S_0$  – состояние системы, в котором все ресурсы работоспособны – полная работоспособность ( $N$  единиц ресурсов

Таблица 3.2 – Варианты нестационарных параметров объекта

Вариант	$c_0^1$	$b_0^1$	$c_0^2$	$c_1^2$	$b_0^2$
v1	0,2	1	0,2	0,1	0.1
v2	10,0	1	0,2	0,2	1,0
v3	5,0	1	1,0	0,2	1,0

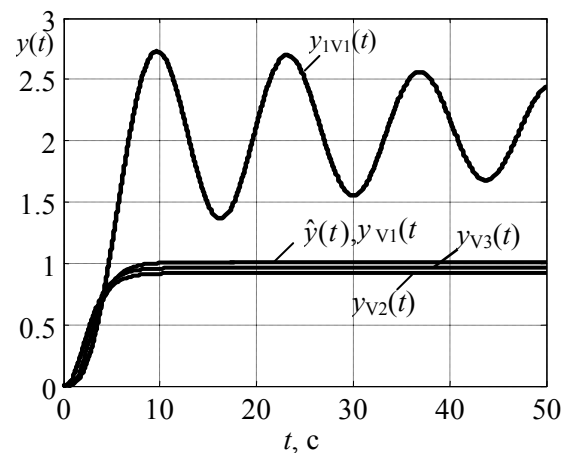


Рисунок 3.5 – Переходные характеристики для эталонной модели ( $\hat{y}(t)$ ) и вариантов объекта в схемах одноуровневой ( $y_{1v1}(t)$ ) и двухуровневой ( $y_{v1}(t), y_{v2}(t), y_{v3}(t)$ ) сигнальной адаптации

активны,  $r$  единиц ресурсов находятся в резерве);  $S_1$  – состояние системы, в котором одна единица ресурсов неработоспособна и находится в процессе восстановления;  $S_r$  – в системе неработоспособны все  $r$  единиц ресурсов и они находятся в процессе восстановления;  $S_{r+1}$  – в системе неработоспособно  $r + 1$  единиц ресурсов, т.е. после исчерпания внутренних резервов количество активных ресурсов в системе сократилось на единицу и стало равным  $N-1$ , и система уже не в состоянии выполнять свои функции в полной мере;  $S_n$  – в системе неработоспособно  $n$  единиц ресурсов;  $S_{N+r}$  – в систем не осталось активных ресурсов, т.е. система полностью неработоспособна.



Рисунок 4.1 – Схема распределения ресурсов в системе замкнутого цикла

Получены выражения для финальных вероятностей  $p_k$ :

где  $\lambda$  и  $\mu$  – интенсивности расходования и восстановления ресурсов. На Рисунке 4.2 показана

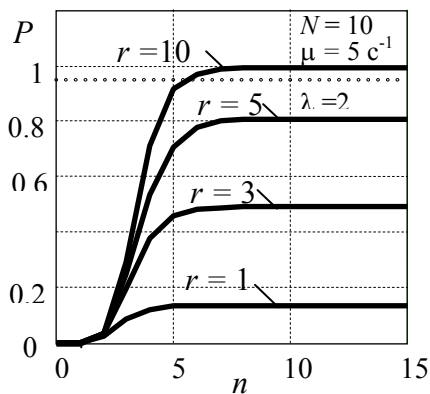


Рисунок 4.2 – Влияние объёма  $r$  резерва на надёжность системы

$$p_k = p_0 \left( N \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{1}{k!} \quad \text{для } 0 \leq k \leq n;$$

$$p_k = p_0 \left( N \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{1}{n! n^{k-n}} \quad \text{для } n+1 \leq k \leq r+1;$$

$$p_k = p_0 \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{N^{r+1}}{n! n^{k-n}} \cdot \prod_{m=1}^{k-1-r} (N-m)$$

для  $r+2 \leq k \leq N+r$ ,

влияние резерва  $r$  на вероятность  $P$  полного функционирования системы: введение достаточного объёма пассивного резерва позволяет обеспечить практически единичную вероятность полного функционирования системы без существенного увеличения числа активных каналов обслуживания.

**В п. 4.3.3** в качестве примера

многоальтернативного управления объектами с

хаотическими процессами разработана модель **системы передачи данных**, в которой увеличение информационной ёмкости передаваемых сообщений достигается не только с помощью модуляции традиционных количественных характеристик периодического сигнала, таких как амплитуда или частота, но формированием многообразия траекторий хаотического движения в системе, т.е. выбором различных критических аттракторов

этого движения в пространстве её состояний. Структура предложенной системы приведена на Рисунке 4.3.

Передающий узел представляет собою генератор хаотического сигнала  $y$ :  $\dot{x} = Bx + F \cdot f(x_1) + Ne(t)$ ;  $y = Ax$ , где  $e(t)$  – модулирующий сигнал, значение которого определяет вид аттрактора;  $f(x_1)$  – нелинейная функция, формирующая хаотические режимы;  $x$  – координаты состояния;  $B, F, N, A$  – параметрические матрицы. В отличие от известных систем по каналу передачи данных передаются производные координат состояния, содержащие в себе управление  $Ne(t)$ .

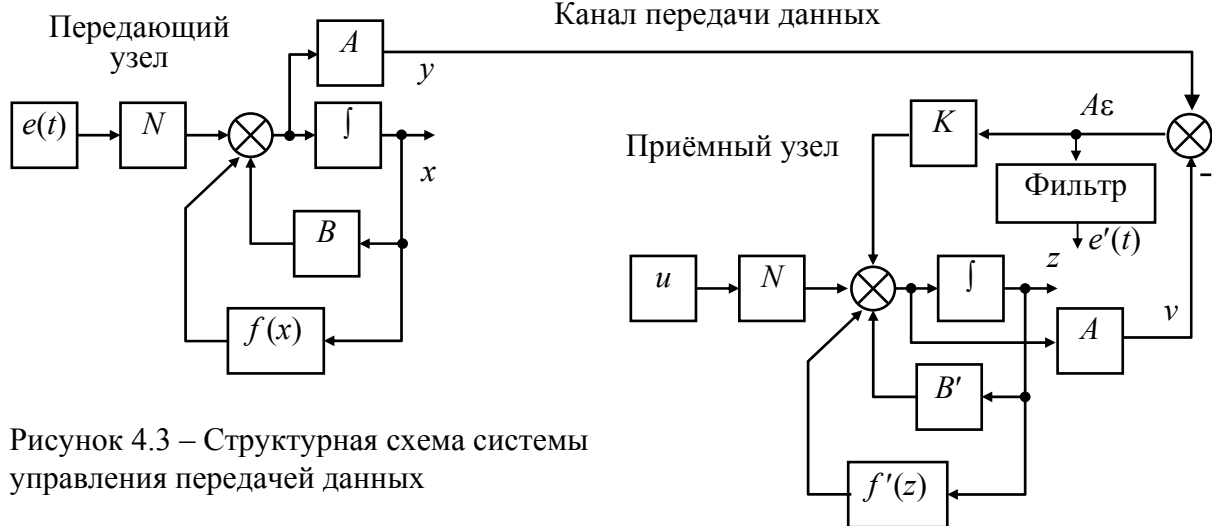


Рисунок 4.3 – Структурная схема системы управления передачей данных

Приёмный узел построен по схеме наблюдателя полного порядка  $\dot{z} = (E + KA)^{-1}[B'z + F \cdot f'(z_1) + Nu + Ky]$ , в котором ошибка  $A\varepsilon(t) = y(t) - v(t)$  содержит в себе информацию о модулирующем сигнале. Сходство аттракторов в приёмном и передающем узлах, подтверждающее синхронизацию хаотических колебаний, т.е. работоспособность предложенного решения, показано на Рисунке 4.4.

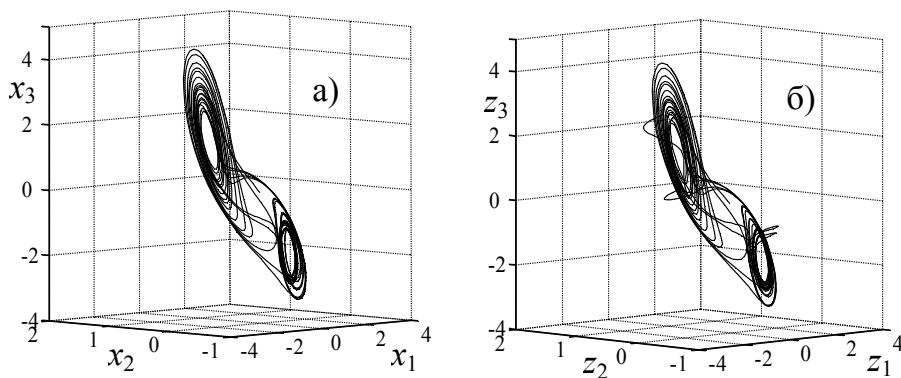


Рисунок 4.4 – Аттракторы передающего (а) и приёмного (б) узлов

В п. 4.3.4 приведён пример системы управления хаотическим (турбулентным) теплообменом в реакторах с внутренним источником энергии. В системе в соответствии с внешним управлением обеспечивается две практически значимые (критические) альтернативы: поддержание конвективного или хаотического характера теплообмена. При этом поддержание хаотического движения обеспечивает, по сравнению с конвективным режимом, увеличение коэффициента теплопередачи на 15% (для рассматриваемого примера реактора). В качестве признака указанных критических режимов предложено использовать дисперсию скорости частиц жидкости.

**В пятой главе «Модели и методы многоальтернативного управления в системах с существенной неопределённостью»** рассматриваются системы, в которых алгоритмы вероятностного и, тем более, детерминированного управления становятся неработоспособными в силу недостаточной информации о свойствах объекта – в частности – о взаимосвязях между координатами состояния объекта. В п. 5.1.1 решается задача нахождения **общего класса многоальтернативных управлений**, обеспечивающих устойчивость систем управления структурно неустойчивыми объектами. В качестве типового представителя таких объектов рассмотрен обратный маятник с линеаризованной моделью  $A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = 0$ , в которой  $q = [x \ \alpha]^T$ ;  $x$  – горизонтальная координата опоры маятника;  $\alpha$  – угол отклонения маятника от вертикали;  $m_1, m_2$  – массы опоры и масса маятника соответственно;  $L$  – длина маятника;  $g$  – ускорение свободного падения.  $A = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 & -m_2L \\ -m_2L & m_2L^2 \end{bmatrix}$ ;  $B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ;  $C = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -m_2Lg \end{bmatrix}$ ;

В модель маятника введена возможность многоальтернативного позиционного управления  $C_{\sigma(t)} = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$  с некоторым неизвестным законом  $\sigma(t)$  переключения  $N$  альтернатив:  $A\ddot{q} + B\dot{q} + C_{\sigma(t)}q = 0$ . Для определения условий многоальтернативной стабилизации полученной системы из неё выделено две изолированные подсистемы:  $A\dot{z} + Bz = 0$  и  $B\dot{v} + C_{\sigma(t)}v = 0$ . Для асимптотической устойчивости этих подсистем требуется положительная определённость квадратичных форм функций Ляпунова  $V_1(z) = z^T Az$ ,  $V_2(v) = v^T Bv$ , и отрицательная определённость их производных  $\dot{V}_1(z) = -2z^T Bz$ ,  $\dot{V}_2(v) = -2v^T C_{\sigma(t)}v$ . Показано, что для выполнения этих условий в систему должны быть введены скоростные компоненты  $b_x \dot{x}$  и  $b_\alpha \dot{\alpha}$ ,

$b_x > 0$  и  $b_\alpha > 0$ , например, в виде  $B = \begin{bmatrix} b_x \dot{x} & 0 \\ 0 & b_\alpha \dot{\alpha} \end{bmatrix}$ , и компоненты позиционного

управления  $c_{x,\sigma(t)}x$ ,  $c_{\alpha,\sigma(t)}\alpha$ :  $C_{\sigma(t)} = \begin{bmatrix} c_{x,\sigma(t)} & 0 \\ 0 & c_{\alpha,\sigma(t)} - m_2Lg \end{bmatrix}$ . Из последнего

вытекает, что позиционные компоненты стабилизирующего управления должны преобладания над потенциальными силами в объекте  $c_{x,\sigma(t)} > 0$  и  $c_{\alpha,\sigma(t)} > m_2Lg$ .

В качестве примеров, новизна которых состоит в реализации полученного класса управлений путём целенаправленного применения принципов многоальтернативности, синтезированы **система управления перемещением перевёрнутого маятника с нестационарными параметрами (п. 5.1.1)** и **система управления противоточным теплообменом (п. 5.1.2)**, в которых стабилизирующее многообразие управлений формируется на основе нечёткой логики и анализа физического содержания этих задач, и не требует составления формальных моделей рассматриваемых сложных объектов. В системе управления маятником обеспечивается его устойчивость при перемещении в условиях 10-кратного изменения массы маятника. При многоальтернативном управлении теплообменом: ошибка регулирования температуры снижается в 6 раз.

**В шестой главе «Модели и методы реализации принципов многоальтернативности при построении синергетических систем управления»** раскрывается методологическая взаимосвязь синергетических и многоальтернативных принципов управления (п. 6.1), и приводятся примеры синтеза синергетических систем

многоальтернативного управления объектами с критическими режимами – структурно неустойчивыми и со слабо демпфированными колебаниями.

В п. 6.2 впервые предложена **система синергетического управления мобильным самобалансирующимся роботом**, кинематическая схема которого представлена на Рисунке 6.1. Платформа представляет собою неустойчивый механизм, верхнее звено 2 которого связано с нижним звеном 1 через заторможенный шарнир, а звено 1 с колесами – через свободно вращающуюся ось. Вращающие моменты  $M_\psi$  электродвигателей действуют на соответствующие колеса и – в обратном направлении – на платформу (звено 1). Угловое отклонение  $\varphi_2$  звена 2 от продольной оси звена 1 может изменяться переносом центра масс звена 2 вперед или назад. На схеме обозначены:  $r$ ,  $\psi$  – радиус и угол поворота колеса;  $m_1$  и  $m_2$  – массы звеньев;  $g$  – ускорение свободного падения;  $L_1$  и  $L_2$  – расстояния центров масс  $m_1$  до оси колес и  $m_2$  до шарнира;  $J_1$  и  $J_2$  – моменты инерции звеньев относительно центров их масс. Перенос центра масс является в этой системе альтернативным способом (каналом) управления верхнего уровня по отношению к основному каналу регулирования вращением колёс. Составлена модель робота:

$$\begin{aligned} (m_{\Pi}L^2 + J_{\Pi}) \cdot \ddot{\gamma} + m_{\Pi}rL \cdot \cos(\gamma) \cdot \ddot{\psi} &= m_{\Pi}gL \cdot \sin(\gamma) - 2 \frac{U - C_e(\dot{\psi} - \dot{\phi}_1)}{R} \cdot C_M; \\ (2m_k \cdot r^2 + 2J_k + m_{\Pi}r^2) \cdot \ddot{\psi} + m_{\Pi}rL(\ddot{\gamma} \cdot \cos(\gamma) - & \\ - \dot{\gamma}^2 \cdot \sin(\gamma)) &= 2 \frac{U - C_e(\dot{\psi} - \dot{\phi}_1)}{R} \cdot C_M - (m_{\Pi} + 2m_k)g \cdot k_{\text{тр}} \cdot \text{sign}(\dot{\psi}), \end{aligned}$$

в которой:  $m_{\Pi} = m_1 + m_2$ ;  $J_{\Pi}$  – момент инерции всей системы относительно центра ее масс;  $U$  – напряжение питания, подаваемое на двигатели;  $R$  – сопротивление якорной обмотки;  $C_e$ ,  $C_M$  – постоянные по противоЭДС и моменту двигателя;  $k_{\text{тр}}$  – коэффициент трения качения колеса;  $m_k$  – масса колеса.

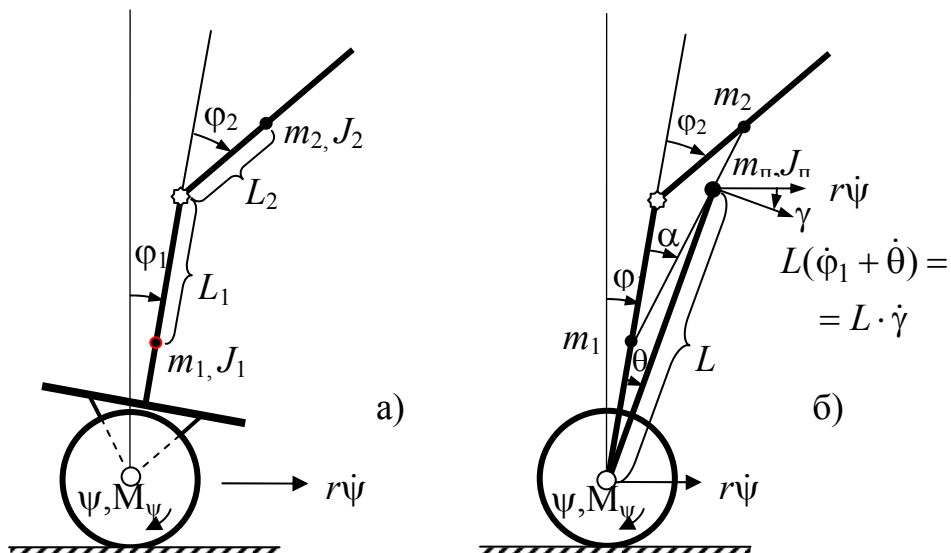


Рисунок 6.1 – Кинематическая схема самобалансирующегося робота

Схема системы управления с нечёткими регуляторами показана на Рисунке 6.2.

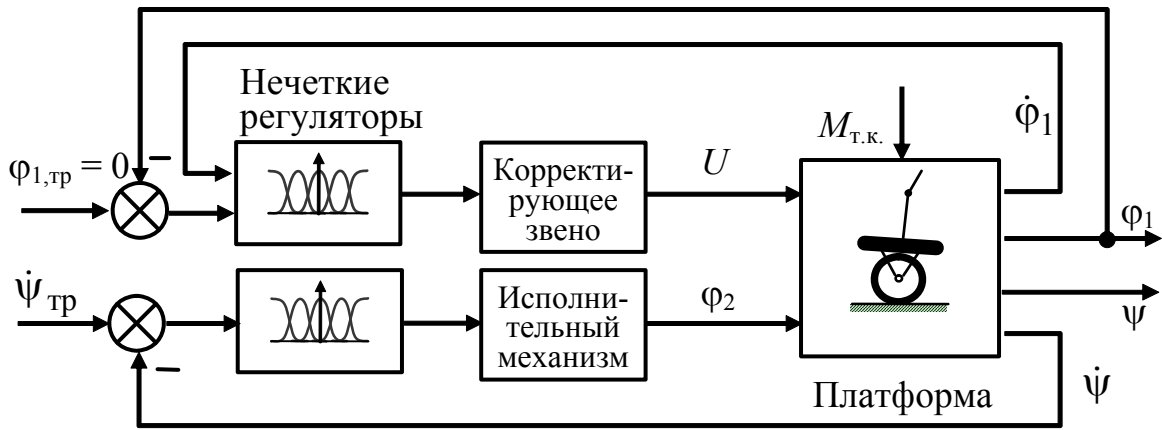


Рисунок 6.2 – Общий состав системы управления роботом

Результаты имитационного моделирования системы в режимах трогания робота с места и последующего равномерного движения подтвердили вертикальную стабилизацию робота в этих режимах за счёт предложенного многоуровневого управления, использующего внутренние взаимосвязи объекта. Этот результат может быть распространён на широкий класс подобных задач.

В п. 6.3 разработана система управления беспилотным летательным аппаратом – БПЛА (Рисунок 6.3), использующая, в отличие от известных, иерархическую декомпозицию переменных математической модели объекта на три группы физически наблюдаемых величин, образующих последовательную динамически или кинематически связанную цепочку процессов в объекте управления, что позволяет понизить размерности полученных подпространств его состояний.

Результат такой декомпозиции показан на Рисунке 6.4, на котором:  $X, Y, Z$  – координаты аппарата в земной системе координат;  $L_r, L$  – требуемая и фактическая траектории полёта;  $V_r, V$  – векторы требуемых и фактических скоростей в координатах  $x, y, z$ ;  $\psi_r, \psi$  – требуемый и фактический курс;  $\Omega_r, \Omega$  – векторы угловых скоростей;  $Q_r$  – вектор вращающих моментов относительно соответствующих осей;  $U_{z,r}$  – сила тяги винтов;  $V_w$  – вектор скоростей ветра;  $\Psi_L, \Psi_V, \Psi_\Omega$  – притягивающие аттракторы, определяющие желаемый характер движения системы в координатах  $L, V$  и  $\Omega$  соответственно. Для всех  $\Psi$  принято

$T \cdot \dot{\Psi}(t) + \Psi(t) = 0$ . Разбиение объекта на три подсистемы даёт возможность провести аналогичное разбиение регулятора также на три части малой размерности, т.е. сделать его агрегированным.

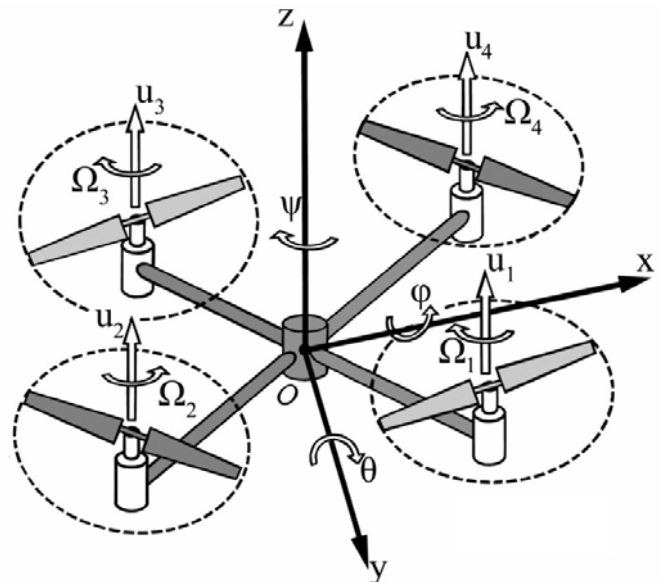


Рисунок 6.3 – Кинематическая схема БПЛА

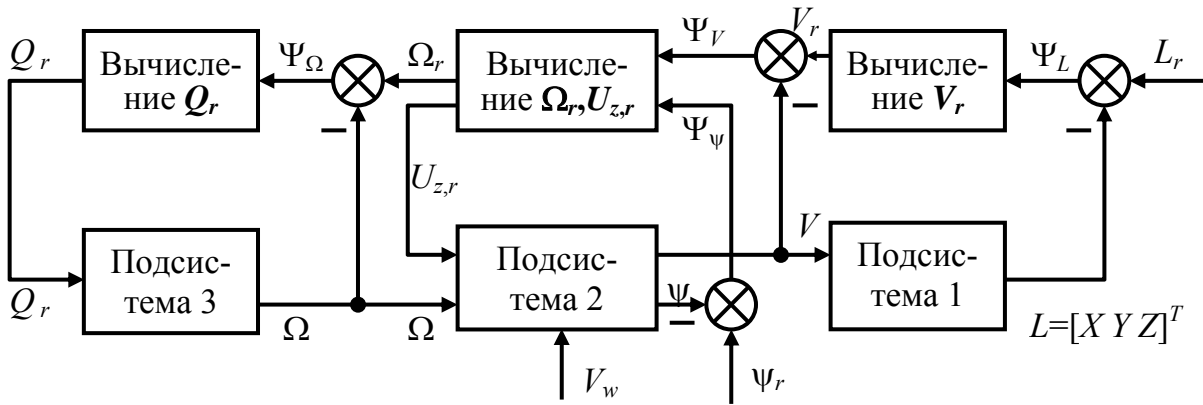


Рисунок 6.4 – Внутренние структуры БПЛА и агрегированного регулятора

Таким образом, синтез регулятора заключается в последовательном построении каждой его части в отдельности с динамическим порядком в 3 раза меньшем общего порядка объекта. Этим обеспечивается существенное упрощение задачи синтеза. Например, для компоненты  $V_{x,r}$  в подсистеме 1 получаем аттрактор:  $T_X \cdot (\dot{X}_r - \dot{X}) + (X_r - X) = 0$ . Далее, используя известные из модели БПЛА зависимости для  $\dot{X}$  и  $X$ , приходим к управлению  $V_{x,r}$  с обозначениями:  $c\theta = \cos(\theta)$ ,

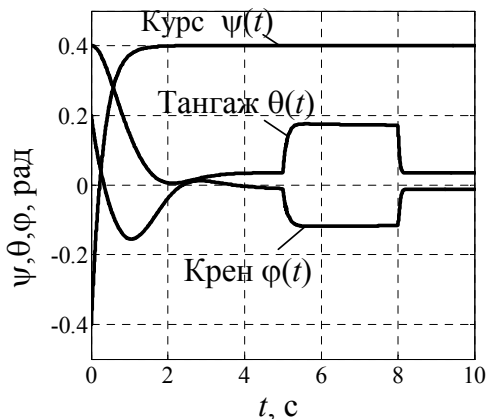


Рисунок 6.5 – Процесс выхода аппарата на заданный режим полёта

$s\theta = \sin(\theta)$ ,  $c\varphi = \cos(\varphi)$ ,  $s\varphi = \sin(\varphi)$ ,  $c\psi = \cos(\psi)$ ,  $s\psi = \sin(\psi)$ ;  $\varphi, \theta, \psi$  – крен, тангаж и курс.

$$V_{x,r}(t) = (-c\psi \cdot T_Y T_Z \cdot c\theta \cdot X + c\psi \cdot T_Y T_X T_Z \times \\ \times c\theta \cdot \dot{X}_r + c\psi \cdot T_Y T_Z \cdot c\theta \cdot \dot{X}_r t + T_Y T_X T_Z \times \\ \times c\theta \cdot \dot{X}_r \cdot \text{tg}(\psi_r) \cdot s\psi + T_X T_Z \cdot c\theta \cdot \dot{X}_r t \times \\ \times \text{tg}(\psi_r) \cdot s\psi - T_X T_Z \cdot c\theta \cdot Y \cdot s\psi + T_Y T_X \cdot Z \cdot s\theta - \\ - T_Y T_X \cdot Z_r \cdot s\theta) \cdot \frac{1}{T_Y T_X T_Z}.$$

Рисунок 6.5 показывает процесс выхода аппарата на заданный режим полёта и парирование системой порыва ветра на интервале  $t = [5;8]$  с., что подтверждает работоспособность и

результативность предложенной модели управления.

В п. 6.4 представлен синтез системы синергетического многоальтернативного управления перемещением слабодемпфированного подвешенного груза. Предложен нечёткий алгоритм многоуровневого управления точкой подвеса груза, который обеспечивает перемещение груза без раскачивания и в максимальной степени использует собственные динамические свойства объекта. На Рисунке 6.6 представлен результат управления, где  $x_1$  и  $x_2$  – линейные координаты точки подвеса и груза;  $\alpha$  – угловое отклонение груза от вертикали;  $u$  – управляющее воздействие на выходе регулятора: груз перемещается без раскачивания.

**В седьмой главе «Модели и методы многоальтернативности в интеллектуальных системах управления и принятия решений»** демонстрируются возможности применения интеллектуальных систем многоальтернативного управления в задачах принятия решений высокой размерности. На основе использования этих

принципов в п. 7.1.1 предложена структура активной нейросети фасетного типа (от фр. la facette – грань), (Рисунок 7.1), обладающая следующими преимуществами перед классическим нейросетями прямого распространения:

1) независимое хранение событий нервной деятельности в виде ансамбля связанных нейронов, дифференцированно возбуждаемых только от определённых сенсорных сигналов. Такая независимость исключает возникновение переобучения;

2) организация нейроансамблей в иерархическую структуру, связывающую их по различным общим признакам (свойствам) сенсорных сигналов;

3) активность нейросети, обеспечивающая перестройку структуры связей между ансамблями после каждого факта обучения (формирование нового устойчивого ансамбля и встраивание его в общую структуру сети).

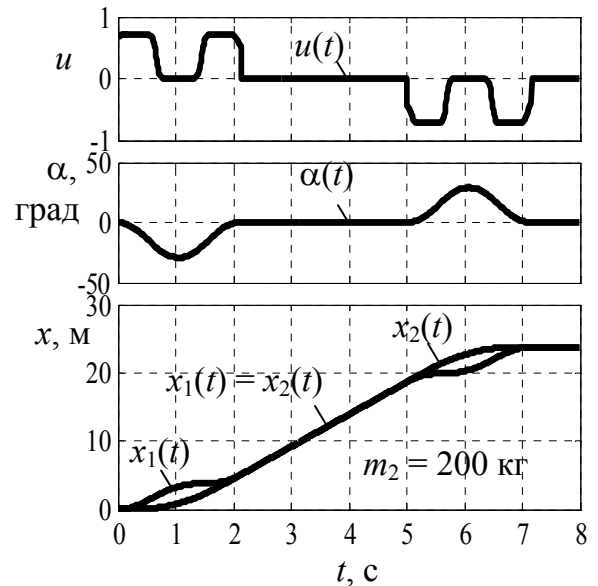


Рисунок 6.6 – Перемещение груза массой 200 кг

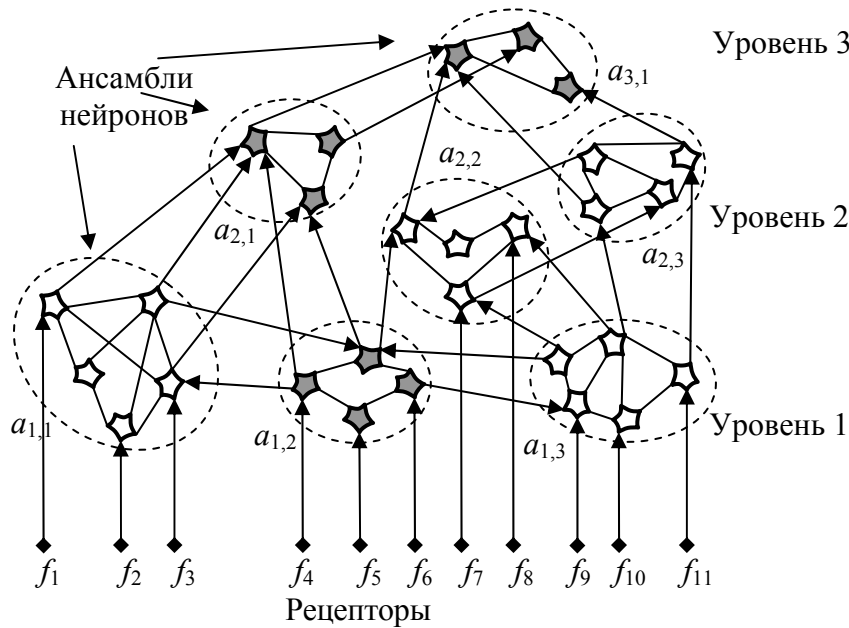


Рисунок 7.1 – Структура нейронной сети фасетного типа

Полученная последовательность возбуждённых ансамблей соответствует образу воздействия, т.е. происходит его распознавание, и принимается соответствующее решение. В п. 7.1.2 на базе предложенной нейросети разработана система управления критическими режимами распределённой энергосистемой, Рисунки 7.2 и 7.3.

Результатом управления является автоматическое подключение необходимых резервных линий (штриховые линии на Рисунке 7.2), достаточных для безошибочного восстановления нарушенного электроснабжения в критическом режиме – аварийной ситуации.



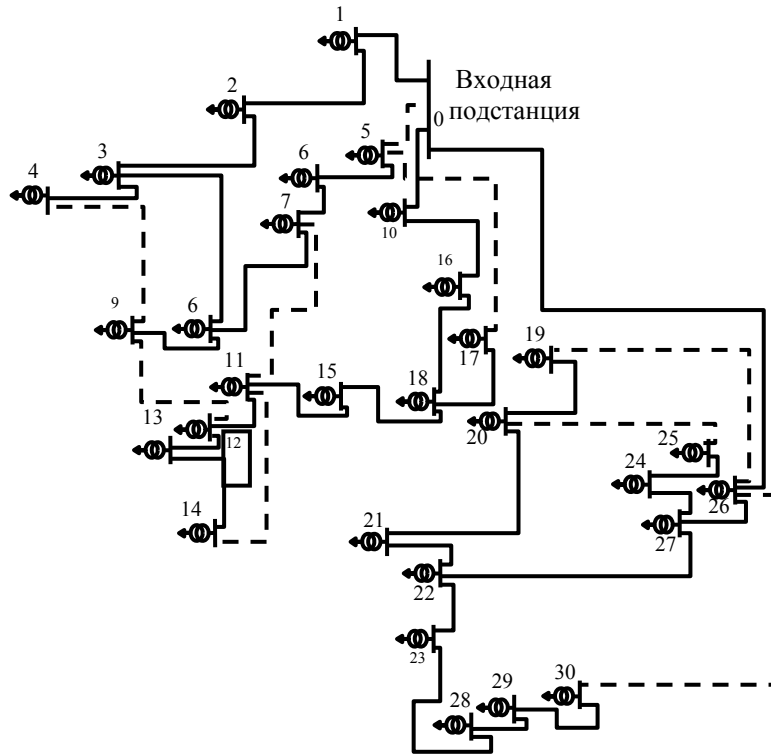


Рисунок 7.2 – Конфигурация электрической сети

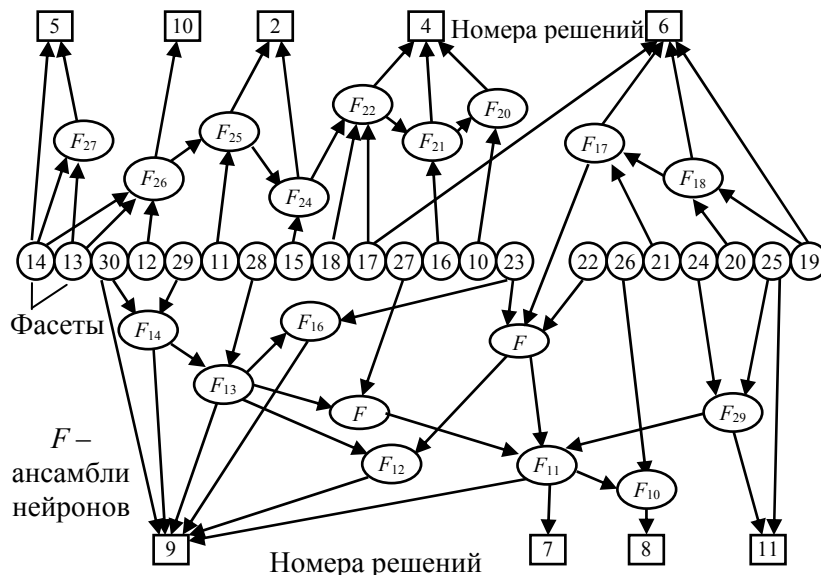
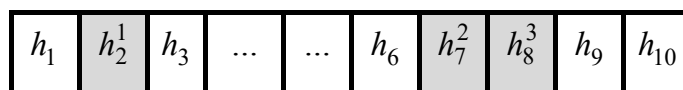


Рисунок 7.3 – Фасетная структура системы принятия решений при аварийных ситуациях в сети

В п. 7.3 разработана генетическая модель решения комбинаторных задач оптимизации, основанная на использовании эволюционного механизма матричной репликации (создание дочерней копии на матрице родительской молекулы), обеспечивающего, по сравнению с генетическими моделями классического типа, увеличение вероятности нахождения глобального экстремума в комбинаторном многообразии вариантов решений в задачах высокой размерности.

Для этого в генетическую модель задачи в виде хромосомы вводится матрица: фиксированные локусы, положение которых не изменяется в процессе эволюции хромосомы, Рисунок 7.4. Содержание этих локусов в процессе поиска решения (эволюции) также не изменяется. В результате укрупнённый алгоритм поиска приобретает вид:



Хромосома

Рисунок 7.4 – Вариант расположения трёхместной матрицы  $[h_2^1, h_7^2, h_8^3]$ 

- 1) Генерируется множество  $R$  матриц репликации.
- 2) Для каждой матрицы формируется начальная популяция.
- 3) Для каждой популяции реализуется имитация эволюционного процесса, например, генетическим алгоритмом.
- 4) Из  $|R|$  результатов, полученных в п. 3, отбираются лучшие.

Использование механизма матричной репликации в методическом плане означает, что для каждого варианта эволюции его индивидуальная матрица будет предопределять (инструктировать) предпочтения при формировании новых особей-решений. В результате эволюция популяций с разными матрицами пойдёт независимыми альтернативными путями без вытесняющей конкуренции между ними. Размерность задачи для каждой такой эволюции снижается на размер матрицы.

Последнее обстоятельство позволяет исходную задачу большой размерности свести к некоторому количеству подзадач меньшей размерности. Такое снижение размерности каждой отдельной подзадачи совместно с регулярным перебором сформированного множества матриц репликации обеспечивает, в итоге, повышение вероятности нахождения глобального экстремума.

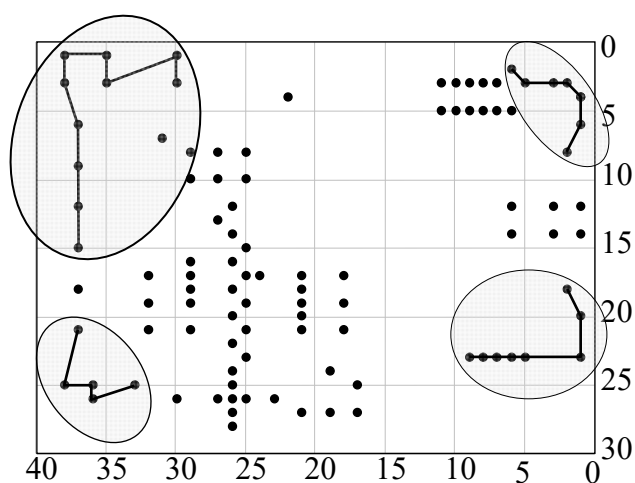


Рисунок 7.5 – Задача построения оптимального маршрута сверления отверстий

$L = 236$  мм, Рисунки 7.6а,б.

Для оценки результативности предложенной модели в п. 7.3.2 решена классическая задача коммивояжёра на практическом примере выбора кратчайшего маршрута сверления печатной платы с большим количеством отверстий – 99, Рисунок 7.5, на котором выделены четыре группы отверстий, составившие матрицу репликации длиной 30 локусов.

Решение этой задачи классическим генетическим алгоритмом позволило определить несколько близких маршрутов длиной  $L = 261 \dots 264$  мм. При использовании матрицы репликации были найдены значительно лучшие варианты решений с длинами маршрутов  $L = 232$  мм и

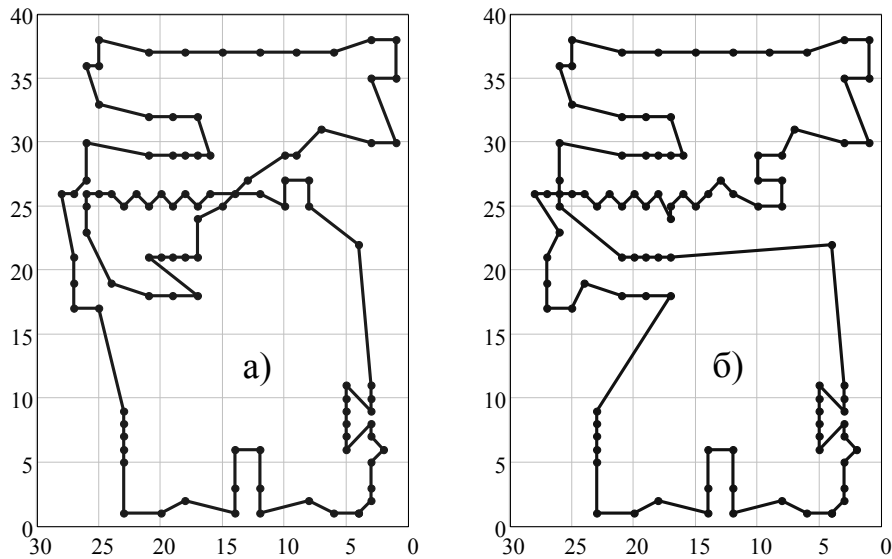


Рисунок 7.6 – Решения, найденные на модели с матричной репликацией

**В восьмой главе «Эволюционная методология многоальтернативного управления»** проведено обобщение изложенных в предыдущих главах результатов работы, и на их основе в законченном виде сформулирована эволюционная методология построения систем многоальтернативного управления сложными объектами, обеспечивающая повышение надёжности и качества функционирования этих объектов в критических режимах.

В п. 8.1 дано теоретическое **основание** эволюционного подхода к решаемой проблеме как аналога эволюционных свойств живых систем, которые обеспечивают последним успешную адаптивную реакцию и развитие в существенно неопределённых условиях внешней среды, включая кризисные, т.е. критические состояния этих систем.

В п. 8.2 сформулированы эволюционные **принципы** методологии построения систем многоальтернативного управления: многоуровневость и иерархия строения, многообразие и разделения функций управления, модульность структуры (см. также содержание глав 1,2 в автореферате).

В п. 8.3 раскрывается логическая структура методологии многоальтернативного управления: её объект, предмет, модели и методы.

**Объектом** методологии многоальтернативного управления в рамках данной работы является процесс построения систем управления сложными объектами с критическим режимами.

**Предмет** этой методологии – модели и методы формирования структуры и алгоритмов функционирования указанных систем.

**Модели** систем многоальтернативного управления различными классами объектов, как было показано в главах 3-7, обладают единой структурой, определяемой перечисленными выше принципами этого управления. На основе этих принципов сформирована **общая структура** систем многоальтернативного управления безотносительно их физической природы, Рисунок 8.1.

К основным элементам представленной на Рисунке 8.1 структуры относятся:

- процедуры принятия решений (решающие правила);
- выбор варианта управления из множества альтернатив;
- контур параметрической настройки вариантов управления;

- формирование вектора управления в соответствии с выбранной альтернативой и текущим значением функции цели;
- процедуры обучения, обеспечивающие синтез новых взаимосвязей по целевому критерию обучения;
- процедуры обеспечения экстремума общей цели управления.

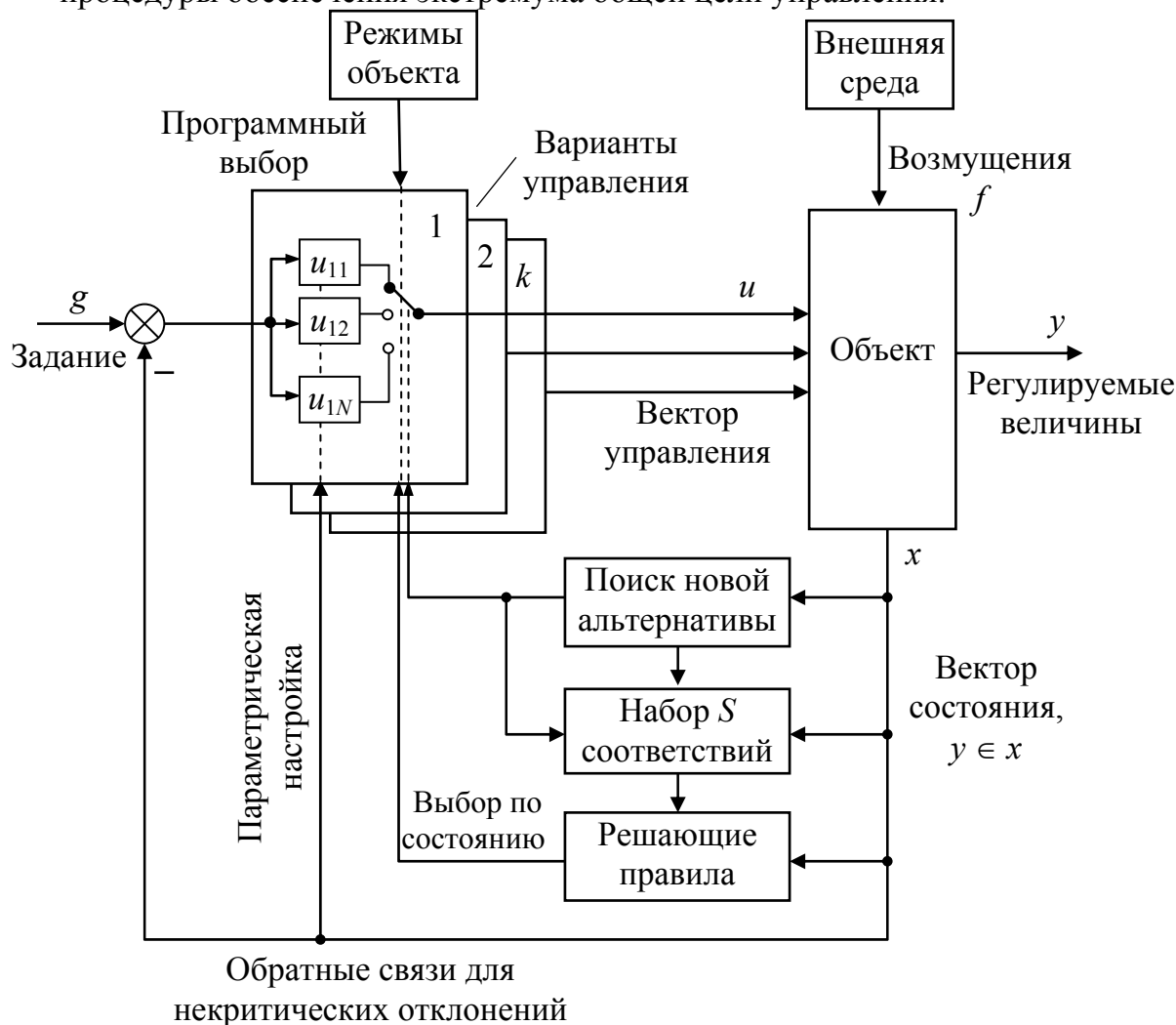


Рисунок 8.1 – Общая структура (модель) системы многоальтернативного управления

Из обобщённой структуры могут быть сформированы частные (в том числе более простые) структуры систем многоальтернативного управления, как это было показано в примерах, приведённых в предыдущих главах.

Единая структура моделей и систем многоальтернативного управления не ограничивает разработчика в выборе **методов** теории управления, реализующих принцип обратной связи по состоянию в каждой конкретной задаче: скользящие режимы, модальное управление, нечёткие алгоритмы, генетические алгоритмы и т.п. (см. содержание глав 3-7 в автореферате).

Вместе с тем, модульность структуры систем многоальтернативного управления, её многоуровневость и многоканальность вносят в применяемые методы управления единый объединяющий признак – разделение общей функции управления между указанными модулями, уровнями или каналами. Такое разделение задачи управления на подзадачи значительно упрощает реализацию управления сложным объектом в целом.

В п. 8.4 дана итоговая оценка результативности применения эволюционной методологии многоальтернативности в задачах управления объектами различной

физической природы: детерминированными, со случайными и хаотическими процессами, с существенной неопределенностью состояния, а также в системах интеллектуальной поддержки принятия решений. Продемонстрировано преимущество результатов, полученных с помощью предложенной методологии, по сравнению с известными решениями (см. содержание глав 3-7 в автореферате). Универсальность её принципов и структуры моделей обеспечивается общностью эволюционных механизмов живых систем.

В п. 8.5 показано, что в методологическом плане эволюционные принципы многоальтернативности продолжают ряд общих принципов построения систем управления сложными объектами: принцип обратной связи; принцип критической сложности; принцип дискретности информации; принцип магистрального развития; принцип необходимого разнообразия, и конструктивно раскрывают кибернетическое содержание процессов функционирования самоорганизующихся живых систем, т.е. указывают на практические способы реализации их свойств в системах, создаваемых человеком.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертация вносит вклад в решение важной научной и практической проблемы построения систем управления сложными объектами с критическими режимами функционирования.

В соответствии с задачами 1–10, поставленными для решения этой проблемы и сформулированными как цели диссертационной работы, были получены результаты, совокупность которых составляет научно обоснованную методологию построения систем управления сложными объектами, обеспечивающую повышение надёжности и качества функционирования этих объектов в критических режимах.

1. Обоснована необходимость и возможность управления сложными объектами в критических режимах на основе проведения биологических аналогий с процессами функционирования живых систем, сформулированными в виде эволюционной концепции многоальтернативности.

Разработаны модели эволюции ряда биологических объектов – от макромолекул до экосистем, с помощью которых показано, что открытые живые системы достигли высокой степени адаптивного взаимодействия с внешней средой на основе механизмов многоальтернативности их строения и функционирования, которые дополняют собою механизмы естественного отбора и составляют общую эволюционную стратегию биологических систем, обеспечивающую их устойчивое существование и развитие. Эта стратегия не испытывает ограничений, связанных с растущей функциональной сложностью живых систем, и её воспроизведение в искусственных системах открывает новые возможности в управлении наиболее ответственными, критическими режимами функционирования сложных объектов высокой размерности.

2. Раскрыто кибернетическое содержание принципов эволюционной концепции многоальтернативности сложных систем любой природы:

– принцип многоуровневости и иерархии строения и функционирования, предусматривающий, в частности, передачу управления от одного уровня к другому по мере исчерпания энергетических возможностей каждого из них и обеспечивающий, тем самым, возникновение в сложных системах свойства гомеостаза;

- принцип многообразия и разделения функций подсистем, позволяющий реализовать декомпозицию системы по функциональному признаку, добиться автономности и упрощения каждой подсистемы, и обеспечить, в итоге, высокую надёжность, а также способность системы в критических ситуациях выполнять свои функции в ограниченном объёме, т.е. обеспечить свойство живучести;

- принцип модульности, порождающий комбинаторное многообразие вариантов построения и возможных режимов работы системы при ограниченном количестве отличающихся типовых модулей. Реализация этого принципа в сложной системе предотвращает, в частности возникновение каскадного нарастания аварийных ситуаций в критических режимах функционирования многомодульной системы.

3. Разработана эволюционная методология построения систем многоальтернативного управления сложными объектами с критическими режимами. Эта методология включает в себя:

- единый теоретический подход к построению систем управления сложными объектами, основанный на направленном воспроизведении в них эволюционных механизмов биологических систем;

- общие конструктивные принципы этого подхода, указывающие на конкретные пути его воплощения в системах многоальтернативного управления: принцип многоуровневости, принцип многообразия и разделения функций, принцип модульности;

- общую структуру систем многоальтернативного управления и прикладные модели и методы реализации указанных принципов в задачах управления сложными объектами с критическими режимами различной физической природы – детерминированными, вероятностными, хаотическими, с существенно неопределёнными состояниями, а также в системах принятия решений.

4. Разработан ряд моделей и алгоритмов многоальтернативного управления детерминированными системами с критическими режимами, в частности:

- модель системы многоальтернативного управления многорежимным процессом тепловлажностной обработки бетона, которая основана на принципе разделения функций подачи пара между исполнительными устройствами в каждом режиме, что позволило на примере конкретного процесса уменьшить среднюю ошибку регулирования в 6 раз и вдвое увеличить общий ресурс исполнительных механизмов;

- модель сложной системы автономного электроснабжения космической станции, живучесть которой достигается применением эволюционных алгоритмов многоальтернативного управления. В результате такого управления достигается, в частности, сокращение общего диапазона активного регулирования в системе до рабочей зоны одной солнечной батареи, и исключаются возможности каскадного нарастания отказов в системе;

- модель системы адаптивной идентификации нелинейных нестационарных объектов, построенной на основе принципов многоальтернативности, которая даёт возможность реализовать покаскадную идентификацию и сформировать многоуровневую структуру процесса адаптации. Реализация многоуровневой структуры создаёт предпосылку для декомпозиции общей задачи многомерной идентификации на подзадачи меньшей размерности, и одновременно снизить ошибку идентификации. В рассмотренном примере размерность задачи идентификации снижена с 7 до 5, и

среднее квадратическое значение ошибки идентификации уменьшено в 3 раза;

– модель системы многоуровневой сигнальной адаптации, использующей иерархически подчинённое соединение одноуровневых каскадов с двумя параллельными каналами: канал с каскадами нестационарного объекта и канал с соответствующими каскадами эталонной модели. В результате, традиционно считающийся узким рабочий диапазон сигнальной адаптации существенно расширяется: в рассмотренном в работе примере – в 5 раз.

5. Предложена обобщённая модель стохастической марковской системы замкнутого цикла с восстановлением ресурсов, в которой альтернативный уровень управления образован путём создания в ней внутренних резервов, накапливаемых в системе в периоды нормального функционирования и расходуемых в критических ситуациях. С помощью этой модели показано, что создание указанного дополнительного управления эквивалентно структурной перестройке системы, которая по своему влиянию на вероятность полного функционирования системы значительно превосходит возможности её параметрических изменений – интенсивности восстановления ресурсов и числа каналов этого восстановления,
6. Представлен пример алгоритма многоальтернативного управления в хаотической системе связи. С помощью соответствующей модели показано, что использование многоальтернативного управления в этих системах позволяет формировать качественно разные – критические траектории хаотического движения в системе, т.е. выбирать различные аттракторы в пространстве её состояний. Это даёт возможность использовать многообразие типов аттракторов в качестве дополнительного алфавита кодирования исходной информации.
7. Рассмотрена задача нахождения общего класса законов стабилизирующего многоальтернативного управления структурно неустойчивым объектом. Доказано, что для стабилизации широкого класса структурно неустойчивых объектов, описываемых моделью перевёрнутого маятника, достаточно введения многоальтернативного управления, содержащего скоростные и позиционные компоненты, отвечающие условиям преобладания позиционных сил управления над потенциальными силами, действующими в объекте. Стабилизация объекта в указанном классе воздействий обеспечивается при произвольном законе переключения альтернативных управлений. На каноническом примере перемещаемого обратного маятника показано, что его стабилизация обеспечивалась при 10-кратном изменении его массы.
8. Приведён пример синтеза системы управления структурно неустойчивым самобалансирующимся роботом. Предложенный способ многоальтернативного управления этим объектом демонстрирует устранение дефицита управляющих воздействий в системе и обеспечение вертикальной стабилизации робота, а также синергетические свойства полученной системы – позволяет осуществить связанное управление координатами робота не за счёт создания искусственных перекрёстных связей в регуляторе, а в результате использования внутренних взаимосвязей между этими координатами в объекте.  
Разработана система синергетического управления структурно неустойчивым беспилотным летательным аппаратом, использующая:

– принцип многообразия и разделения функций, проявляющийся в том, что на основе анализа физического содержания математической модели аппарата последний разбивается на модули (подсистемы) малой размерности, отражающие локальные динамические или кинематические взаимосвязи между группами координат. В рассмотренном в работе примере размерность модулей в 3 раза меньше общей размерности объекта;

– принцип многоуровневости алгоритма управления, который заключается здесь в последовательном аналитическом решении задач управления каждой подсистемой объекта в отдельности, образующих иерархическую структуру взаимосвязей.

9. Разработана фасетная нейросетевая модель многоальтернативного управления распределённой энергосистемой при возникновении в ней критических режимов – отказов. Показано, что проектирование нейромоделей на основе эволюционных принципов многоальтернативности позволяет создавать активные нейронные системы принятия решений с перестраиваемой структурой, по своим свойствам приближающиеся к их биологическим прототипам:

– за счёт введения иерархических внутренних взаимосвязей такие системы обладают высокими обобщающими способностями при принятии решений в ситуациях, не встречавшихся при обучении;

– модульность строения и фасетная организация памяти по правилу «одно событие – один ансамбль» обеспечивают возможность неограниченного избирательного наращивания числа событий в системе без эффекта переобучения и практическую реализацию информационного принципа необходимого разнообразия.

Предложена генетическая модель принятия решений, использующая многоальтернативный механизм матричной репликации. Применение этого механизма в каждом варианте эволюции (подзадаче) предопределяет (инструктирует) предпочтения при формировании новых особей – решений, исключает вытесняющую конкуренцию между вариантами с разными матрицами, снижает размерность каждой подзадачи, и обеспечивает, в итоге, повышение вероятности нахождения глобального экстремума – на тестовом примере – в 5-8 раз.

10. Полученные результаты апробированы в виде публикаций и докладов на конференциях, а также путём их реализации при решении ряда практических задач на производстве.

Результаты работы целесообразно использовать при проектировании сложных систем критического назначения: объектов энергетического комплекса, процессов химического производства, многорежимных автономных космических, воздушных и подводных аппаратов, мехатронных устройств, в системах принятия решений комбинаторного типа, а также для подготовки специалистов по управлению сложными системами.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации связаны с расширением класса объектов, для которых могут быть найдены законы стабилизирующего многоальтернативного управления, а также с применением идей эволюционного подхода в управлении активными развивающимися системами.



**ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ****Публикации в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ**

1. Васильев, Е. М. Модальное управление нестационарными системами / Е. М. Васильев, К. Ю. Гусев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2008. – № 8. – С.46–54.
2. Васильев, Е. М. Разрывное управление в дифференцирующих наблюдателях / Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5, № 11. – С. 48-50.
3. Васильев, Е. М. Эволюционные алгоритмы с матричной репликацией / Е. М. Васильев, И. В. Крутских // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 2. – С. 21–23.
4. Васильев, Е. М. Генетический алгоритм решения квадратичной задачи о назначениях / Е. М. Васильев, И. В. Крутских // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 3. – С. 29–33.
5. Васильев, Е.М. Система оптимального управления подвешенным грузом / Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 1. – С. 25–30.
6. Васильев, Е. М. Синтез модальных регуляторов методом доминирующих корней / Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 1. – С. 46–48.
7. Васильев, Е. М. Алгоритмы управления тепловлажностной обработкой бетонных изделий / Е. М. Васильев, О. Ю. Таратынов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 2. – С. 13–16.
8. Васильев, Е. М. RS-анализ нестационарных динамических систем / Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 4. – С. 71-74.
9. Квасова, Н. В. Магистральное управление траекториями экономического развития региона / Н. В. Квасова, В. Л. Бурковский, Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №6. – С. 97-100.
10. Васильев, Е. М. Хаотические движения в системах низкого порядка / Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 6. – С. 104–108.
11. Васильев, Е. М. Управление критическими режимами хаотических систем / Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 9. – С. 32–39.
12. Васильев, Е. М. Нечёткое управление структурно неустойчивыми объектами / Е. М. Васильев, Д. М. Прокофьева // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 10.1. – С. 8–12.
13. Васильев, Е. М. Робастная стабилизация многомерных объектов в системах с переменной структурой / Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 11. – С. 24–26.
14. Васильев, Е. М. Многоальтернативное управление в хаотических системах связи / Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 11. – С. 155–158.
15. Васильев, Е.М. Исследование критических режимов в системах управления теплообменом / Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 12-1. – С. 69-72.

16. Квасова, Н. В. Многоагентная динамическая модель неравновесного состояния региональной экономики / Н. В. Квасова, В. Л. Бурковский, Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9, №1. – С. 9-11.
17. Подвальный, С. Л. Концепция многоальтернативного управления открытыми системами : истоки, состояние и перспективы / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9, №2. – С. 4–20.
18. Подвальный, С. Л. Многоальтернативное управление открытыми системами : концепция, состояние и перспективы / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Управление большими системами. – 2014. – Вып. 48. – С. 6–58.
19. Подвальный, С. Л. Модели многоальтернативного управления и принятия решений в сложных системах / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – Т. 56, № 2.1. – С. 169–173.
20. Подвальный, С. Л. Эволюционные принципы построения интеллектуальных систем многоальтернативного управления / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – Т. 57, № 3. – С. 4–8.
21. Подвальный, С. Л. Многоальтернативное поведение в критических режимах как модель биологического процесса принятия решений / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного университета, Серия Системный анализ и информационные технологии. – 2015. – № 2. – С. 105–113.
22. Подвальный, С. Л. Эволюционная онтология многоальтернативного управления в критических ситуациях / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – Т. 60, № 2. – С. 32–35.
23. Тищенко, А. К. Многоальтернативное управление критическими режимами системы электроснабжения космической станции / А. К. Тищенко, Е. М. Васильев, А. О. Тищенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11, № 2. – С. 101-106.
24. Васильев, Е. М. Активная нейросетевая модель управления критическими объектами / Е. М. Васильев, Р. А. Говоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т.11, № 3. – С. 31–36.
25. Подвальный, С. Л. Анализ устойчивости систем многоальтернативного управления на основе декомпозиции / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11, № 3. – С. 60–62.
26. Подвальный, С. Л. Принципы многоальтернативного управления критическими объектами авиационно-космического назначения / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, №2(3). – С. 869–874.
27. Подвальный, С. Л. Концепция многоальтернативности в живых и неживых структурах / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Онтология проектирования. – 2016. – Т. 6, № 3(21). – С. 355–367.
28. Подвальный, С. Л. Концепция многоальтернативности в интеллектуальных системах : активные нейросетевые модели / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Нейрокомпьютеры : разработка, применение. – 2016. – №10. – С.49–58.
29. Подвальный, С. Л. Моделирование многоуровневой бортовой системы электроснабжения с фотоэлектрическими преобразователями энергии / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Том 18, №2(3). – С. 952–956.
30. Васильев, Е. М. Гомеостатическое управление динамическими системами на основе нечётких регуляторов / Е. М. Васильев, А. С. Одношвинкин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 11. – С. 732–740.
31. Подвальный, С. Л. Многоальтернативность : эволюционная стратегия биологических систем / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Управление большими системами. – 2019. Вып. 77. – С. 125–170.

32. Подвальный, С. Л. Моделирование и управление системами замкнутого цикла с внутренними резервами / С. Л. Подвальный, Д. В. Логунов, Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17, № 5. – С. 7–14.
33. Подвальный, С. Л. Принцип разделения функций в задачах модального управления / С. Л. Подвальный, В. И. Захватов, Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 1 – С. 7–16.
34. Подвальный, С. Л. Синергетическая система нечёткого управления подвешенным грузом / С. Л. Подвальный, А. А. Калтырина, Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 3. – С. 7–17.
35. Подвальный, С. Л. Матричная репликация в NP-полных задачах комбинаторной оптимизации / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 4. С. 7–14.
36. Подвальный, С. Л. Многоуровневая сигнальная адаптация в нестационарных системах управления / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 5. – С. 38–47.

### Публикации в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science

37. Podvalny, S. L. Models of multi-alternative control and decision-making in complex system / S. L. Podvalny, V. F. Barabanov, E. M. Vasiljev // Automation and Remote Control. – 2014. – Vol. 75, no.10. – P.1886–1891.
38. Podvalny, S. L. Evolutionary principles for construction of intellectual systems of multi-alternative control / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // Automation and Remote Control. – 2015. – Vol. 76, no. 2. – P. 311–317.
39. Podvalny, S. L. A multi-alternative approach to control in open systems : origins, current state, and future prospects / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // Automation and Remote Control. – 2015. – Vol. 76, no. 8. – P. 1471–1499.
40. Podvalny, S. L. Multi-alternative stabilization of structurally unstable objects / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // "Stability and Control Processes" in Memory of V.I. Zubov (SCP), 2015. International Conference. Saint-Petersburg State University : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). – 2015. – P. 120–122.
41. Podvalny, S. L. The application of the multi-alternative approach in active neural network models / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // V International Workshop on Mathematical Models and their Applications, 2016. IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering. 2016, Krasnoyarsk, London : IOP Publishing. – 2017. – P. 103–110.
42. Podvalny, S. L. The principle of multi-alternativity in intelligent systems. Active neural network models / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // XII International Symposium Intelligent Systems 2016, INTELS 2016, 5–7 October 2016, Moscow / Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 103. – P. 410–415.
43. Podvalny, S. L. Cascade identification of nonlinear systems / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // Journal of Physics : Conference Series International Conference “Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics : Current Problems”. – 2018. – Vol. 1203, 012057. – 10 p.
44. Podvalny, S. L. Synergetic control of UAV on the basis of multi-alternative principles / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // IEEE Conferences, Proceedings-2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2018, 8501727. – 6 p.
45. Podvalny, S. L. Multi-alternative control of large systems / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // MATEC Web of Conferences. 13th Int. Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”. – 2018. – Vol. 161, 02023. – 6 p.
46. Podvalny, S. L. Adaptive evolution as a biological analogue of sustainable energy technologies / S.L. Podvalny, E.M. Vasiljev // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 110, 02076. – 9 p.

47. Podvalny, S. L. Analytical synthesis of aggregated regulators for unmanned aerial vehicles / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // *Journal of mathematical sciences.* – 2019. – V. 239, no. 2. – P.135–145.
48. Podvalny, S. L. Homeostatic control systems for spacecraft power supply / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // *IEEE Conferences, Proceedings-2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019.* – 2019. – P. 1–6.
49. Podvalny, S. L. Modeling of human-robot physical interaction for case of mobile self-balanced robot / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // *Conference Proceeding – IEEE International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM-2019.* – 2019, 8742942. – 5 p.
50. Podvalny, S. L. Multi-alternativity information technologies in thermal processes control systems / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // *IEEE Proceedings of 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT).* – 2019, 8687074. – 5 p.
51. Podvalny, S. L. Modelling and analysing the dynamic interaction between competing branches of the regional economy as a multiagent control system / S. L. Podvalny, N. V. Minakova, E. M. Vasiljev // *IEEE 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA-2019).* – 2020. – P. 169–174.
52. Podvalny, S. L. Multialternative approach to the mainstream development management of regional economics / S. L. Podvalny, N. V. Minakova, E. M. Vasiljev // *Proceeding of the International Science and Technology Conference "FarEast on 2019". Smart Innovation, Systems and Technologies.* – Singapore : Springer Verlag, 2020. – Vol. 172. – P. 125–137.
53. Podvalny, S. L. Principles of multialternativity in adaptive nonlinear systems identification / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // In : A. Ronzhin, V. Shishlakov (eds) *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Smart Innovation, Systems and Technologies – Singapore : Springer, 2020.* – Vol. 154. – P. 643–654.
54. Podvalny, S. L. Simulation of the multialternativity attribute in the processes of adaptive evolution / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // In : *Cyber-Physical Systems : Advances in Design & Modelling. Studies in Systems, Decision and Control*; eds A. Kravets, A. Bolshakov, M. Shcherbakov. – Cham : Springer, 2020. – Vol. 259. – P.167–178.
55. Podvalny, S. L. Synergetic control of the mobile self-balanced robot / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // *IEEEConference Proceedings : 2019 XXI International Conference Complex Systems : Control and Modeling Problems (CSCMP), Samara, Russia, Sept. – 2019. – IEEE Xplore Proceedings, 2020.* – P.316–321.
56. Podvalny, S. L. The cybernetic concept of multialternativity in the evolution of biological systems / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // *J. of Physics : Conference Series. Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics : Current Problems.* – 2020. – Vol. 1479, 012109. – P. 1–13.
57. Tishchenko, A. K. Analysis and synthesis of control systems for spacecraft solar arrays / A.K. Tishchenko, E.M. Vasiljev, A.O. Tishchenko // *Machines.* – 2020. – V. 8, no.4. – P.1-24.
58. Podvalny, S. L. Application of faceted neural networks to solving the pattern recognition problem / S. L. Podvalny, V. M. Mugatina, E. M. Vasiljev // In : A. G. Kravets, A. A. Bolshakov, M. V. Shcherbakov (eds) *Cyber-Physical Systems. Studies in Systems, Decision and Control.* – Cham : Springer. – 2021. – Vol. 350. – P. 237–247.
59. Podvalny, S. L. Modeling of systems with a closed loop of material resources circulation / S. L. Podvalny, D. V. Logunov, E. M. Vasiljev // *Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021). Journal of Physics : Conference Series. Parallel algorithms and programs for solving time-consuming problems of modeling and forecasting complex systems and processes.* – 2021. – Vol. 2131, 032115. – 7 p.
60. Podvalny, S. L. Dynamic damping of vibrations in objects with undefined parameters / S. L. Podvalny, V. I. Zakhvatov, E. M. Vasiljev // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2022). Sochi, Russian Federation – Publisher: IEEE, 2022.* – P. 520-525.

61. Podvalny, S. L. Robust sway prevention of suspended loads / S. L. Podvalny, A. A. Kaltyrina, E. M. Vasiljev // IEEE Conferences, Proceedings 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2022). Sochi, Russian Federation. Publisher: IEEE, 2022. – P. 69-74.

62. Podvalny, S. L. Matrix replication in combinatorial problems / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // 4rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA 2022), 09-11 Nov. 2022. – Lipetsk, Russian Federation: Publisher IEEE 2022. – P.556–560.

### Монография

63. Подвальный, С. Л. Системы многоальтернативного управления : Эволюционный подход : монография / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев. – Старый Оскол : Изд-во ТНТ, 2023. – 376 с.

### Патенты и зарегистрированные программы для ЭВМ

64. Патент № 2185988 Российская Федерация, МПК 7B62D5/04. Электропривод системы рулевого управления : № 2000127151/28 : заявл. 30.10.2000 : опубл. 27.07.2002 / Попов В. Н., Лившин Г. Д., Семенов Л. В., Ищенко В. И., Вишневский Ю. И., Кроз А. Г., Таратынов О. Ю., Васильев Е. М., Слепокуров Ю. С., Копытин В. В. ; заявитель Федеральный научно-производственный центр Закрытое акционерное общество «Научно-производственный концерн (объединение) «Энергия». – 6 с.

65. Патент № 2185989 Российская Федерация, МПК 7B62D5/04. Сервопривод системы рулевого управления : № 2000127193/28 : заявл. 30.10.2000 : опубл. 27.07.2002 / Попов В. Н., Лившин Г. Д., Семенов Л. В., Ищенко В. И., Дмитриев В. П., Кроз А. Г., Таратынов О. Ю., Васильев Е. М., Слепокуров Ю. С., Копытин В. В. ; заявитель Федеральный научно-производственный центр Закрытое акционерное общество «Научно-производственный концерн (объединение) «Энергия». – 8 с.

66. Васильев, Е. М. Решение квадратичной задачи о назначениях генетическим алгоритмом: программный комплекс / Е. М. Васильев, И. В. Крутских // Информационная карта алгоритмов и программ. – Номер государственной регистрации 50201000923. – М. : ЦИТИС, 01.06.2010. – 15 с.

67. Васильев, Е. М. Генетический алгоритм с матричной репликацией: программный модуль / Е. М. Васильев, И. В. Крутских // Информационная карта алгоритмов и программ. – Номер государственной регистрации 50201001681. – М. : ЦИТИС, 08.12.2010. – 15 с.

### Другие научные публикации (выборочно)

68. Васильев, Е. М. Синтез адаптивных промышленных регуляторов / Е. М. Васильев, О. Ю. Таратынов // Электротехнические комплексы и системы управления.– 2008.– №3.– С. 54–58.

69. Васильев, Е. М. Синтез адаптивных наблюдателей с разделением движений / Е. М. Васильев, К. Ю. Гусев // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2009. – №2. – С. 55–58.

70. Васильев, Е. М. Частотный синтез следящих систем с переменной структурой / Е. М. Васильев, А. С. Гончаров, С. М. Миронов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – №4. – С. 52–55.

71. Подвальный, С. Л. Интеллектуальные системы многоальтернативного управления : принципы построения и пути реализации / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // тр. XII Всерос. совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. – М. : ИПУ РАН, 2014. – С. 996–1007.

72. Подвальный, С. Л. Многоальтернативное управление в критических ситуациях / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Современные проблемы горно-металлургического

комплекса. Наука и производство : материалы XI Всеросс. науч.-практ. конф. с межд. участием. – Старый Оскол : СТИ НИТУ МИСиС, 2014. – Т. 2. – С. 289–294.

73. Подвальный, С. Л. Биологические аналогии многоальтернативности в системах обеспечения кибербезопасности / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Информация и безопасность. – 2015. – Т. 18, № 4. – С. 588–591.

74. Подвальный, С. Л. Снижение техногенного риска опасных объектов на основе использования эволюционных принципов многоальтернативности / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Комплексные проблемы техносферной безопасности : материалы Международ. науч.-практ. конф. Ч. 2. – Воронеж : ВГТУ, 2015. – С.33–38.

75. Подвальный, С. Л. Гомеостатическое управление объектами критического назначения / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Комплексные проблемы техносферной безопасности : материалы III Международ. науч.-практ. конф. Ч. I. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2016. – С. 22–27.

76. Подвальный, С. Л. Биологическое разнообразие и модели эволюции / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2016. – № 3. – С. 123–127.

77. Подвальный, С. Л. Аналитический синтез агрегированных регуляторов для беспилотных летательных аппаратов / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Проблемы математического анализа. – 2019. – Вып. 96 – С. 23–32.

78. Подвальный, С. Л. Иерархическая идентификация параметров нелинейных динамических систем / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // тр. XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. – М. : ИПУ РАН, 2019. – С. 517–521.

79. Подвальный, С. Л. Система нечеткого управления гироскопической подвижной платформой / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // тр. XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. – М. : ИПУ РАН, 2019. – С. 806–811.

80. Podvalny, S. L. Multi-alternative power supply control / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // Control Engineering. – 2017.– Vol.64, no. 11. – 10 p.

81. Podvalny, S. L. Intensification of heat transfer in chaotic modes / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, The II "International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy" (TPCASE 2020). Voronezh, Russia. – 2021. – Vol. 1035, 012046. – 7 p.

82. Podvalny, S. L. Digital twin for smart electricity distribution networks / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, The II "International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy" (TPCASE 2020), 16th-18th September 2020, Voronezh, Russia. – 2021. – Vol. 1035, 012047. – 6 p.

83. Podvalny, S. L. Principles of multiple alternatives in complex control systems with a reference model / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // In : Information Systems and Design; eds V. Taratukhin, A. Levchenko, Y. Kupriyanov. Communications in Computer and Information Science. International Conference for Information Systems and Design. (ICID 2022), Tashkent. – Cham: Springer, 2023. – Vol. 1767. – Pp. 27–39.



Подписано в печать                    2023  
Формат 60x84/16. Формат для множительных аппаратов.  
Усл. печ. л. 2.0. Тираж 135 экз. Заказ №  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84