

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

На правах рукописи



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

Диссертация

на соискание учёной степени
доктора технических наук

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

Воронеж – 2023

Введение.....	5
Глава 1. Истоки и история становления эволюционного подхода	
к управлению сложными объектами в критических режимах	18
1.1 Состояние проблемы	18
1.2 Биологические аналогии задач управления сложными объектами в критических режимах	22
1.3 Принципы эволюционной концепции многоальтернативности	25
1.4 Примеры применения принципов многоальтернативности	25
1.5 Гносеологическое содержание эволюционного подхода к задачам управления	35
Выводы по главе 1.....	36
Глава 2. Модели эволюционных процессов биологических систем с учётом роли механизмов многоальтернативности в кризисных – критических – периодах эволюции	39
2.1 Модели и механизмы многоальтернативности в добиологической эволюции.....	39
2.2 Модели и механизмы многоальтернативности в эволюции биологических популяций.....	47
2.3 Модели и механизмы многоальтернативности в эволюции экосистем	56
Выводы по главе 2.....	70
Глава 3. Модели и методы многоальтернативного управления в детерминированных системах с критическими режимами	72
3.1 Многоканальные системы с переменной структурой	72
3.2 Системы модального управления нестационарными объектами	78
3.2.1 Адаптивные наблюдатели с разделением движения.....	78
3.2.2 Робастные системы модального управления	85
3.3 Автономные гомеостатические системы.....	101

3.4 Системы адаптивной идентификации нелинейных объектов	113
3.5 Системы с сигнальной адаптацией	123
3.6 Многоагентные системы со стратегией магистрального движения.....	137
Выводы по главе 3.....	151
Глава 4. Модели и методы многоальтернативного управления	
в стохастических и хаотических системах с критическими режимами	155
4.1 Гомеостатические системы со случайным управлением.....	155
4.2 Стохастические системы замкнутого цикла	162
4.3 Системы с хаотическими режимами.....	171
4.3.1 Идентификация критических режимов в хаотических системах	171
4.3.2 Управление критическими режимами химического реактора.....	184
4.3.3 Хаотические системы связи	187
4.3.4 Хаотические системы теплообмена	195
Выводы по главе 4.....	204
Глава 5. Модели и методы многоальтернативного управления	
в системах с существенной неопределённостью	207
5.1 Модели нечёткого управления	207
5.1.1 Управление структурно неустойчивыми объектами.....	207
5.1.2 Гомеостатическое управление процессами теплообмена.....	221
5.2 Игровая модель «сложная система – внешняя среда»	234
Выводы по главе 5.....	238
Глава 6. Модели и методы реализации принципов многоальтернативности	
при построении синергетических систем управления	241
6.1 Синергетические свойства принципов многоальтернативности	242
6.2 Синергетическое управление мобильным самобалансирующимся роботом	244
6.3 Агрегированное управление беспилотным летательным аппаратом	257
6.4 Синергетическое управление перемещением подвешенного груза	274
Выводы по главе 6.....	287

Глава 7. Модели и методы многоальтернативности в интеллектуальных системах управления и принятия решений	290
7.1 Активные нейросетевые модели	290
7.1.1 Модель фасетной организации памяти.....	292
7.1.2 Модель управления распределённой энергосистемой.....	295
7.1.3 Модель распознавания образов	301
7.2 Многоальтернативная модель оптимальной стратегии последовательного выбора.....	306
7.3 Эволюционные модели с матричной репликацией	312
7.3.1 Квадратичная задача о назначениях	320
7.3.2 Задача коммивояжёра	321
Выводы по главе 7.....	324
Глава 8. Эволюционная методология многоальтернативного управления.....	327
8.1 Теоретическое основание эволюционного подхода к управлению	327
8.2 Характеристики (принципы) методологии многоальтернативного управления	328
8.3 Логическая структура методологии многоальтернативного управления: объект, предмет, модели и методы.....	329
8.4 Оценка результативности эволюционной методологии многоальтернативного управления	334
8.5 Методология многоальтернативного управления и кибернетические принципы.....	338
Выводы по главе 8.....	341
Заключение	343
Список литературы	353
Приложение	400
Акты об использовании результатов диссертационной работы	400

ВВЕДЕНИЕ

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 распространенным 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.) [132,117,118,176]. 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.) [32,156]. 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.) [174,295, 325].

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.) [146,98,287,285,131];

– системы подчинённого регулирования (Kessler С., Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г.) [22,374];

– идеи гомеостатического управления (Горский Ю.М., Новиков Д.А., Новосельцев В.Н., Филимонов Н.Б., Forrest J.) [80,173,175,294,356];

– диверсные (от англ. diversity – разнообразие) системы защиты (International Atomic Energy Agency, 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.) [344,35,36,193,8,104];

– системы синергетического управления (Колесников А.А., Веселов Г.Е., Кузьменко А.А., Попов А.Н., Хакен Г.) [116,117,118,71, 298,299];

– 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. and etc.) [303,346,345,359,432,439,380].

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 в работах [194,195,196,197] 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 гомеостаза;

– 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 [184,185], и зарегистрированы две программы для ЭВМ в Федеральном государственном центре информационных технологий и систем – ЦИТИС [49,50].

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.

Личный вклад соискателя. В работах, опубликованных в соавторстве по теме диссертации, лично автором получены и выносятся на защиту: теоретическое обоснование эволюционных принципов многоальтернативного управления [202,204,207,208,217,218,222,223,228,229,235,236,243,402,403,404,413, 422,424]; кибернетическое содержание этих принципов [229,236,243]; общая функциональная схема систем многоальтернативного управления [204,206,209,243]; прикладные модели, методы и алгоритмы реализации принципов многоальтернативности:

– в детерминированных системах с критическими режимами [45,46,47,48,54,55,63,112,113,184,185,202,203,210,212,215,216,220,221,225,231,239, 242,243,280,406,409,415,419,420,421,428,449];

– в стохастических системах [41,44,60,62,204,205,209,211,238,243,427];

– в системах с хаотическими режимами [56,57,58,61,204,243,417,418];

– в системах с нечётким управлением [59,65,213,214,243,405,412];

– в синергетических системах управления [53,111,226,227, 230,233,234,240,243,410,411,414,416,423,429];

– в системах принятия решений [41,49,50,51,52,64,209,219,232, 237,241,243,407,408,425,426,430].

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. 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.

ГЛАВА 1. ИСТОКИ И ИСТОРИЯ СТАНОВЛЕНИЯ ЭВОЛЮЦИОННОГО ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ В КРИТИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

Антропогенные (создаваемые человеком) системы и устройства в большей либо меньшей степени копируют живую природу, стремясь найти некоторые фундаментальные принципы, которые могли бы сделать эти системы и устройства более совершенными, устойчивыми к внешним воздействиям (в том числе катастрофического характера), легко адаптирующимися к изменениям окружающей среды либо внутренним изменениям объекта.

Такое обращение к биологическим прототипам носит осознанный характер, и опирается на основную идею кибернетики, сформулированную Н. Винером в виде тезиса о подобии процессов управления и связи в машинах, живых организмах и обществах [72]. Использование этой идеи открывает возможность перехода на качественно новый уровень решения наиболее крупных проблем, возникающих в управлении сложными системами.

1.1 Состояние проблемы

В настоящее время достаточно общей и важной практической проблемой моделирования и управления сложными системами является проблема их высокой размерности, приводящей к динамической неопределённости их моделей и снижению показателей качества регулирования [117,132,295]. Чем сложнее открытая искусственная система, тем труднее обеспечить её надёжную работоспособность в условиях активного взаимодействия с внешней средой, особенно в граничных, критических режимах функционирования, Таблица 1.1. Такие системы как объекты управления характеризуются рядом достаточно очевидных свойств:

– высокая и чаще всего неизвестная размерность пространства внутренних состояний, включая неопределённое количество иерархических уровней, подсистем и связей между ними;

- нестационарность структуры и параметров;
- структурная неустойчивость;
- нелинейность процессов;
- разнообразный вид и диапазоны изменения внешних воздействий.

Таблица 1.1 – Критические режимы открытых антропогенных 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

Изменчивость и разнообразие режимов и условий работы открытых систем приводят к структурным, параметрическим и сигнальным неопределённостям их формального описания. В связи с этим теория автоматического управления такими системами развивалась по пути создания адаптивных и робастных методов, обеспечивающих низкую чувствительность, или грубость замкнутых систем к указанным изменениям [46,74,134,138,156,163,164,165,245,246,296,304,456].

В наиболее общем виде для объекта [156]

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)[w(x,t)^T \theta + u] + \delta(t), \\ y &= h(x); \end{aligned} \quad (1.1)$$

где x , u , y – векторы состояния, управления и регулируемого выхода; $f(x)$ – характеристическая матрица; $g(x)$, $h(x)$ – матрицы управления и выхода; θ – вектор неизвестных факторов объекта; $w(x, t)$ – некоторая известная матричная функция; $\delta(t)$ – неизмеряемые внешние воздействия, простейший алгоритм параметрической ($\theta = \text{const}$) адаптивной стабилизации по состоянию при отсутствии внешних воздействий ($\delta(t) = 0$) может быть записан в виде:

$$\begin{aligned} u &= u_0(x) - w(x, t)^T \hat{\theta}, \\ \dot{\hat{\theta}} &= \gamma w(x, t) \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x); \end{aligned} \quad (1.2)$$

в котором $V(x)$ – выбранная определённым образом функция Ляпунова; γ – постоянный коэффициент; $u_0(x)$ – обратная связь по состоянию. Подстановка управления u из (1.2) в (1.1) обеспечивает прямую компенсацию влияния вектора неопределённостей θ на систему.

Этот алгоритм обеспечивает нулевую установившуюся ошибку, но при наличии возмущений ($\delta(t) \neq 0$) интегральный закон адаптации (1.2) приводит к неограниченному параметрическому дрейфу управления u , и тогда переходят к адаптивной робастной стабилизации (σ -модификации алгоритма (1.2)) [296,366,367]:

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma w(x, t) \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x) - \sigma \hat{\theta}, \quad (1.3)$$

($\sigma = \text{const}$) обеспечивающей работоспособность системы при наличии внешних воздействий ($\delta(t) \neq 0$) и параметрической нестационарности ($\theta = \theta(t)$), однако с ненулевой установившейся ошибкой.

В тех случаях, когда имеет место функциональная неопределённость (вектор $\theta = \theta(x, u, t)$ является неизвестной функцией x и u) и присутствуют внешние воздействия ($\delta(t) \neq 0$), задача адаптации решается статической обратной связью [164,372]:

$$\hat{\theta} = \gamma w(x, t) \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x), \quad (1.4)$$

или [74]:

$$\hat{\theta} = \gamma |w(x, t)|^2 \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x), \quad (1.5)$$

при этом ненулевая установившаяся ошибка по-прежнему не устраняется.

Поскольку ни один из алгоритмов (1.2) – (1.5) в полной мере не отвечает реальным задачам управления, то для обеспечения нулевой установившейся ошибки при наличии неконтролируемых внешних возмущений ($\delta(t) \neq 0$) и функциональной неопределённости ($\theta = \theta(x, u, t)$) используются так называемые робастно-адаптивные алгоритмы с переключающей функцией $\sigma(\hat{\theta}_2)$ [156,456]:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_1 &= \gamma_1 w(x, t) \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x), \\ \dot{\hat{\theta}}_2 &= \gamma_2 w(x, t) \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x) - \sigma(\hat{\theta}_2) \cdot \hat{\theta}_2, \\ \hat{\theta} &= \hat{\theta}_1 + \hat{\theta}_2; \end{aligned} \quad (1.6)$$

представляющие собою модифицированную комбинацию алгоритмов (1.2) – (1.4).

Если рассмотреть группу методов адаптации не по координатам состояния x объекта, а по вектору выхода y , то хронологически можно аналогично проследить:

– последовательное их усложнение от задач простейшей параметрической стабилизации (1.2) к алгоритмам робастно-адаптивного типа (1.6);

– преодоление проблемы высокой относительной степени $p > 1$ (p – разность порядка знаменателя n и порядка числителя m передаточной функции объекта: $p = n - m$);

– привлечение процедур параметризации модели объекта [156,164,382] (представление модели объекта в виде слагаемых, линейных по настраиваемым параметрам регулятора, даёт возможность вычисления градиента функционала качества по этим параметрам и воспользоваться, например, настройкой по скоростному градиенту).

В результате были созданы методы адаптации высокого порядка, а также более совершенные итеративные методы обхода интегратора.

Динамический порядок регуляторов, реализующих эти методы, в несколько раз превышает исходный порядок объекта [156]. За исключением простейших случаев [45], указанные алгоритмы требуют значительных вычислительных

ресурсов, и неприемлемы для промышленной реализации [156]. В работах [32,95,295] констатируется, что в теории адаптивных систем «в практику внедряется лишь ничтожная доля теоретических достижений», и указывается на «плохую реализацию на практике имеющихся схем адаптивного управления» из-за их громоздкости и сложности. Принципиально нерешённой остаётся проблема структурной неопределённости объектов, чаще называемая немоделируемой, или паразитной динамикой. Об информационных и энергетических ограничениях, возникающих при реализации этих алгоритмов на практике, отмечается также в [273].

1.2 Биологические аналогии задач управления сложными объектами в критических режимах

В противоположность перечисленным выше затруднениям, созданные природой живые системы не испытывают никаких трудностей с ростом сложности своей структуры и числа внутренних взаимосвязей [117,159]. Более того, именно многообразие строения и способов функционирования обеспечивает биосистемам устойчивое существование и развитие в изменяющихся условиях внешней среды [422]. Широко известной предпосылкой существования и эволюции биологических систем в условиях влияния внешней среды является достаточное и даже избыточное разнообразие её таксонов, благодаря которому в ситуациях, когда изменение среды обитания становится неблагоприятным для существования какого-либо элемента системы, его место занимают одна или несколько других биологических групп, способных восстановить нарушившееся равновесие в системе, например – непрерывность пищевой цепочки [6,77,82,316].

Известен также приспособительный механизм специализации и разделения функций, обеспечивающий устойчивое существование даже отдельно взятого биологического вида в разнообразных экологических нишах. В качестве наиболее очевидных примеров такого механизма можно привести появление у приматов двух типов светочувствительных клеток: высокочувствительных палочек,

обеспечивающих сумеречное нецветовое зрение, и менее чувствительных, но приспособленных к различению цветов – колбочек [369]. Подобное разделение функций было обнаружено у рыб, для которых характерны миграции море–река–море, в ходе которых они сталкиваются с существенным изменением солёности воды и необходимостью перестройки способа поддержания своего водно-солевого баланса. В зависимости от солёности окружающей среды в жаберном эпителии рыб активизируются ионофильтрующие клетки морского или пресноводного типа [267,268]. Аналогичным примером приспособительного многообразия служит разделения функций между парами крыльев жукообразных: передние жёсткие надкрылья придают телу жука прочность и компактность, целесообразные для передвижения в воде, почве или древесине, а мягкие задние крылья – способность к полёту [82].

Говоря о роли многообразия и разделения функций в механизмах эволюции, следует отметить, что этот механизм проявляется уже на молекулярном уровне простейших систем в виде блочного принципа формирования новых структур из уже «опробованных», т.е. жизнеспособных биологических блоков, имеющих специализированные функции [129,254,256].

Взаимосвязанную специализацию и блочность биологических структур Л. Берталанфи относит к характерным внутренним свойствам открытых систем [28]: «Самодифференцирующиеся системы, развивающиеся в направлении все более высокой сложности (путем уменьшения энтропии), возможны – по термодинамическим соображениям – только как открытые системы. Дифференциация внутри развивающегося эмбриона или организма происходит согласно внутренним законам их организации. ... Закрытые системы развиваются в направлении гомогенности».

Обсуждая механизмы построения сложных открытых систем, Э.М. Галимов [77] отмечает, что «наиболее экономный способ производства низкоэнтропийного продукта состоит в комбинировании уже имеющихся низкоэнтропийных структур, эволюция в нашем понимании должна происходить не только и даже не столько путем малых изменений, сколько скачками, обусловленными новыми

сочетаниями старых структур», и, возражая сторонникам креационизма, противопоставляет постулату изначально «неупрощаемой сложности» [333] биосистем понятие «неусложняемой простоты», подчёркивая, тем самым, комбинаторную природу эволюции.

Принцип блочно-модульной эволюции молекулярных систем был распространён непосредственно на системы управления биологическими организмами [258]. В частности, в работе [284] рассматривается теория эволюционного усложнения биологических систем управления на основе последовательных метасистемных переходов: существующие подсистемы объединяются общим механизмом управления, в результате чего формируется система качественно нового иерархического уровня, которая, в свою очередь, является подсистемой более высокого уровня управления.

Широко известным примером иерархической организации приспособительных механизмов в биологических системах является процесс гомеостаза [323], который осуществляется в общем плане за счёт системы управления с двумя и более иерархическими уровнями, одни из которых непрерывно поддерживают заданное состояние организма при небольших изменениях в окружающей среде, а другие реагируют только на критические отклонения этого состояния и запускают, при появлении таких отклонений, механизмы существенной перестройки организма, которые носят качественно новый характер, в частности, могут быть прерывистыми, ступенчатыми, порождающими альтернативные структуры управления (в [323] приводится пять (!) независимых механизмов стабилизации содержания глюкозы в крови человека).

Такая иерархия управления в результате накопления, наращивания фонда приспособлений образует многослойный защитный «пояс», предохраняющий организм от непредвиденных изменений окружающей среды [129]. При этом подразумевается существование у организма развитой системы информационного обеспечения сведениями об условиях функционирования.

Проведённый обзор биологических аналогий позволяет аргументированно заключить, что открытые живые системы достигли высокой степени адаптивного взаимодействия с внешней средой на основе набора некоторых механизмов, связанных с многообразием внутреннего строения и принципов функционирования, и не испытывают ограничений, связанных с растущей функциональной сложностью организмов. Полученный вывод указывает на необходимость изучения этих механизмов с целью их воспроизведения в задачах моделирования и управления искусственными сложными системами.

1.3 Принципы эволюционной концепции многоальтернативности

Результаты исследований указанных в п.1.2 механизмов позволили объединить их в несколько общих принципов, которые составили в своей совокупности эволюционную концепцию многоальтернативности сложных систем любой природы [194,195,196,197,198]:

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

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

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

1.4 Примеры применения принципов многоальтернативности

Принципы многоальтернативности (от лат. *alternare* – чередовать) сейчас эмпирически осознаются, и находят применение в разнообразных информационно-управляющих системах, особенно для управления сложными

объектами так называемого критического назначения, когда выход из строя системы может привести к катастрофическим последствиям: атомные и химические реакторы, мобильные и автономные системы (самолеты, ракеты и космические аппараты; спутники и космические станции), транспорт газа и нефти и многие другие.

В частности, известным приёмом построения систем управления является их декомпозиция на несколько иерархических уровней, каждый из которых «вступает в работу» по мере исчерпания материальных или временных ресурсов нижестоящего уровня. Развитие этого приёма, начавшееся с простейших систем подчинённого регулирования, привело в настоящее время к созданию отдельных направлений в теории управления – гомеостатическому регулированию и магистральному управлению [1,40,80,172,175,291,306,337,395].

Принцип многообразия структур и разделения функций в простейших его видах также используется достаточно давно. В работах [200,287] отмечалось, что ещё в 1957 г. А.М. Лётовым [146] было предложено изменять знак обратной связи в регуляторе, т.е. изменять его структуру, выбирая одну из двух альтернатив в зависимости от текущего значения регулируемой величины.

Приведём примеры таких систем, иллюстрирующие влияние структурных переключений на поведение системы.

Рассмотрим структурно неустойчивую систему [98]:

$$\ddot{\varphi}(t) + kb\varphi(t) = kbg(t), \quad (1.7)$$

в которой: φ – регулируемая координата; g – задающее воздействие; k , b – параметры системы, причём b может быть нестационарным (к подобным системам можно отнести, например, систему ориентирования углового положения космического корабля).

В зависимости от значения произведения $k \cdot b$ фазовые траектории её движения имеют вид, представленный на Рисунке 1.1 (штриховые линии), и при любых значениях $k \cdot b$ соответствуют незатухающим гармоническим колебаниям с частотой $\omega = \sqrt{kb}$.

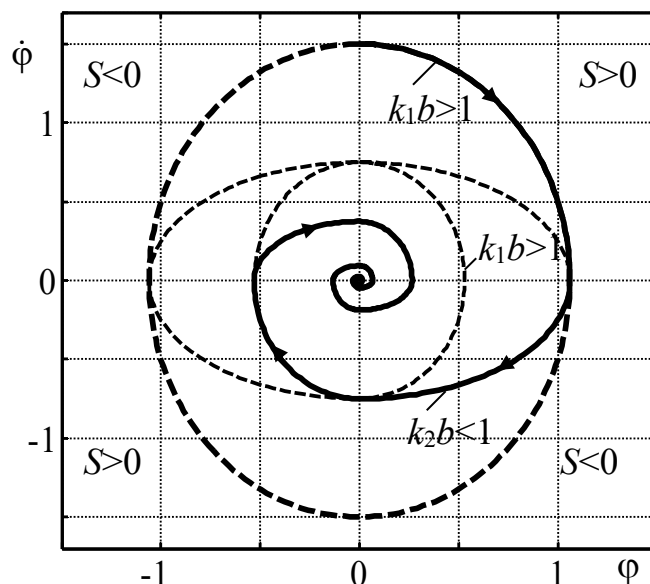


Рисунок 1.1 – Фазовые траектории системы с робастной устойчивостью в заданном диапазоне b

Анализ Рисунка 1.1 показывает, что выбрав некоторые значения k_1 и k_2 так, чтобы $k_1 b > 1$, а $k_2 b < 1$, и принимая в нечётных квадрантах $k = k_1$, а в чётных $k = k_2$, получим сходящуюся траекторию движения. Иным словами, стабилизация системы достигается путём детерминированного переключения вариантов её структуры в зависимости от текущего состояния. Переключающая функция $S = \varphi \cdot \dot{\varphi}$ представляет собою поверхность $S = 0$:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}(t) + k_1 b \varphi(t) = k_1 b g(t) & \text{при } S > 0, \\ \ddot{\varphi}(t) + k_2 b \varphi(t) = k_2 b g(t) & \text{при } S < 0. \end{cases} \quad (1.8)$$

Устойчивость системы (1.8) сохраняется в диапазоне изменения нестационарного параметра b , не нарушающем условий $k_1 b > 1$ и $k_2 b < 1$, и, если этот диапазон известен, она всегда может быть обеспечена соответствующим выбором k_1 и k_2 .

Изменяя в системе (1.8) набор вариантов структуры и вид поверхности S , можно создать устойчивое скользящее движение по этой поверхности, не зависящее от параметров системы, т.е. обеспечить не только стабилизацию

структурно неустойчивой системы, но и частичную робастность траекторий системы [285], например:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}(t) + kb\varphi(t) = kbg(t) & \text{при } S > 0, \\ \ddot{\varphi}(t) - kb\varphi(t) = kbg(t) & \text{при } S < 0; \end{cases} \quad (1.9)$$

где варианты структуры отличаются знаком обратной связи, а переключающая функция имеет вид:

$$S = c\dot{\varphi} + \varphi, \quad (1.10)$$

в котором константа c не зависит от параметров системы. На Рисунке 1.2 уравнение $S = 0$ представляет собою прямую, содержащую отрезок скольжения fd , при попадании на который траектория движения системы определяется только видом S , и в данном случае приобретает монотонный характер.

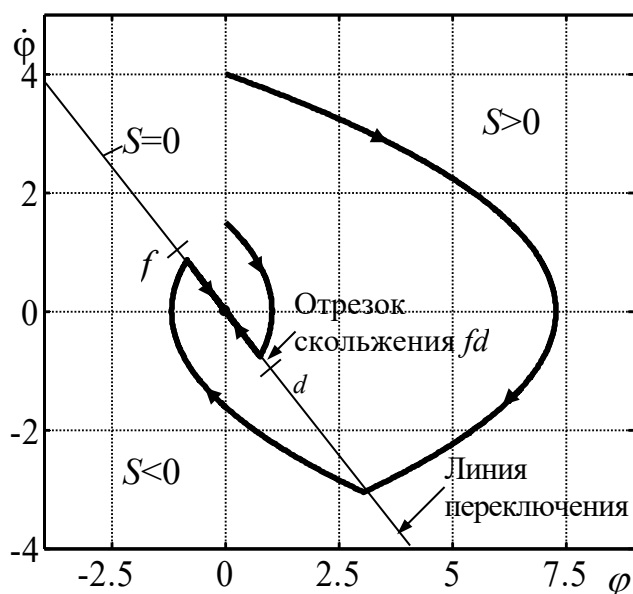


Рисунок 1.2 – Фазовые траектории системы, робастной на участке скольжения fd

Следует отметить, что демонстрируемое в указанном примере свойство многоальтернативности реализуется в объекте без форсирования, т.е. в правой части дифференциального уравнения его движения отсутствуют производные управляющего воздействия.

Рассмотрим возможность получения многоальтернативного управления со скользящим режимом в объекте с форсированием:

$$a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_1 \dot{y} + a_0 y = b_m u^{(m)} + \dots + b_1 \dot{u} + b_0 u, \quad (1.11)$$

где y – регулируемая величина; u – управляющее воздействие; a_i и b_j – параметры объекта, $i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, m}$; $m \leq n$. В правой части (1.11) присутствуют производные сигнала управления.

Известно [285], что построение релейного регулятора в координатах x пространства состояний, являющихся производными регулируемой величины

$$x_1 = y; \quad x_2 = \dot{x}_1; \quad x_3 = \dot{x}_2; \quad \dots \quad x_{n-1} = \dot{x}_n, \quad (1.12)$$

позволяет поддерживать в системе скользящее движение по поверхности $S = Cx = 0$, где C – матрица регулятора, инвариантное к параметрам объекта.

Однако присутствие в правой части рассматриваемого уравнения (1.12) производных управляющего воздействия делает невозможным описание таких объектов в указанном пространстве координат. Тем не менее, если исключить требование $y = x_1$, можно подобрать систему координат [275], обеспечивающих инвариантность скользящего движения к характеристической матрице объекта:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1}; & i = \overline{1, n-1}; \\ \dot{x}_n = -\frac{a_0}{a_n} x_1 - \frac{a_1}{a_n} x_2 - \dots - \frac{a_{n-1}}{a_n} x_n + \frac{1}{a_n} u; \\ y = b_0 x_1 + \dots + b_m x_{m+1}; & m \leq n-1. \end{cases} \quad (1.13)$$

Подставляя в $n-1$ уравнение этой системы полученное из равенства $Cx = 0$ соотношение

$$x_n = -\sum_{i=1}^{n-1} \frac{c_i}{c_n} x_i,$$

придем к уравнению скользящего движения:

$$c_n x_1^{(n-1)} + c_{n-1} x_1^{(n-2)} + \dots + c_2 x_1^{(1)} + c_1 x_1 = 0, \quad (1.14)$$

характер которого определяется только параметрами C регулятора. Условие существования этого режима $S \cdot \dot{S} < 0$ совпадает с типовым [285] и обеспечивается выбором достаточно большого значения уровня ограничения z на управление $|u| \leq z$.

Используемая система координат (1.13), в отличие от (1.12), не привязана ни к одной физической величине объекта. Это приводит к тому, что желаемое решение уравнения скольжения $\sum_{i=1}^n c_i x_i(t) = 0$ в общем случае не совпадает с

требуемой функцией изменения выходной координаты системы $y(t) = \sum_{i=0}^m b_i x_{i+1}(t)$

или

$$y(t) = b_m x_1^{(m)} + \dots + b_1 \dot{x}_1 + b_0 x_1. \quad (1.15)$$

Для получения уравнения скольжения в явном виде относительно регулируемой величины $y(t)$ достаточно задаться желаемым характеристическим полиномом $(n-m-1)$ -го порядка относительно $y(t)$:

$$r_{n-m-1} y^{(n-m-1)} + \dots + r_1 \dot{y} + r_0 y = 0, \quad (1.16)$$

и подставить, после соответствующего дифференцирования $(n-m-1)$ раз, (1.15) в (1.16).

Приведя подобные слагаемые по степеням производных, приходим к уравнению (1.14) с коэффициентами регулятора C :

$$\begin{aligned} c_n &= r_{n-m-1} b_m; \\ c_{n-1} &= r_{n-m-1} b_{m-1} + r_{n-m-2} b_m; \\ c_{n-2} &= r_{n-m-1} b_{m-2} + r_{n-m-2} b_{m-1} + r_{n-m-3} b_m; \\ &\dots \dots \dots \\ c_2 &= r_1 b_0 + r_0 b_1; \\ c_1 &= r_0 b_0. \end{aligned}$$

Очевидно, что грубость системы распространяется только на параметры a_i характеристического полинома объекта; параметры b_j форсирующей части непосредственно участвуют в построении регулятора скользящего режима.

В случае, когда $n = m$, каждый перепад релейного управления безынерционно проходит на выход объекта с коэффициентом передачи b_m/a_m и скользящее движение в системе не возникает, т.е. рассматриваемые выше соотношения имеют смысл при выполнении неравенства $m \leq n-1$.

В качестве примера, иллюстрирующего изложенную методику синтеза регулятора, рассмотрим объект с форсированием:

$$\ddot{y} + 4\dot{y} + 97y = \dot{u} + 0,5u.$$

Описание этого объекта в пространстве состояний (1.13):

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= x_3; \\ \dot{x}_3 &= -202x_1 - 97x_2 - 4x_3 + u; \\ y &= 0,5x_1 + x_2.\end{aligned}$$

От общего уравнения скользящего движения

$$c_3x_3 + c_2x_2 + c_1x_1 = c_3\ddot{x}_1 + c_2\dot{x}_1 + c_1x_1 = 0$$

перейдем к его виду, выраженному через регулируемую величину $y(t)$:

$$r_1\dot{y} + r_0y = 0,$$

то есть:

$$r_1(0,5\dot{x}_1 + \ddot{x}_1) + r_0(0,5x_1 + \dot{x}_1) = r_1\ddot{x}_1 + (r_1 \cdot 0,5 + r_0) \cdot \dot{x}_1 + r_0 \cdot 0,5x_1 = 0.$$

Выбрав желаемый полином с коэффициентами $r_0 = 1$; $r_1 = 0,1$, обеспечивающими экспоненциальный вид переходного процесса с временем регулирования $3 \cdot r_1 = 0,3$ с, получим коэффициенты регулятора скользящего движения:

$$\begin{aligned}c_3 &= r_1 = 0,1; \\ c_2 &= r_1 \cdot 0,5 + r_0 = 0,05 + 1 = 1,05; \\ c_1 &= r_0 \cdot 0,5 = 0,5.\end{aligned}$$

Переходные процессы собственно объекта $y_{об}(t)$ и системы $y(t)$ с регулятором скользящего режима при $g(t)=1$ и $z = 500$ приведены на Рисунке 1.3.

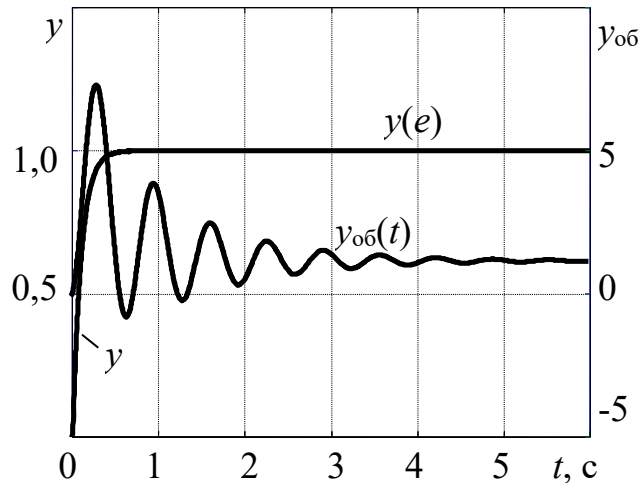


Рисунок 1.3 – Переходные процессы: $y_{об}(t)$ – в объекте без регулятора;
 $y(t)$ – в системе с регулятором

Результат моделирования подтверждает возникновение скользящего режима с параметрами, соответствующими расчётным. При этом обеспечивается монотонный характер переходного процесса.

Рассмотрим теперь пример системы с переменной структурой, в которой использование многоальтернативного принципа разделения функций позволяет синтезировать нелинейный фильтр с независимыми амплитудной и фазовой частотными характеристиками [63,221].

Линейные минимально-фазовые корректирующие устройства характеризуются жёсткой взаимосвязью амплитудных $W(\omega)$ и фазовых $\varphi(\omega)$ частотных характеристик [154,278]:

$$\varphi(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln W(u)}{u - \omega} du, \quad (1.17)$$

которая одновременно с подавлением высокочастотных компонент входного сигнала определяет неизбежное и существенное увеличение его фазового отставания. Это отставания во многих случаях регламентировано некоторым критическим значением, превышение которого недопустимо.

Пример зависимости между $W(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ показан на Рисунке 1.4 для

$$W_{\text{л}}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+\omega^2}}, \quad L_{\text{л}}(\omega) = 20 \log W_{\text{л}}(\omega).$$

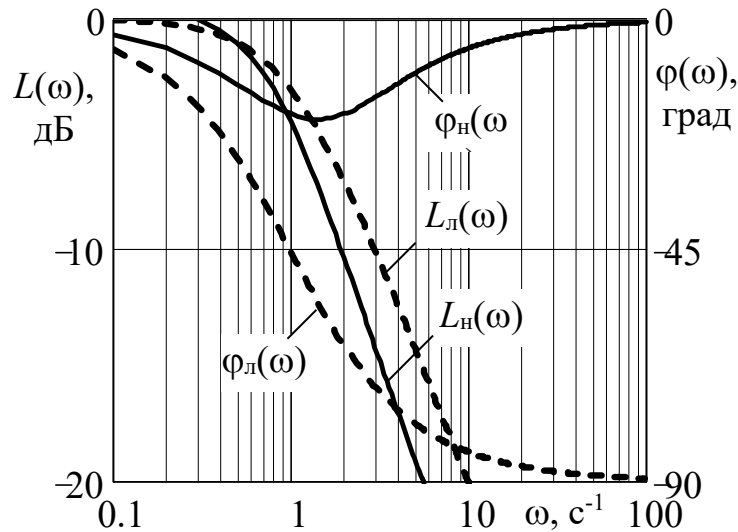


Рисунок 1.4 – Амплитудные и фазовые частотные характеристики линейного $L_{\text{л}}(\omega)$, $\varphi_{\text{л}}(\omega)$ и нелинейного $L_{\text{н}}(\omega)$, $\varphi_{\text{н}}(\omega)$ фильтров

Для устранения указанной взаимосвязи амплитудной и фазовой частотных характеристик линейных корректирующих звеньев воспользуемся нелинейным фильтром с переменной структурой, в котором указанная взаимосвязь для первых гармоник сигналов отсутствует, Рисунок 1.5 [153,161].

Для этого фильтра:

$$v(t) = u(t) \cdot |x(t)|, \quad (1.18)$$

где $x(t)$ является решением уравнения:

$$T\dot{x}(t) + x(t) = \text{sign} u(t). \quad (1.19)$$

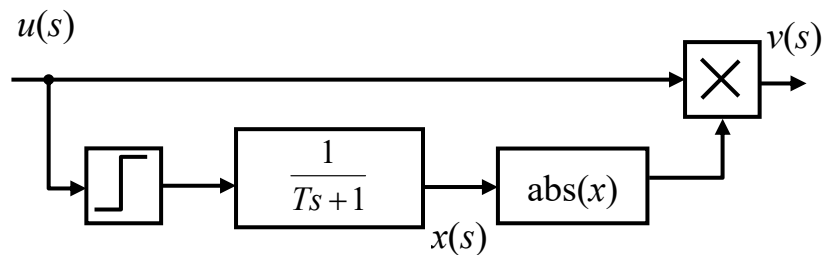


Рисунок 1.5 – Структурная схема нелинейного фильтра с переменной структурой

Для первой гармоники входного сигнала $u(t) = A \sin \omega t$ комплексный коэффициент передачи $\tilde{W}(A, \omega)$ рассматриваемого нелинейного фильтра имеет вид:

$$\tilde{W}(A, \omega) = \tilde{P}(A, \omega) + j\tilde{Q}(A, \omega), \quad (1.20)$$

где $\tilde{P}(A, \omega)$ и $\tilde{Q}(A, \omega)$ коэффициенты гармонической линеаризации:

$$\begin{aligned} \tilde{P}(\omega) &= \frac{8}{\pi^2 \sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \left(1 + \frac{1}{3} \cos 2\theta \right); \\ \tilde{Q}(\omega) &= \frac{8}{\pi^2 \sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \left(\frac{1}{3} \sin 2\theta \right); \\ \theta &= \text{arctg}(-\omega T). \end{aligned} \quad (1.21)$$

Сопоставление частотных характеристик линейного $L_{\text{л}}(\omega)$, $\varphi_{\text{л}}(\omega)$ и нелинейного $L_{\text{н}}(\omega)$, $\varphi_{\text{н}}(\omega)$ корректирующих устройств:

$$\begin{aligned} L_{\text{н}}(\omega) &= 20 \log \sqrt{\tilde{P}^2(\omega) + \tilde{Q}^2(\omega)}; \\ \varphi_{\text{н}}(\omega) &= \text{arctg} \frac{\tilde{Q}(\omega)}{\tilde{P}(\omega)}, \end{aligned} \quad (1.22)$$

с наиболее близкими функциями $L_{\text{л}}(\omega)$ и $L_{\text{н}}(\omega)$ дано на Рисунке 1.4, из которого следует, что подавление высокочастотного диапазона спектра входного сигнала $u(t)$ нелинейным фильтром выполняется в большей степени, чем в линейном, при вносимом запаздывании по фазе, не превышающем (-20 град).

Таким образом, использование многоальтернативного управления с переменной структурой позволяет реализовать нелинейные корректирующие устройства, сочетающие в себе полезные свойства линейных систем – независимость характеристик от амплитуды сигналов – с нелинейным свойством независимости фазовой и частотной характеристик. При этом фазовая характеристика фильтра приближается к частотно-независимой.

Приведённые примеры показывают возможность получения высоких и даже уникальных показателей качества систем в результате применения всего двух альтернативных вариантов управления.

В задачах взаимосвязанного регулирования более сложными – многомерными системами переход к альтернативным вариантам управления осуществляется по условию попадания некоторой обобщённой характеристики системы в различные, в общем случае пересекающиеся области пространства регулируемых координат. Алгоритмы многоальтернативного взаимосвязанного управления на примерах процессов полимеризации приведены в работах [21,94,199]. Развитие работ в этом направлении привело к созданию теории систем с переменной структурой [98,285].

В системах обеспечения безопасности технологических процессов используется так называемый диверсный (от англ. diversity – разнообразие) подход к их построению, предусматривающий резервирование функций системы на физически различной элементной базе: программные средства резервируются аппаратными, энергозависимые – энергонезависимыми (пассивными) и т.п. [8,16,46,208,217,218,270]. Принцип многообразия включён в рекомендации Международной энергетической комиссии в качестве обязательного к применению для построения систем аварийной защиты атомных станций [81].

Принцип модульности востребован в высоконадёжных вычислительных и энергетических системах, обеспечивая иерархическую структуру и многообразие режимов функционирования этих систем [121,302,413,458].

В настоящее время многоальтернативными системами (MAS: multi-alternative systems) называют такие информационно-измерительные и управляющие системы, в которых наиболее важные (критические) функции сбора, обработки, хранения и выдачи информации или режимы функционирования реализуются несколькими альтернативными способами [198,201,205,207,402].

1.5 Гносеологическое содержание эволюционного подхода к задачам управления

Проведение прямой биологической аналогии и применение принципов многоальтернативности при построении сложных систем моделирования и

управления с критическими режимами открывает возможность направленного воспроизведения в этих системах высоких адаптационных свойств, присущих биологическим системам, и преодоления основной проблемы управления большими системами – проблемы их высокой размерности [403,404].

В широком смысле эволюционные принципы многоальтернативности являются составной частью общих кибернетических принципов построения открытых систем управления сложными объектами как естественного, так и искусственного происхождения. Рассматриваемый многоальтернативный подход к управлению в открытых системах сформулирован У. Эшби в виде информационного принципа необходимого разнообразия [322]: “Only variety can destroy variety” - «Только многообразие может уничтожить многообразие», – согласно которому дискретное разнообразие управляющей системы должно быть не меньше разнообразия состояний управляемого объекта. Можно констатировать, что кибернетическая сущность биологической эволюции в целом как процесса обработки информации привела в настоящее время к формированию нового научного направления – «эволюционная кибернетика» [257,258,259,284].

С гносеологических позиций обращение к свойству многоальтернативности эволюции соответствует общей диалектике научного познания: от констатации явления – к теоретическому обобщению закономерностей происходящих в нём процессов, позволяющему встроить рассматриваемое явление в единую систему знаний о природе. Сформулированная в результате такого обобщения кибернетическая концепция многоальтернативности открывает возможность целенаправленной разработки конкретных моделей, методов и способов практической реализации этой концепции в технических и организационных системах, в частности – в системах с критическими режимами функционирования.

Выводы по главе 1

1. Представленная в главе классификация критических режимов сложных антропогенных систем свидетельствует о значительном разнообразии указанных режимов и о необходимости построения общей методологии управления в таких

режимах, охватывающей широкий класс объектов: детерминированных, со случайными и хаотическими процессами, с существенной неопределённостью.

2. Задача управления указанными объектами сталкивается с трудностями, связанными с высокой размерностью систем и их структурной и параметрической изменчивостью. 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. Указанные обстоятельства создают предпосылки для обращения к биологическим прототипам рассматриваемых систем.

3. Проведённый обзор биологических аналогий с решаемой задачей управления сложными объектами с критическими режимами позволяет заключить, что открытые живые системы достигли высокой степени адаптивного взаимодействия с внешней средой на основе набора некоторых простых механизмов, связанных с многообразием внутреннего строения и принципов функционирования, и не испытывают ограничений, связанных с растущей функциональной сложностью организмов.

4. Результаты исследований указанных механизмов дали возможность объединить их в несколько общих принципов, которые составили в своей совокупности эволюционную концепцию многоальтернативности сложных систем:

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

В живой природе указанные эволюционные механизмы дополняют собою механизм естественного отбора.

5. Примеры известных систем многоальтернативного управления демонстрируют возможность стабилизации структурно неустойчивых систем, обеспечения их робастности, сочетания полезных свойства линейных систем – независимость характеристик от амплитуды сигналов с нелинейным свойством независимости фазовой и частотной характеристик, т.е. свидетельствуют о практической перспективности применения этих систем для управления объектами с критическими режимами сравнительно простыми средствами. Одновременно с этим, накопленный опыт реализации указанных систем указывает на необходимость и возможность методологического обобщения разработанных в них методов управления с наиболее общих, кибернетических позиций, объединяющих всё разнообразие этих методов на основе единой методологии.

6. Результаты главы позволяют сделать вывод о целесообразности разработки эволюционного подхода к построению систем управления объектами с критическими режимами, и 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.

Основные материалы данной главы изложены в работах [45,46,63,205,207,208,217,218,221,243,402,403,404,413,422].

ГЛАВА 2. МОДЕЛИ ЭВОЛЮЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЁТОМ РОЛИ МЕХАНИЗМОВ МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОСТИ В КРИЗИСНЫХ – КРИТИЧЕСКИХ – ПЕРИОДАХ ЭВОЛЮЦИИ

В главе на основе моделирования и анализа эволюционных свойств добиологических и биологических систем приводится теоретическое обоснование принципов многоальтернативности и показывается, что наряду с естественным отбором реализация механизмов многоальтернативности является неотъемлемым условием эволюции. Делается вывод о том, что эти принципы продолжают ряд общих кибернетических принципов построения открытых систем управления, и их практическое воспроизведение в искусственных системах открывает новые возможности для повышения качества управления сложными объектами с критическими режимами.

2.1 Модели и механизмы многоальтернативности в добиологической эволюции

Современные гипотезы возникновения жизни (добиологический период её организации) [93,255,257,317,327,343,351,446,433] во многом сходны в том, что этот процесс является процессом упорядочения и самокопирования относительно устойчивых молекулярных элементов – репликаторов, в роли которых могут выступать короткие цепочки из некоторого набора элементарных компонентов.

Рассмотрим значение многоальтернативности в указанном процессе.

В качестве исходного примера исследуем модель добиологической эволюции молекулярных соединений – модель квазивидов, предложенную М. Эйгеном [317]:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = \left(w_i - \sum_{j=1}^n (w_j x_j) \right) x_i; \\ \sum_{j=1}^n x_j = 1; \quad i = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (2.1)$$

где w_i – степень приспособленности (селективная ценность) макромолекулы вида i ; x_i – частота встречаемости молекул вида i в популяции; $\sum_{j=1}^n (w_j x_j)$ – средняя селективная ценность всех видов молекул; n – число различных видов молекул в популяции.

Общий вид этой модели, а также численное решение (2.1) для $w = [1 \ 0,995 \ 0,99 \ 0,985 \ 0,98]^T$, представленное на Рисунке 2.1, подтверждает теоретически предсказуемый результат: наиболее приспособленный вид молекул, обладающий степенью приспособленности выше средней, вытесняет все другие виды вплоть до их полного вымирания.

Однако если изменившиеся условия среды приводят к снижению продуктивности этого доминирующего вида (момент времени $t = 1000$ на Рисунке 2.1), то его место может занять очередной по производительности вид репликаторов. (Здесь и далее в главе не используются конкретные единицы измерения времени, выбор которых не влияет на анализ хронологической последовательности событий, и может быть произвольным).

Если же эти изменения среды произойдут на фоне единственного вида молекул, то рассматриваемый процесс репликации завершится безрезультатно, т.е. полной гибелью всех исходных молекул-репликаторов.

Если в уравнение (2.1) ввести составляющие $\sum_j^n (\psi_{ij} x_j)$, описывающие с помощью коэффициентов ψ_{ij} мутационные потоки в каждый из видов i со стороны других видов $j \neq i$ молекул [257, 317]:

$$\dot{x}_i = \left[w_i - \left(\sum_{j=1}^n (w_j x_j) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j \neq k}}^n \sum_{j=1}^n (\psi_{kj} x_j) \right) \right] x_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (\psi_{ij} x_j), \quad (2.2)$$

то даже при малых значениях мутационных потоков процесс самокопирования претерпевает качественные изменения (Рисунок 2.2).

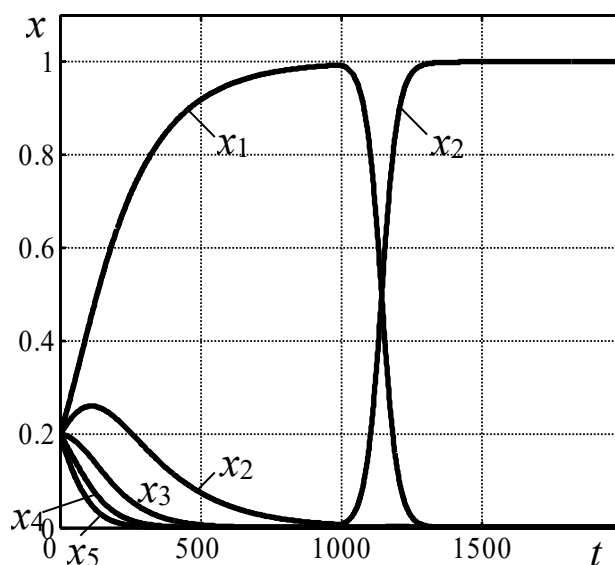


Рисунок 2.1 – Процесс неустойчивой эволюции (2.1) для популяции из пяти элементов с частотами встречаемости x_1, \dots, x_5

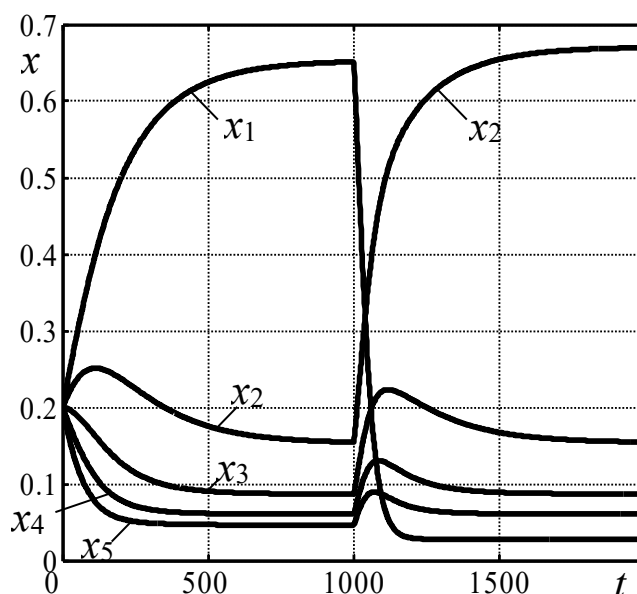


Рисунок 2.2 – Формирование популяции с устойчивым разнообразием (2.2) конкурирующих элементов с частотами x_1, \dots, x_5

На Рисунке 2.2, полученном для очень малого по сравнению с w значения параметра мутаций $\psi_{ij} = 0,001$, показано, что процесс эволюции совершается с некоторым распределением концентраций всех начальных видов элементов популяции и образованием их устойчивого разнообразия, поддерживающего сохранение этих элементов при изменяющихся условиях самокопирования некоторых из них. Этот распределённый итог получил название квазивида, содержащего эволюционно устойчивое вероятностно-распределённое многообразие близких по организации макромолекул.

Таким образом, уже на уровне элементарных макромолекул многообразие результатов копирования, вызванное его малыми мутациями, обеспечивает прогрессивное протекание эволюционного процесса, т.е. является необходимым условием добиологической организации. Без мутационных вариаций селективной ценности устойчивая репликация макромолекул невозможна.

Рассмотрим теперь более сложную модель добиологической эволюции – модель сайзеров (от англ. SYSER – SYstem of SElf-Reproduction – самовоспроизводящаяся система) [255,257,289,453], содержащую в своей структуре элементы биологических организмов: полинуклеотидную макромолекулу (матрицу), хранящую информацию о своём строении, ферменты (катализаторы) трансляции, обеспечивающие в соответствии с этой информацией синтез строительных элементов макромолекулы, и ферменты репликации, выполняющие функции самокопирования.

Процесс самовоспроизводства макромолекул в результате совместного взаимодействия указанных элементов в сайзерах с единственной полинуклеотидной матрицей (в другой терминологии – сайзерах со сцеплёнными матрицами [255]) описывается уравнениями [257]:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_i \sum_{j=1}^n (a_j y_j) - x_i \sum_{k=1}^n x_k \sum_{j=1}^n (a_j y_j); \\ \dot{y}_i = x_i \sum_{j=1}^n (b_j z_j) - y_i \cdot 2 \sum_{k=1}^n x_k \sum_{j=1}^n (b_j z_j); \\ \dot{z}_i = x_i \sum_{j=1}^n (b_j z_j) - z_i \cdot 2 \sum_{k=1}^n x_k \sum_{j=1}^n (b_j z_j), \end{cases} \quad (2.3)$$

в которых x_i, z_i, y_i – концентрации нуклеотидных матриц, ферментов трансляции и ферментов репликации в сайзере типа i , причём эти концентрации подчиняются условиям постоянства их общих суммы: $\sum_{i=1}^n x_i = 1, \sum_{i=1}^n (y_i + z_i) = 1$; a_j – коэффициенты, отражающие скорость синтеза матриц, а b_j – скорость синтеза ферментов y_j и z_j .

Численное решение системы уравнений (2.3) показано на Рисунках 2.3, 2.4 и свидетельствует об отсутствии эволюционных изменений: начальные концентрации матриц не изменяются. Причина этого заключается в гомогенности молекулярной популяции, в которой скорость синтеза компонентов x_i недифференцированно определяется коэффициентами $\sum_{j=1}^n (a_j y_j)$, одинаковыми

для любого типа сайзера, и условие $\sum_{i=1}^n x_i = 1$ приводит к равенству

$$x_i \sum_{j=1}^n (a_j y_j) = x_i \sum_{k=1}^n x_k \sum_{j=1}^n (a_j y_j),$$

вследствие которого $\dot{x}_i = 0$ [257]. Гомогенность популяции приводит к её эволюционному застою.

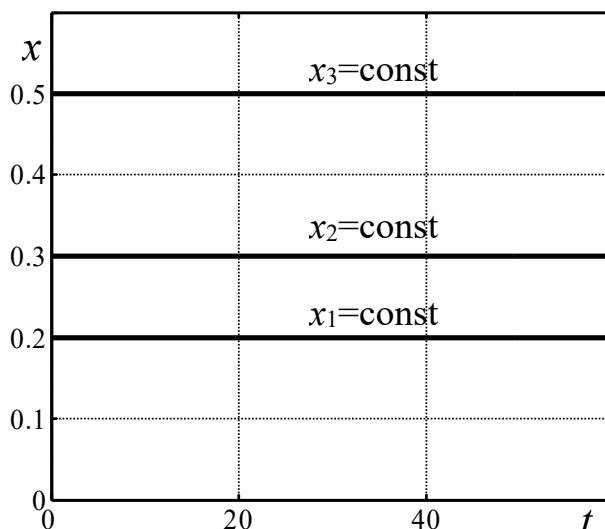


Рисунок 2.3 – Эволюционный застой в однородной ферментной среде (2.3) из трёх типов элементов с концентрациями матриц x_1, x_2, x_3

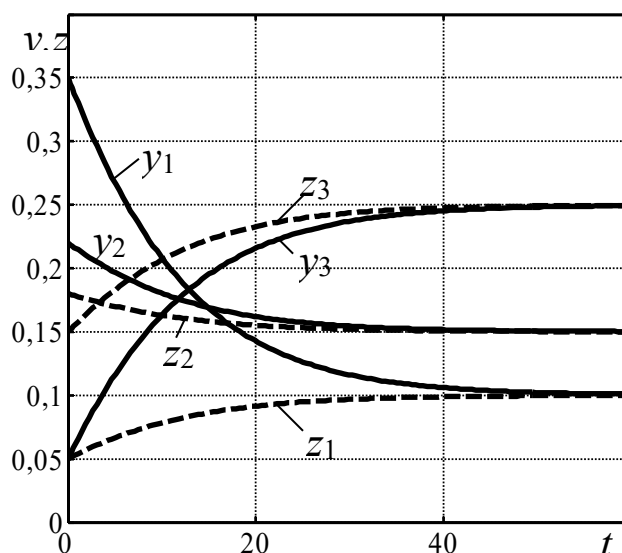


Рисунок 2.4 – Формирование однородной ферментной среды (2.3) (y – концентрация ферментов репликации, z – концентрация ферментов трансляции)

Усложнение модели (2.3) путём пространственного разделения сайзеров – их размещения в фазово-обособленные образования – коацерваты [289], в каждом из которых сосредоточены сайзеры только одного типа, позволяет для отдельно взятого коацервата переписать уравнения (2.3) в виде

$$\begin{cases} \dot{x} = ayx - x(ayx + bzx + dzx); \\ \dot{y} = bzx - y(ayx + bzx + dzx); \\ \dot{z} = dzx - z(ayx + bzx + dzx), \end{cases} \quad (2.4)$$

где коэффициенты a , b , d , характеризующие скорости синтеза, индивидуальны для каждого коацервата. Конкуренция между коацерватами описывается уравнениями [257]:

$$\dot{v}_i = \left(w_i - \sum_{j=1}^n (w_j v_j) \right) v_i, \quad (2.5)$$

в которых v_i – доля коацерватов типа i в их общем количестве $\sum_{i=1}^n v_i = 1$;

$w_i = a_i y_i x_i + b_i z_i x_i + d_i z_i x_i$ – коэффициент, характеризующий среднюю скорость синтеза коацерватов типа i , а $\sum_{j=1}^n (w_j v_j)$ – среднюю скорость синтеза всех n коацерватов.

Результат численного решения (2.4), (2.5) представлен на Рисунке 2.5 и указывает на возникновение естественного отбора наиболее приспособленных типов макромолекулярных матриц, при этом именно в силу доминирующего синтеза макромолекул одного вида устойчивого эволюционного процесса всей совокупности коацерватов не возникает. Однако введение в (2.5) даже малых перекрёстных мутационных потоков $\psi_{ij} = 0,001$, аналогично (2.2), позволяет получить процесс эволюции, устойчивый к изменению внешних условий (момент времени $t = 1000$ на Рисунке 2.6), т.е. подтверждается полученный при анализе квазивидов результат: эволюционный процесс устойчив не вопреки, а благодаря мутациям селективной ценности макромолекул.

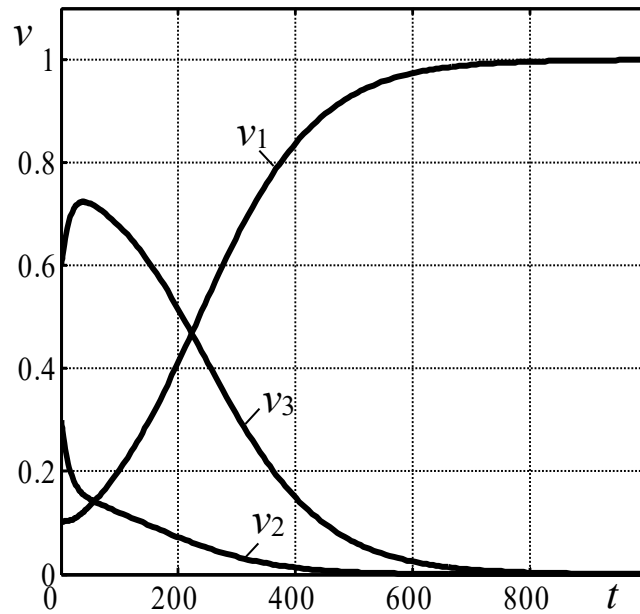


Рисунок 2.5 – Возникновение конкуренции и естественного отбора в результате перехода от однородной ферментной среды (Рисунки 2.3, 2.4) к селективному синтезу (2.5)

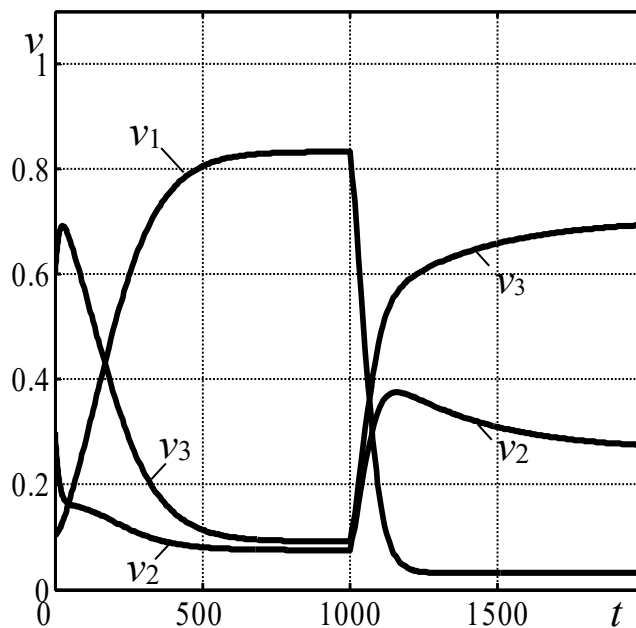


Рисунок 2.6 – Формирование популяции с устойчивым разнообразием конкурирующих элементов с частотами v_1 , v_2 , v_3 путём введения в (2.5) мутационных потоков

Таким образом, анализ моделей добиологического этапа эволюции жизни показывает, что для возникновения и устойчивого существования макромолекул,

способных к саморепликации, необходимо выполнение ряда взаимосвязанных условий:

- наличие некоторого многообразия конкурирующих типов макромолекул, в том числе близких по строению;
- межмолекулярная избирательность (дифференцированность) приспособительных и репликативных механизмов разных типов молекул;
- совместность существования вариантов макромолекул, обеспечивающая перекрёстные мутационные потоки и общий эволюционный прогресс популяции в целом, при котором те или иные преимущества одного элемента популяции используется всеми её другими элементами.

Указанные механизмы входят составной частью в более широкое понятие, свойственное уже биологическим системам – многоальтернативную стратегию эволюции.

2.2 Модели и механизмы многоальтернативности в эволюции биологических популяций

Перейдём к анализу стратегии многоальтернативности на более высоком – молекулярно-генетическом уровне эволюции, определяющем процессы возникновения и развития биологических видов в популяциях.

В соответствии с выводами популяционной генетики [253,279,324] доминирующим и направляющим механизмом внутривидовой эволюции является естественный отбор особей, имеющих в текущих условиях внешней среды преимущественные приспособительные реакции, обусловленные разнообразием генетических структур внутри популяции. Основным источником этого разнообразия являются мутации генов. При этом сами мутации, как таковые, не носят направленного характера, т.е. нейтральны [107,114], однако, накапливаясь в популяции, они образуют скрытый, мобилизационный резерв её генофонда, обеспечивающий биологическому сообществу высокую приспособительную и эволюционную гибкость [308].

К классическим теоремам приспособительной эволюции относят теорему Фишера [355], согласно которой средняя степень приспособленности w популяции возрастает только при наличии её вариаций (генной дисперсии) внутри популяции, причём средняя скорость изменения приспособленности пропорциональна этой дисперсии. Формальная запись теоремы Фишера может быть получена из эволюционной модели (2.1):

$$\begin{cases} \dot{x}_i = \left(w_i - \sum_{j=1}^n (w_j x_j) \right) x_i; \\ \sum_{j=1}^n x_j = 1; \quad i = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (2.6)$$

содержание которой здесь изменилось: w_i – степень приспособленности особей с генотипом i ; x_i – частота встречаемости генотипа i в популяции;

$$\sum_{i=1}^n w_i x_i = \bar{w}, \quad (2.7)$$

\bar{w} – средняя приспособленность всех генотипов в популяции; n – число различных генотипов в популяции.

В соответствии с (2.7) получим, что скорость изменения средней приспособленности равна

$$\dot{\bar{w}} = \sum_{i=1}^n w_i \dot{x}_i = \sum_{i=1}^n w_i (w_i - \bar{w}) x_i, \quad (2.8)$$

или, с учётом (2.7),

$$\dot{\bar{w}} = \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i^2 \right) - \bar{w}^2, \quad (2.9)$$

где правая часть равенства представляет собою дисперсию степеней генной приспособленности w_i в популяции. Таким образом, наличие вариаций в приспособленности особей (наличие альтернативных вариантов генотипов) является необходимым условием эволюционных, в первую очередь приспособительных изменений в популяции.

Справедливость этого вывода неоднократно подтверждалось результатами длительной селекционной работы по выведению, например, высокоурожайных сортов ячменя, низкорослой пшеницы, крупноразмерных лососевых рыб. Во всех указанных случаях наблюдалось существенное снижение генетического разнообразия (числа аллелей на локус) в отобранных для промышленного производства сортах и видах и, как следствие, снижение их устойчивости к изменениям внешней среды и заболеваниям [9].

Модель (2.6) справедлива для гипотетического варианта эволюции с некоторым изначально зафиксированным многообразием генотипов, в пределах и средствами которого реализуется механизм приспособительной эволюции. Очевидно, что при бесконечном разнообразии условий внешней среды указанный генетический запас будет исчерпан, что соответствует, в рамках этой модели, вырождению популяции.

Рассмотрим эволюционную роль генетической многоальтернативности в более реальных условиях, когда неограниченному многообразию внешних воздействий среды противопоставляется незафиксированное многообразие генетических структур, постоянно накапливающихся и обновляемых в результате мутаций в популяции с непостоянным количеством особей $n(t)$, не превышающим некоторого максимального размера N популяции: $0 \leq n(t) \leq N$ [126], определяемого ограниченностью необходимых для её существования ресурсов.

Для анализа этого случая представим процесс молекулярно-генетической эволюции в популяции дискретным однородным марковским процессом, имеющим множество состояний S_{ij} , $i = 0, 1, 2, \dots$; $j = 0, 1, \dots, N-1, N$, среди которых:

$S_{0,0}$ – состояние, соответствующее вырожденной популяции, т.е. $n(t) = 0$; вероятность выхода эволюционного процесса из этого состояния равна нулю;

$S_{i,1}, \dots, S_{i,N}$ – состояния популяции с числом особей $n = 1, \dots, N$ и набором i генетических изменений в популяции.

Предполагается, что рост популяции происходит с интенсивностью η , а накопление генофонда – с интенсивностью $n \cdot \mu$. События внешней среды

описываются потоком с интенсивностью λ , при этом будем считать, что потоки событий среды и накопления генофонда комплементарны, т.е. в процессе эволюционного приспособления при всяком очередном изменении среды используется («расходуется») соответствующая генетическая структура и разнообразие генофонда уменьшается на некоторую условную единицу.

Модель описанного процесса в виде графа показана на Рисунке 2.7.

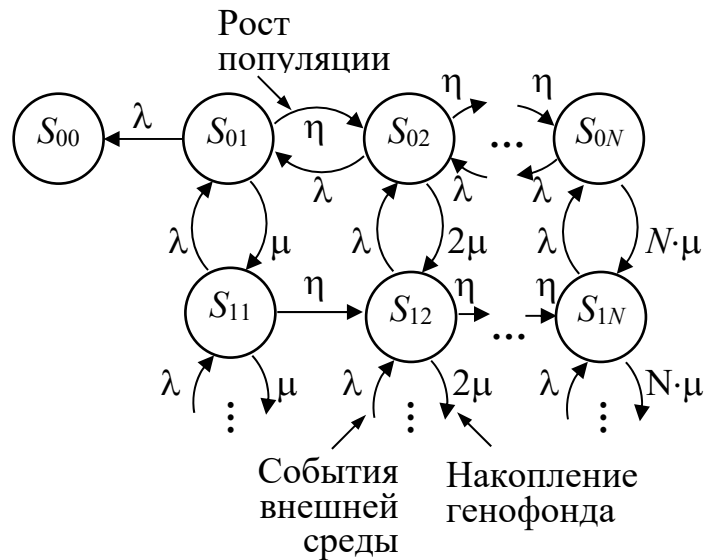


Рисунок 2.7 – Граф состояний популяции в процессе эволюции

Для количественного анализа этой модели воспользуемся тем обстоятельством, что скорость накопления генофонда популяции значительно превосходит скорость роста её численности, т.е. $\mu \gg \eta$. А.В. Яблоков в [324] отмечает, что каждая особь животных и растений в популяции обычно вариабельна по десятку тысяч генов, и генотип каждой особи должен содержать хотя бы одну вновь возникшую мутацию. Таким образом, ограничиваясь интересующим нас анализом влияния на процесс эволюции генетического разнообразия, можно перейти к одномерному варианту модели, представленному на Рисунке 2.8, на котором выделены три группы состояний популяции:

S_0 – поглощающее состояние, соответствующее вырожденной популяции, $n(t) = 0$;

S_1, \dots, S_N – состояния популяции, характеризующиеся одновременным изменением её численности $n(t)$ и генофонда, причём, в соответствии с приведённой выше нижней оценкой скорости мутагенеза, принято, что появление каждой новой особи эквивалентно новой генетической структуре;

S_{N+1}, \dots – состояния популяции, достигшей заданного ограничения по своему размеру N , но продолжающей накапливать с интенсивностью $N \cdot \mu$ генетические изменения, парящие изменения внешней среды.

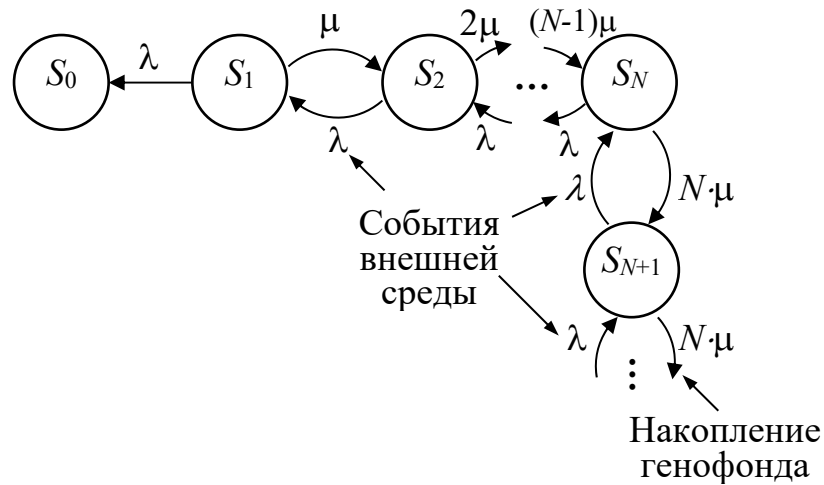


Рисунок 2.8 – Одномерная марковская модель накопления генофонда

В полученной одномерной марковской модели процесс изменения во времени вектора вероятностей $P(t) = [p_0(t) p_1(t) p_2(t) \dots]$ состояний S_0, S_1, S_2, \dots популяции описывается дифференциальным уравнением Колмогорова [67]:

$$\frac{dP(t)}{dt} = P(t) \cdot \Lambda, \quad (2.10)$$

в котором Λ – матрица интенсивностей переходов (инфинитезимальная матрица) в рассматриваемом случае имеет нулевую первую строку:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \lambda & -(\lambda + \mu) & \mu & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & \lambda & -(\lambda + N \cdot \mu) & N \cdot \mu & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \lambda & -(\lambda + N \cdot \mu) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

Общий вид решения уравнения (2.10):

$$P(t) = P(0)e^{\Lambda t}, \quad (2.12)$$

где $P(0) = [p_0(0) p_1(0) p_2(0) \dots]$ – вектор вероятностей начального состояния популяции.

С целью численного исследования эволюционных изменений в популяции на модели (2.10) были приняты следующие значения её параметров: максимальный размер популяции $N = 50$; число возможных генетических состояний $M = 500$, во много раз превышающее N , что позволяет экстраполировать полученные результаты на случай с неограниченным M ; интенсивность потока генетических изменений в одной особи $\mu = 1$; интенсивность событий внешней среды $\lambda = 25$.

Все рассматриваемые здесь потоки событий принимаются простейшими пуассоновскими (стационарными, ординарными и не имеющими последствия), т.е. интервал времени между соседними событиями в этих потоках имеет показательное распределение с плотностью $\varphi(t) = k \cdot e^{-k \cdot t}$, где k – интенсивность потока. Заметим, что принятый простейший характер потоков предопределяет возможность применения в данном исследовании марковской модели молекулярно-генетической эволюции [67] и, соответственно, уравнения (2.10).

Результаты моделирования показали, что при фиксированных значениях указанных параметров популяция имеет всего две альтернативы своего

изменения: вырождение с вероятностью p_0 и неограниченный рост с вероятностью $p_\infty=1-p_0$, причём эти вероятности зависят от численности популяции $n_{\text{нач}}$ в момент условного времени начала исследования.

На Рисунке 2.9 показана зависимость вероятности вырождения p_0 от отношения интенсивности потока генетических изменений $n_{\text{нач}} \cdot \mu$ во всей популяции к интенсивности λ потока событий внешней среды. Из Рисунка 2.9 следует, что устойчивое существование популяции обеспечивается, по меньшей мере, при двукратном превышении скорости генетических изменений над скоростью вариаций внешней среды. Обратное соотношение практически всегда приводит к вырождению популяции.

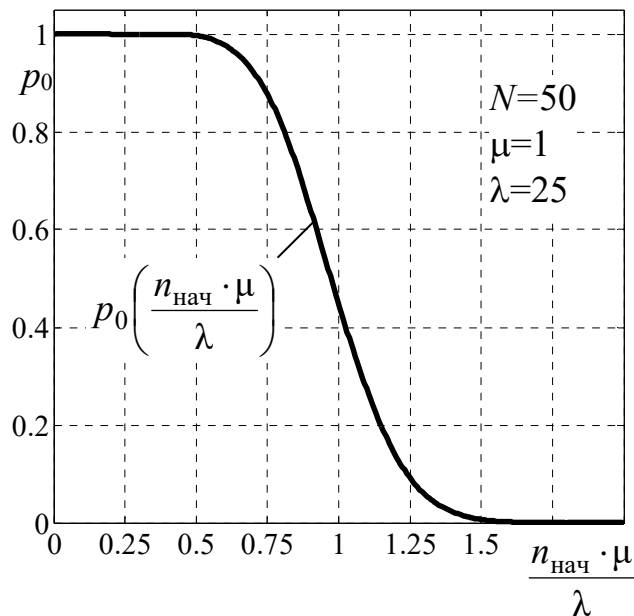


Рисунок 2.9 – Изменение вероятности p_0 вырождения популяции в зависимости от соотношения интенсивностей потока генетических изменений и потока событий внешней среды

На Рисунках 2.10, 2.11 иллюстрируются изменения в популяциях с различной начальной численностью: при $n_{\text{нач}} = 40$ наблюдается увеличение численности популяции до максимального значения $N = 50$, а затем неограниченное увеличение её генетических состояний S – от меньших номеров к

большим – 60...70...80...100...; при $n_{\text{нач}} = 10$ изменения популяции имеют противоположную направленность: из состояния S_{10} происходит переход в состояния с меньшей численностью $S_8...S_6...S_1$ и, наконец, S_0 с вероятностью $p_0 = 1$, соответствующей вырождению популяции.

Проведённое исследование процессов молекулярно-генетической эволюции свидетельствует о том, что устойчивое существование и развитие популяции реализуется не за счёт роста её численности, а за счёт увеличения её генетического многообразия со скоростью, превышающей скорость угрожающих существованию популяции изменений внешней среды. Т. е. эволюция биосистем на уровне популяций необходимо обеспечивается многообразием, многоальтернативностью её молекулярно-генетических структур. Это многообразие тесно связано с критической нижней численностью популяции, при переходе через которую скорость накопления генетических альтернатив становится меньше скорости появления неблагоприятных факторов среды, и популяция в статистическом смысле будет обречена на вырождение.

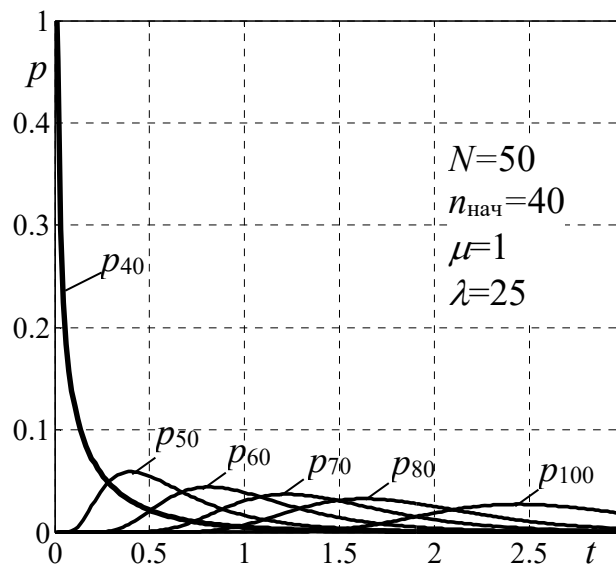


Рисунок 2.10 – Рост популяции и её генофонда при начальной численности $n_{\text{нач}} = 40$

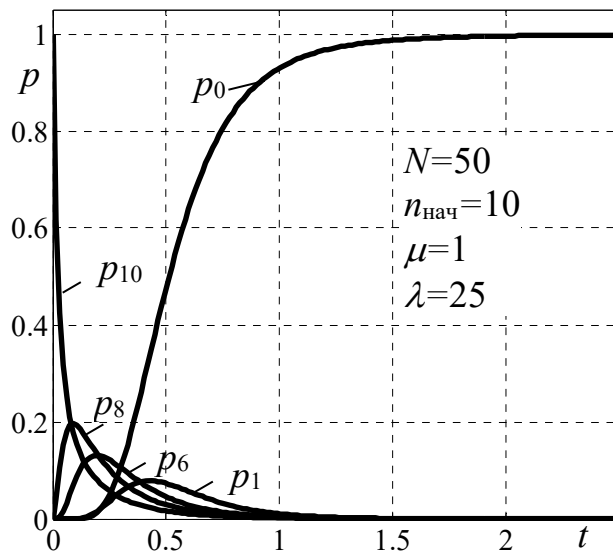


Рисунок 2.11 – Вырождение популяции при начальной численности $n_{\text{нач}} = 10$

Указанное обстоятельство учитывается на практике при восстановлении популяций, находящихся под угрозой исчезновения. Уникальным примером такого восстановления являются чатемские мухоловки (острова Новой Зеландии). Скорость накопления генофонда всего пяти сохранившихся мухоловок, обречённых на вымирание в естественной среде, но помещённых в стабильные, искусственно поддерживаемые благоприятные условия, оказалась достаточной для формирования полностью жизнеспособной популяции этих птиц из более чем 250 особей [27]. В естественных условиях существование малочисленных популяций также возможно, образуя так называемые эндемичные виды в ограниченных, как правило, географически изолированных ареалах с устойчивым и малоизменяемым составом экосистемы. Это наблюдение также подтверждает сделанный вывод о роли соотношения молекулярно-генетического многообразия и факторов среды обитания в эволюции видов.

Следует обратить внимание на важное, зачастую упускаемое из виду свойство эволюционного процесса, принципиально определяющее саму возможность накопления генетических альтернатив и, как следствие, возможность естественного отбора наиболее приспособленных из них. Это свойство заключается в дискретности наследуемых признаков [279], вытекающей, в свою очередь, из дискретности генетических структур. Р. Докинз в [93]

приходит к выводу о том, что именно дискретность форм гена определяет его высокую устойчивость – эволюционную «бессмертность». Свойство дискретности генетических структур в настоящее время обобщено до принципа блочно-модульной организации и эволюции молекулярно-генетических систем, согласно которому эволюция биологических образований любой степени сложности происходит в результате комбинирования уже существующих, устойчиво функционирующих блоков-модулей более низкого уровня сложности [107,254,256].

Таким образом, принцип модульности в построении и развитии биологических структур обеспечивает возникновение многоальтернативных форм живой материи, и является неотъемлемым свойством и условием эволюционного процесса.

2.3 Модели и механизмы многоальтернативности в эволюции экосистем

Рассмотрим стратегии многоальтернативности на уровне организации жизни, охватывающем множество совместно существующих популяций различных видов организмов – биоценозов, или, в более широком смысле, с учётом абиотических факторов – экосистем [228,235,236].

Исключительное внимание к эволюционным процессам на уровне экосистем объясняется наличием в большинстве из них, по выражению В.И. Вернадского [69], «нового геологического фактора» – человечества, активно изменяющего среду своего обитания, нарушая при этом естественное динамическое равновесие и разнообразие в биосообществах, т.е. нарушая процессы их эволюции [70]. Каноническими примерами нарушения устойчивости биосистем служат широко известные факты катастрофического для местной фауны и флоры роста численности кроликов, завезённых в XIX веке в Австралию, воробьёв – в Северную Америку, колорадского жука – в Европу [279,320,324]. Примечательно, что усилия по восстановлению нарушенного равновесия в

экосистеме давали результаты только после применения соответствующего «биологического оружия»: так, борьба за снижение численности кроликов привела к успеху только после внедрения в популяцию этих животных специфического паразита, сдерживающего их размножение. Нарушение экологического равновесия, вызванное в начале прошлого века активным уничтожением американского серого волка как опасного хищника, было устранено искусственной реинтродукцией (повторным заселением) волков в Йеллоустонский национальный парк под контролем экологов [27]. Последующие наблюдения за изменениями биосферы этого заповедника подтвердили правильность принятого решения [139]. Вытекающие из подобных фактов актуальность и необходимость сохранения разнообразия в экосистемах осознаны достаточно давно и зафиксированы в Конвенции о биологическом разнообразии, принятой ООН в 1992 году [341].

В отличие от молекулярно-генетического уровня, процессы эволюции в биосистемах реализуются не только механизмом конкуренции за ресурсы существования, но в результате более широкого спектра взаимодействий своих элементов: от совместной взаимопомощи – симбиоза – до отношений «хищник–жертва». Качественной особенностью этих отношений является появление в биоценозах биологически изолированных сообществ, образующих дополнительные трофические (пищевые) уровни системы – иерархическую структуру таксонов [279]. Общая схема взаимодействия трофических уровней, образующая замкнутый круговорот вещества и энергии в экосистеме, представлена на Рисунке 2.12 [103].

Как уже отмечалось, в рамках каждого трофического уровня борьба за пищевые и пространственные ресурсы приводит к разделению экологических ниш между конкурирующими видами – их специализации [279], причём виды, имеющие в текущих равновесных условиях низкую конкурентоспособность, не исчезают, а сохраняются в малых нишах как биологический резерв экосистемы [130,442].

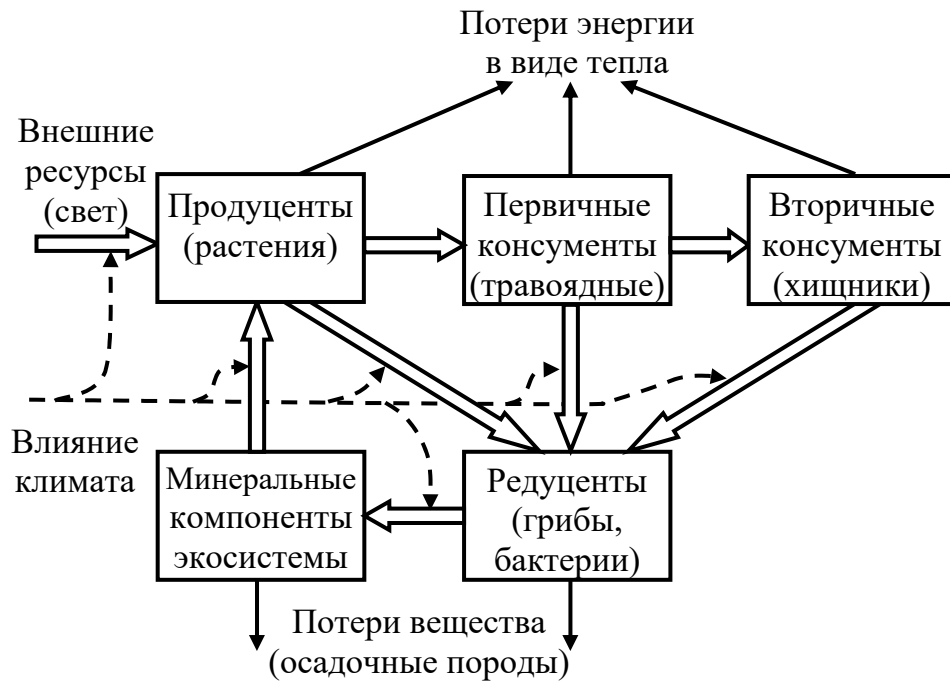


Рисунок 2.12 – Укрупнённая схема взаимодействия элементов экосистемы

Ограниченность ресурсов каждой из ниш играет роль естественного ограничения в накоплении общей биомассы экосистемы, однако не исключает возможности освоения новых экологических ниш, т.е. роста разнообразия компонентов экосистемы. В целом, устойчивое, сбалансированное развитие экосистемы характеризуется стремлением к наиболее полному освоению доступных энергетических ресурсов и в освоении новых ресурсов, например, в нишах с загрязнениями или экстремальными условиями. Иными словами, в периоды устойчивого развития разнообразие в экосистеме носит не вытесняющий, а аддитивный – накопительный характер с нарастающей дифференциацией (разделением) функций преобразования вещества и энергии [82].

В кризисах, вызванных изменением климата или деятельностью человека, в экосистеме происходит нарушение равновесия: ранее доминирующие виды утрачивают свою ведущую роль в круговороте веществ в экосистеме вплоть до вымирания, но равновесие в системе восстанавливают альтернативные виды из малых ниш, заполняя освободившиеся или вновь появившиеся ниши. В работе [13] приводится пример скачкообразного увеличения биомассы ранее

малочисленных солоноустойчивых двустворчатых моллюсков по мере высыхания Аральского моря и повышения его солёности. В результате общая биомасса грунтовых организмов, несмотря на исчезновение их пресноводных видов, была восстановлена. Характерно, что процесс освоения изменившейся среды обитания сопровождался быстрым образованием новых видов моллюсков. E.D. Core, указывая в [342] на рост многообразия таксонов экосистемы в кризисные периоды её существования, определяет это явление как общее эволюционное правило.

Наличие иерархической структуры экосистемы (трофической пирамиды) оказывает дополнительное многоуровневое регулирующее действие, которое можно рассматривать как внутренний стабилизирующий фактор, выработанный в результате эволюции биоценозов с целью сбалансированного развития всех своих компонентов и более полного использования и накопления (концентрации) поступающей извне энергии. Увеличение запасов энергии в системе способствует её стабилизации и прогрессивной эволюции [19].

В равновесном, точнее – сбалансированном состоянии экосистема может существовать сколь угодно долго, постепенно увеличивая объём концентрируемой в своём замкнутом контуре энергии путём освоения новых экологических ниш и наращивания числа трофических уровней, т.е. путём роста биоразнообразия [82,100,178,247].

Таким образом, процесс эволюции на уровне экосистемы может рассматриваться в виде чередующихся периодов стабильного, сбалансированного роста разнообразия и биомассы её компонентов с периодами существенного, кризисного изменения условий существования, во время которых сокращается разнообразие видов на всех уровнях экосистемы (в первую очередь на верхних уровнях трофической цепи). Возникающее, как следствие, ослабление конкуренции открывает возможность преимущественного развития ранее угнетённым или даже скрытым на генетическом уровне формам, появление которых обуславливает скачкообразное изменение состава всей трофической цепи, т.е. наиболее существенные эволюционные изменения в экосистеме.

Изложенное содержание основных принципов эволюции в экосистемах даёт возможность перейти к составлению математической модели, позволяющей исследовать влияние видового многообразия и иерархичности структуры на эволюционные процессы в экосистеме.

В качестве базовой теоретической предпосылки составления модели примем законы сохранения и круговорота вещества, перерабатываемого каждым элементом экосистемы [29,30,73,122,222,223,265]. Рассматриваемые потоки вещества в экосистеме представлены на Рисунке 2.13.

На Рисунке 2.13 обозначены:

x^0, x^1, x^2, x^3 – значения биомассы редуцентов, продуцентов и консументов первого и второго уровней соответственно (здесь и далее под биомассой подразумевается масса сухого вещества в кг/м², определяемая в конце очередного (текущего) годового интервала времени);

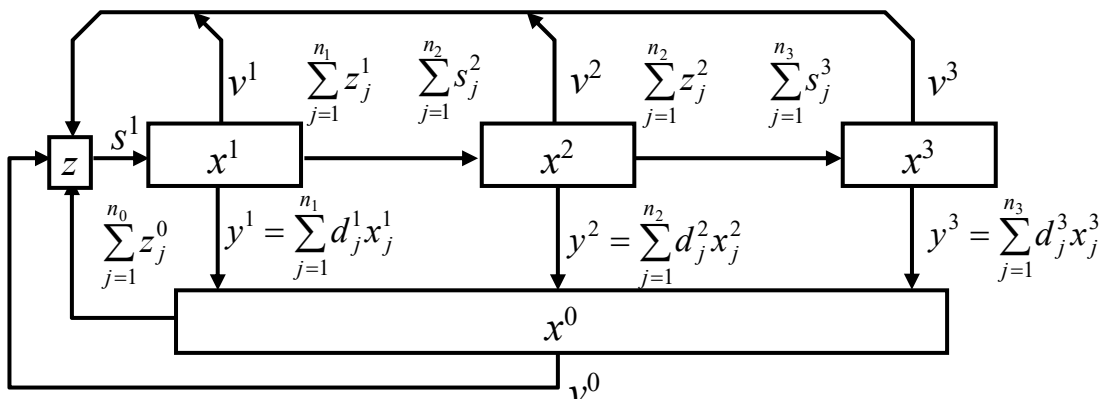


Рисунок 2.13 – Рассматриваемые потоки вещества в экологической системе

n_0, n_1, n_2, n_3 – число биологических видов, составляющих указанные элементы системы;

v^0, v^1, v^2, v^3 – годовой расход биомассы, эквивалентный затратам энергии на дыхание, выделение тепла или совершению работы для движения в элементах экосистемы, кг/(м²·год). Эти затраты полностью компенсируются энергией,

поступающей из внешней среды и, в силу этого, включены в замкнутый круговорот в виде эквивалентного вещества;

y^1, y^2, y^3 – биомасса продуктов выделения и естественного отмирания организмов в течение рассматриваемого года, кг/(м²·год);

z_j^i – биомасса вида $j, j = 1, \dots, n_i$, элемента i системы, $i = 0, \dots, 2$, отдаваемая за год всему очередному (последующему) элементу трофической цепи, кг/(м²·год);

z – масса накопленных минеральных (неорганических) компонентов экосистемы, которая может быть использована продуцентами, кг/м²;

s_j^i – биомасса, получаемая за год видом $j, j = 1, \dots, n_i$, элемента i системы, $i = 1, \dots, 3$, от всего элемента $(i-1)$, предшествующего по трофической цепи, кг/(м²·год).

С учётом принятых обозначений дифференциальные уравнения массового баланса в каждом элементе системы приобретают вид:

$$\dot{x}^0 = \sum_{i=1}^3 y^i - \sum_{j=1}^{n_0} v_j^0 - \sum_{j=1}^{n_0} z_j^0; \quad (2.13)$$

$$\dot{x}^1 = s^1 - \sum_{j=1}^{n_1} v_j^1 - \sum_{j=1}^{n_1} z_j^1 - y^1; \quad (2.14)$$

$$\dot{x}^2 = s^2 - \sum_{j=1}^{n_2} v_j^2 - \sum_{j=1}^{n_2} z_j^2 - y^2; \quad (2.15)$$

$$\dot{x}^3 = s^3 - \sum_{j=1}^{n_3} v_j^3 - y^3; \quad (2.16)$$

$$\dot{z} = \sum_{i=0}^3 v^i + \sum_{j=1}^{n_0} z_j^0 - s^1, \quad (2.17)$$

где $\dot{x}^i = \sum_{j=1}^{n_i} \dot{x}_j^i$, $i = 0, \dots, 3$, – годовой прирост биомассы элемента i экосистемы, кг/(м²·год);

\dot{z} – годовой прирост массы минеральных компонентов, кг/(м²·год).

Условия межэлементного баланса массы переносимого вещества:

$$\sum_{j=1}^{n_1} z_j^1 = \sum_{j=1}^{n_2} s_j^2; \quad (2.18)$$

$$\sum_{j=1}^{n_2} z_j^2 = \sum_{j=1}^{n_3} s_j^3. \quad (2.19)$$

Кроме того, годовое потребление продуцентов s^1 в числовом выражении не может превышать текущих запасов z минеральных компонентов системы:

$$(s^1) \leq z; \quad (2.20)$$

Составляющие модели экосистемы (2.13)–(2.20) определим следующими соотношениями.

Для продуцентов:

$$s^1 = \sum_{j=1}^{n_1} s_j^1; \quad (2.21)$$

$$s_j^1 = x_j^1 a_j^1 z_j - x_j^1 \sum_{i=1}^{n_1} b_{ij}^1 x_i^1; \quad (2.22)$$

$$z_j = z \cdot \frac{a_j^1}{\sum_{j=1}^{n_1} a_j^1}; \quad (2.23)$$

$$\sum_{j=1}^{n_1} z_j = z; \quad (2.24)$$

$$z_j^1 = x_j^1 \sum_{i=1}^{n_2} a_{ji}^{12} x_i^2 - \sum_{i=1}^{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} b_{ij}^2 x_i^2 x_j^2; \quad (2.25)$$

$$v_j^1 = c_j^1 x_j^1; \quad (2.26)$$

$$y_j^1 = d_j^1 x_j^1. \quad (2.27)$$

Здесь и далее обозначены:

a_j^1 – коэффициент, характеризующий относительную скорость потребления минеральных компонентов видом j элемента 1 системы, $\text{м}^2/(\text{кг} \cdot \text{год})$;

b_{ij}^k , $k = 0, \dots, 3$, – коэффициент влияния на прирост или потребление биомассы вида j межвидовой ($i \neq j$) и внутривидовой ($i = j$) конкуренции за пищевые или пространственные ресурсы в пределах элемента k системы, $\text{м}^2/(\text{кг} \cdot \text{год})$. Например, слагаемое $\left(-x_j^1 \sum_{i=1}^{n_1} b_{ij}^1 x_i^1\right)$ в (2.22) отражает снижение скорости прироста биомассы продуцента j вследствие конкуренции этого вида со всеми другими продуцентами видов i (включая и внутривидовую конкуренцию), а слагаемое $\left(-\sum_{i=1}^{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} b_{ij}^2 x_i^2 x_j^2\right)$ в (2.25) – снижение скорости потребления любого вида j продуцента консументом первого уровня вследствие конкуренции консументов;

z_j , $j = 1, \dots, n^1$, – масса минеральных компонентов, доступная для переработки виду j элемента 1 системы в течение рассматриваемого года, $\text{кг}/\text{м}^2$;

a_{ji}^{12} – коэффициент, характеризующий относительную скорость потребления вида j элемента 1 видом i элемента 2 системы, $\text{м}^2/(\text{кг} \cdot \text{год})$;

c_j^i , $i = 0, \dots, 3$, – коэффициент (относительная скорость) эквивалентных потерь биомассы на дыхание, выделение тепла или совершение работы видом j элемента i системы, $1/\text{год}$;

d_j^i , $i = 1, \dots, 3$, – коэффициент образования продуктов выделения и естественного отмирания организмов вида j элемента i системы, $1/\text{год}$.

Для консументов первого уровня:

$$s^2 = \sum_{j=1}^{n_2} s_j^2; \quad (2.28)$$

$$v_j^2 = c_j^2 x_j^2; \quad (2.29)$$

$$s_j^2 = x_j^2 \sum_{i=1}^{n_1} a_{ij}^{12} x_i^1 - x_j^2 \cdot n^1 \cdot \sum_{i=1}^{n_2} b_{ij}^2 x_i^2; \quad (2.30)$$

$$z_j^2 = x_j^2 \sum_{i=1}^{n_3} a_{ji}^{23} x_i^3 - \sum_{i=1}^{n_3} \sum_{j=1}^{n_3} b_{ij}^3 x_i^3 x_j^3; \quad (2.31)$$

$$y_j^2 = d_j^2 x_j^2, \quad (2.32)$$

где a_{ji}^{23} – коэффициент, характеризующий относительную скорость потребления вида j элемента 2 видом i элемента 3 системы, $\text{м}^2/(\text{кг}\cdot\text{год})$.

Аналогично для консументов второго уровня:

$$s^3 = \sum_{j=1}^{n_3} s_j^3; \quad (2.33)$$

$$v_j^3 = c_j^3 x_j^3; \quad (2.34)$$

$$s_j^3 = x_j^3 \sum_{i=1}^{n_2} a_{ij}^{23} x_i^2 - x_j^3 \cdot n^2 \cdot \sum_{i=1}^{n_3} b_{ij}^3 x_i^3; \quad (2.35)$$

$$y_j^3 = d_j^3 x_j^3. \quad (2.36)$$

Для редуцентов:

$$y_j = \sum_{i=1}^3 y^i \cdot \frac{\sum_{i=1}^3 a_{ij}^0}{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{n_0} a_{ij}^0}; \quad (2.37)$$

$$\sum_{i=1}^3 y^i = \sum_{j=1}^{n_0} y_j; \quad (2.38)$$

$$v_j^0 = c_j^0 x_j^0; \quad (2.39)$$

$$z_j^0 = x_j^0 \sum_{i=1}^3 a_{ij}^0 y^i - b_{jj}^0 x_j^0 x_j^0, \quad (2.40)$$

a_{ij}^0 , $i = 1, \dots, 3$, $j = 1, \dots, n^0$, – коэффициент, характеризующий относительную скорость переработки биомассы элемента i системы видом j редуцентов, $\text{м}^2/(\text{кг}\cdot\text{год})$;

y_j , $j = 1, \dots, n^0$, – биомасса продуктов выделения и естественного отмирания всех продуцентов и консументов, получаемая видом j редуцентов в течение рассматриваемого года, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$.

Отметим, что $b_{ij}^0|_{i \neq j} = 0$ принято в силу незначительной межвидовой конкуренции продуцентов, обусловленной узкой специализацией характера их питания и экологических ниш [28]. Кроме того, в z_j^0 неявно включена биомасса отмерших редуцентов, переработанная функционирующими редуцентами. Предполагается также, что биомасса y^1, y^2, y^3 продуктов выделения и естественного отмирания организмов полностью перерабатывается редуцентами, т.е. потери – неиспользованные органические компоненты в экосистеме – отсутствуют.

Численное исследование экосистемы по уравнениям (2.13)–(2.20) проводилось на имитационной модели, реализованной в среде MatLab. Общая структура этой модели представлена на Рисунке 2.14.

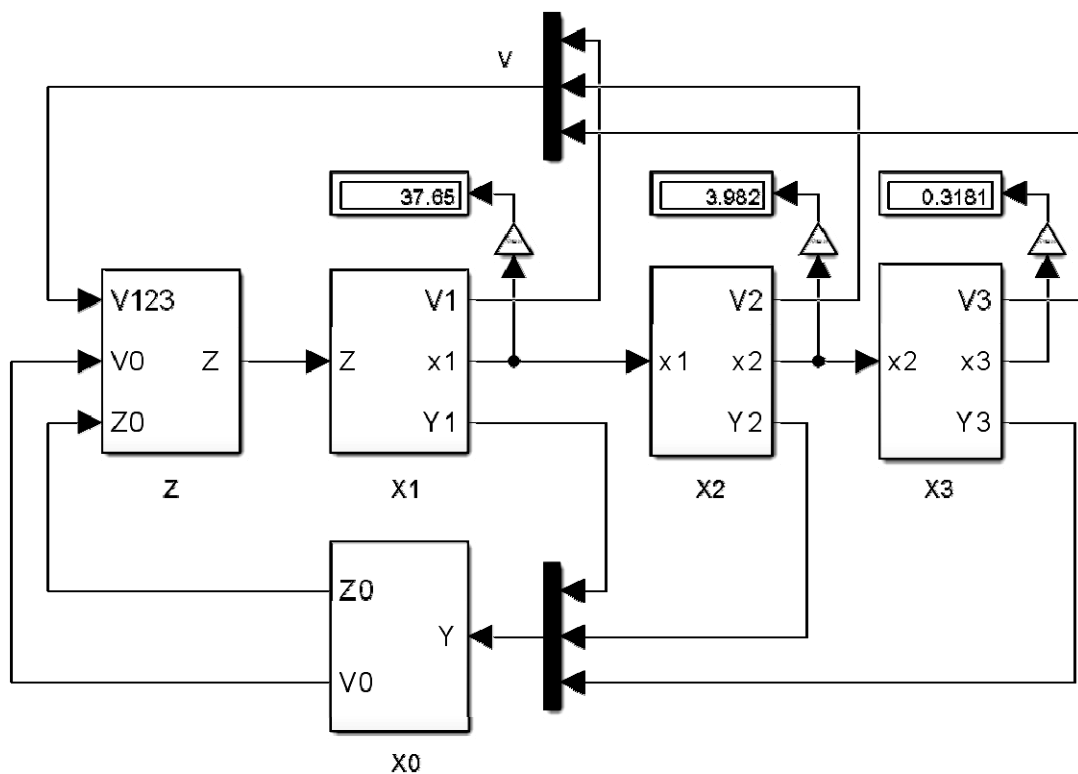


Рисунок 2.14 – Структурная схема имитационной модели замкнутой экологической системы

Для основных иерархических уровней экосистемы в её стационарном состоянии выбраны значения биомасс: $x^1 \approx 38 \text{ кг/м}^2$; $x^2 \approx 4 \text{ кг/м}^2$; $x^3 \approx 0,3 \text{ кг/м}^2$.

Начиная с момента $t = 300$ (Рисунки 2.15, 2.16) в систему, находящуюся в стационарном состоянии, начинает поступать поток внешней энергии (или эквивалентная масса неорганических компонентов) с интенсивностью $0,025$ кг за единицу времени. Общая биомасса всех компонентов системы начинает расти, однако при $t = 350$ в систему вводится критическое событие: из-за неблагоприятных условий среды на 40% снижается скорость поглощения третьим видом первичных консументов биомассы третьего вида продуцентов, т.е. уменьшается коэффициент a_{33}^{12} : при $t > 350$ третий столбец матрицы

$$a_{j3}^{12} = 10^{-3} \cdot [39,5 \quad 30,3 \quad 32,9]^T$$

становится равным

$$a_{j3}^{12} = 10^{-3} \cdot [39,5 \quad 30,3 \quad 20,4]^T.$$

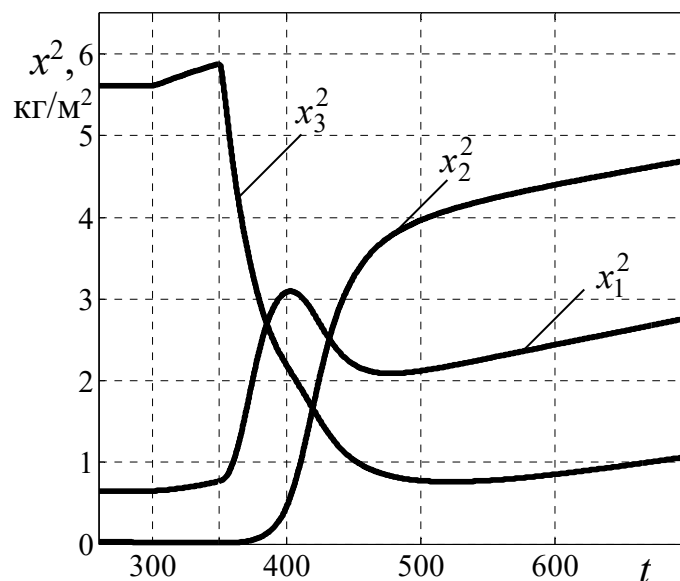


Рисунок 2.15 – Реакция двухуровневой ($x^3 = 0$) экосистемы на критическое событие для третьего вида консументов x_3^2

Реакция экосистемы на это событие для её усечённого варианта с двумя уровнями иерархии x^1 и x^2 ($x^3 = 0$ – вторичные консументы отсутствуют) показана на Рисунке 2.15 для биомассы x^2 . Исходное соотношение биомасс видов x_j^2 , которое до момента $t < 350$ характеризовалось доминирующим положением вида

x_3^2 и угнетённым состоянием x_2^2 , изменилось: вызванное внешними причинами снижение биомассы x_3^2 третьего вида компенсируется ростом биомасс x_1^2 , x_2^2 первого и второго видов этого уровня системы. После колебательного переходного процесса длительностью около 150 единиц времени скорость роста общей биомассы системы восстанавливается. Характерно, что в новых условиях ранее угнетённый второй вид x_2^2 этого уровня системы стал занимать значимую долю в переработке биомассы, т.е. в результате критического события в функционирование экосистемы включились все имеющиеся три вида первичных консументов.

Исследование роли иерархического строения системы при наступлении в них критических событий проводилось на полном варианте экосистемы (введён третий уровень: консументы–хищники) при сохранении неизменными всех параметров элементов двухуровневой системы. Реакция трёхуровневой системы на снижение x_3^2 показана на Рисунке 2.16 и существенно отличается от предшествующего случая, показанного на Рисунке 2.15.

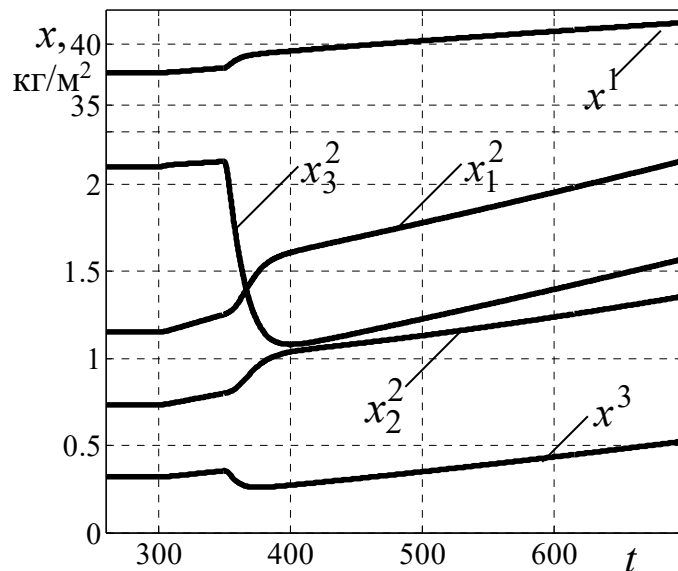


Рисунок 2.16 – Реакция трёхуровневой экосистемы на критическое событие для третьего вида консументов x_3^2

В первую очередь следует отметить, что в исходном, стационарном состоянии трёхуровневой экосистемы ($t < 300$) уже не наблюдается существенного различия биомасс x_3^2 и x_1^2 третьего и первого видов первичных консументов. Это свидетельствует о том, что, несмотря на относительно небольшую биомассу x^3 третьего уровня (примерно 10% от биомассы x^2 второго уровня), существование вторичных консументов смягчило конкуренцию на предшествующем иерархическом уровне, и все три вида первичных консументов стали сопоставимыми по своей значимости в круговороте вещества.

Стабилизирующее влияние третьего уровня иерархии проявилось также при наступлении критического события ($t = 350$): переходный процесс приобрёл монотонный характер и завершился значительно быстрее – за 50 единиц времени (см. Рисунок 2.16). Для более полной оценки эволюционной роли видовой многообразия и иерархического строения экосистем рассмотрим фазовые траектории поведения системы в координатах x_1^2 и x_2^2 , т.е. в плоскости биомасс первого и второго видов первичных консументов, Рисунок 2.17.

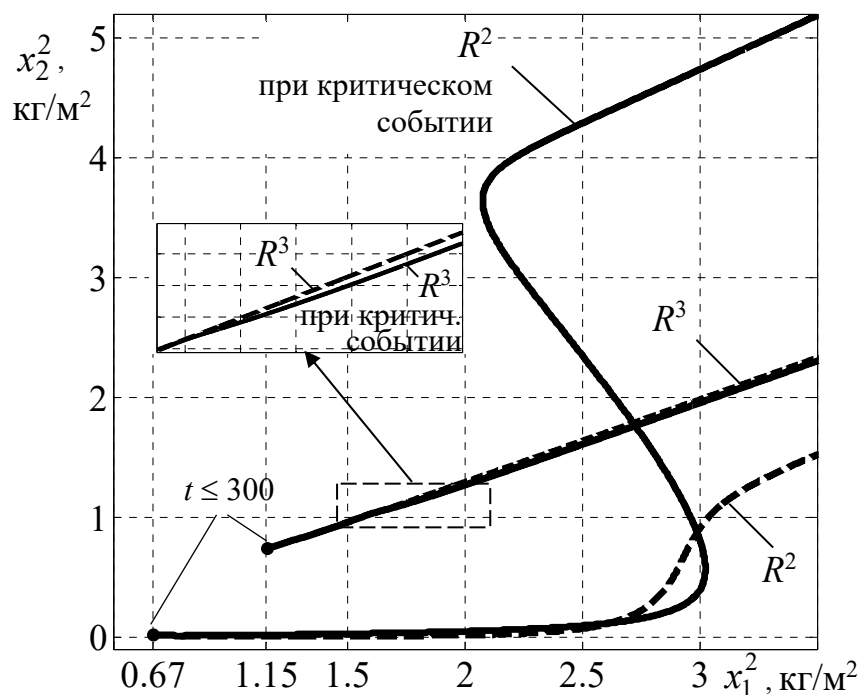


Рисунок 2.17 – Траектории развития экосистемы с двумя (R^2) и тремя (R^3) уровнями иерархии

Анализ Рисунка 1.17 показывает, что во всех режимах функционирования система стремится выйти на некоторую сбалансированную (линейную) траекторию своего развития, характеризующуюся постоянством таких пропорций между биомассами видов, которые обеспечивают максимальное усвоение поступающих в экосистему ресурсов (во всех рассмотренных выше режимах система после завершения переходных процессов полностью поглощает поступающий поток внешней энергии (вещества) со скоростью, равной скорости поступления).

Штриховым линиям на Рисунке 2.17 соответствуют траектории роста биомасс x_1^2 и x_2^2 после начала поступления внешней энергии ($t > 300$) без последующего введения в систему описанного выше критического события. В двухуровневой системе траектория R^2 содержит достаточно протяжённый участок переходного процесса, в течение которого соотношение биомасс x_1^2 и x_2^2 приобретает новое установившееся значение (угол наклона R^2); в варианте с тремя уровнями иерархии система практически без переходного процесса начинает двигаться по траектории R^3 сбалансированного развития.

Сплошными линиями на Рисунке 2.17 показана реакция экосистемы на критическое событие (снижение скорости поглощения третьим видом первичных консументов биомассы третьего вида продуцентов). Переход траектории R^3 двухуровневой системы на новый участок сбалансированного роста носит ярко выраженный колебательный характер с существенным изменением абсолютных значений биомасс x_1^2 и x_2^2 . В экосистеме с тремя уровнями иерархии траектория R^3 изменилась незначительно, т.е. в многоуровневой экосистеме качество удержания системы на траектории сбалансированного роста существенно выше.

Таким образом, многообразие видов и развитое иерархическое строение экологической системы обеспечивают благоприятные условия для её развития – эволюции: многообразие видов за счёт перераспределения их биомасс выводит систему на траекторию сбалансированного роста, а наличие иерархической

структуры в результате влияния межуровневых обратных связей значительно ускоряет этот процесс и делает его монотонным.

Выводы по главе 2

1. Изложенный анализ кибернетических моделей эволюционного поведения самоорганизующихся систем позволил установить, что в основе этого поведения лежит общая системообразующая стратегия – стратегия многоальтернативности.

2. 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.

3. 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.

4. Эволюционные процессы в крупных экосистемах принципиально осуществимы только в многоуровневой иерархической структуре системы при наличии многообразия видов с дифференцированными приспособительными 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.

5. Полученный в результате эволюционного подхода вывод о необходимости иерархической структуры сложной системы, многообразия и

разделения её функций совпадает с результатами теоретико-игрового анализа функционирования активных организационных систем, изложенными в [38,39, 169,171,394] и сформулированными в виде принципа рациональной централизации. В частности, в [151] аргументировано доказывается, что с ростом нестабильности внешней среды число уровней иерархии организационной системы следует увеличивать.

Основные материалы данной главы изложены в работах [222,223,228,229,235, 236,243].

ГЛАВА 3. МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ С КРИТИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ

В главе приведены примеры синтеза многоальтернативного управления объектами с критическими режимами в классе наиболее распространённых систем, процессы в которых описываются моделями и алгоритмами с полностью определёнными – детерминированными параметрами и взаимосвязями.

3.1 Многоканальные системы с переменной структурой

Хронологически первыми и ставшие уже каноническими примерами системам с многоальтернативным управлением являются системы с переменной структурой [98].

Самые простые системы с переменной структурой являются преимущественно двухальтернативными: положительная либо отрицательная обратная связь; основное либо резервное управляющее воздействие; один из двух динамических каналов управления, один из двух режимов работы (разгон-торможение) и т. п.. Такие системы рассмотрены в главе 1.

В технологических процессах с несколькими режимами функционирования может оказаться целесообразным использование не только альтернативных алгоритмов регулирования, но и введение нескольких независимых каналов управления.

В качестве примера многоальтернативного режима с несколькими каналами управления рассмотрим алгоритм управления многоэтапным процессом тепловлажностной обработки бетонных изделий [55,224,417].

Процесс обработки изделий происходит в пропарочных камерах, где изделия постепенно нагреваются до заданной температуры $T_{из}$, при достигнутой температуре и требуемой влажности выдерживаются (изотермический режим) и

затем постепенно охлаждаются, Рисунок 3.1. Типовой режим тепловлажностной обработки содержит этапы:

- нагревание камеры с изделиями – 3 часа;
- изотермическое выдерживание – 6 часов;
- остывание перед распалубкой – 4 часа.

Нарушение режим тепловлажностной обработки приводит к недопустимому снижению прочности бетонных изделий, т.е. к браку всей партии этих изделий, загруженной в камеру. Обеспечение требуемого температурно-временного графика $T_{обр}(t)$ обработки возлагается на систему автоматического управления процессом, использующую, как правило, релейный способ регулирования: если текущая температура $T(t)$ в камере ниже допустимой границы $T(t) < T_{обр}(t) - \varepsilon$ (ε – допустимое отклонение текущей температуры $T(t)$ от требуемой $T_{обр}(t)$), то клапан подачи пара в камеру открывается; если $T(t) > T_{обр}(t) + \varepsilon$, то клапан закрывается, и подача пара прекращается.

Тепловая мощность релейного управления $W_{очн}(t)$ одинакова на всех этапах обработки бетона.

Такой одноканальный способ управления характеризуется двумя существенными недостатками, Рисунок 2.6:

- наличие достаточно больших интервалов времени, в течение которых фактическая температура выходит за пределы допустимого диапазона $T_{обр}(t) \pm \varepsilon$;
- малое значение периода переключений паровых клапанов. При длительной тепловлажностной обработке изделий (свыше 12 часов) ресурс паровых клапанов по числу переключений быстро исчерпывается, и возникает необходимость их частой замены с неизбежными перерывами в работе камер и дополнительными финансовыми затратами [180, 272].

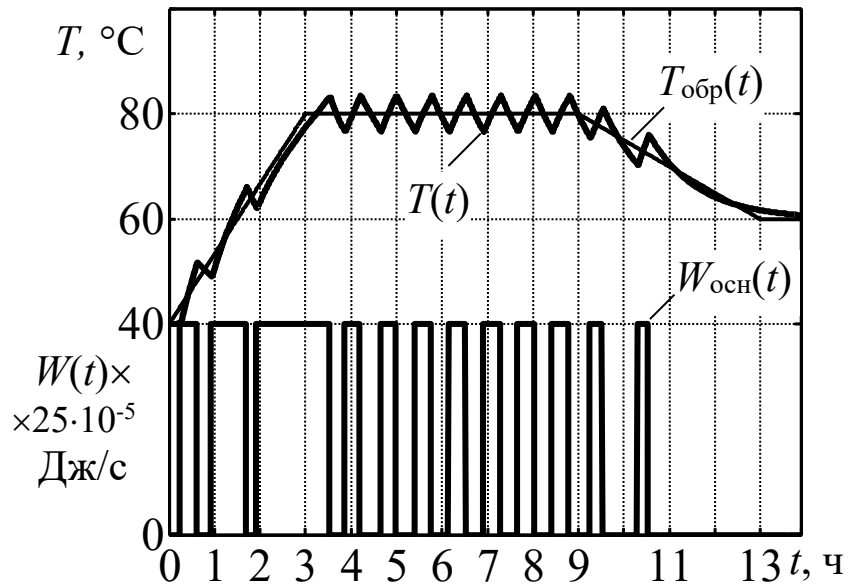


Рисунок 3.1 – Процесс регулирования с одним каналом $W_{\text{осн}}(t)$

Каждый этап обработки бетона характеризуется существенно отличающимися потребностями в тепловой мощности, подаваемой в камеру:

- наибольшая мощность $W_{\text{осн}}(t)$ нужна, главным образом, при первоначально нагреве камеры с изделиями;
- на этапе изотермического выдерживания мощность $W_{\text{осн}}(t)$ является избыточной и целесообразно использование дополнительного канала с малой мощностью $W_{\text{доп}}(t)$, которым также можно управлять по релейному закону;
- на всех этапах обработки присутствуют потери теплоты $W_{\text{пт}}$ во внешнюю среду, которые можно компенсировать путём непрерывной подачи в камеру некоторого количества теплоты с мощностью $W_{\text{пост}}$.

На Рисунках 3.2-3.7 последовательно изображены результаты работы следующих вариантов системы:

- система с основным $W_{\text{осн}}(t)$ и нерегулируемым дополнительным каналом $W_{\text{пост}}$, Рисунок 3.2;
- система с основным $W_{\text{осн}}(t)$ и двумя дополнительными каналами $W_{\text{пост}}$ и $W_{\text{доп}}(t)$, Рисунок 3.3;

– система с основным $W_{\text{осн}}(t)$ и двумя дополнительными каналами $W_{\text{пост}}$ и $W_{\text{доп}}(t)$, причём требуемая линейная временная зависимость нагрева заменена на плавную S-образную кривую, Рисунок 3.4.

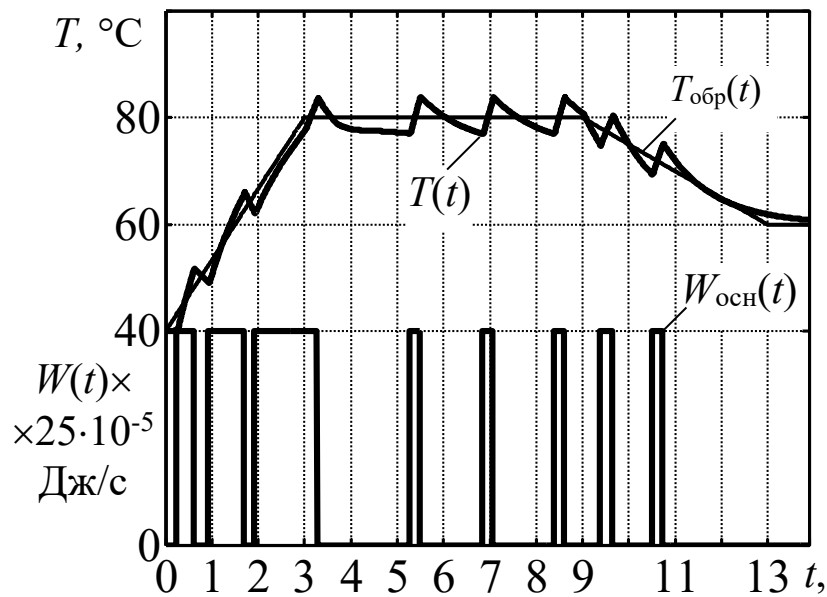


Рисунок 3.2 – Процесс управления в системе с основным каналом $W_{\text{осн}}(t)$ и нерегулируемым дополнительным каналом $W_{\text{пост}}$

Во всех рассматриваемых вариантах алгоритмов управления постоянный поток теплоты с мощностью $W_{\text{пост}}$ вводился в систему в режиме изотермического выдерживания; число переключений парового клапана этого канала принималось равным двум и учитывалось при сравнении вариантов в общем числе переключений дополнительных каналов.

Мощность $W_{\text{пост}}$ дополнительного нерегулируемого канала составляет около 70% мощности тепловых потерь $W_{\text{пт}}$, не идущих на нагревание изделий, или 35% мощности основного канала управления камерой, а мощность $W_{\text{доп}}(t)$ дополнительного регулируемого канала – около 20% тепловых потерь или 10% мощности основного канала.

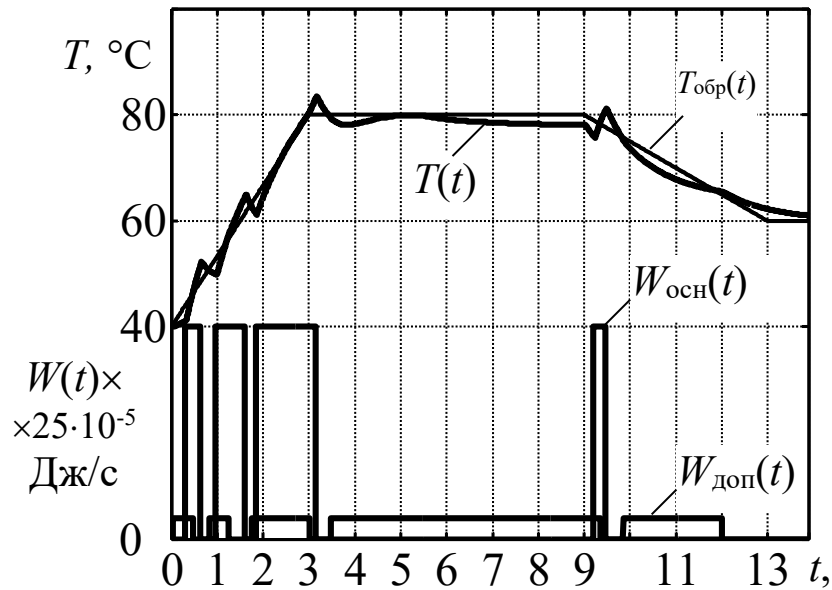


Рисунок 3.3 – Процесс регулирования в системе с основным каналом $W_{\text{осн}}(t)$ и двумя дополнительными каналами $W_{\text{пост}}$ и $W_{\text{доп}}(t)$

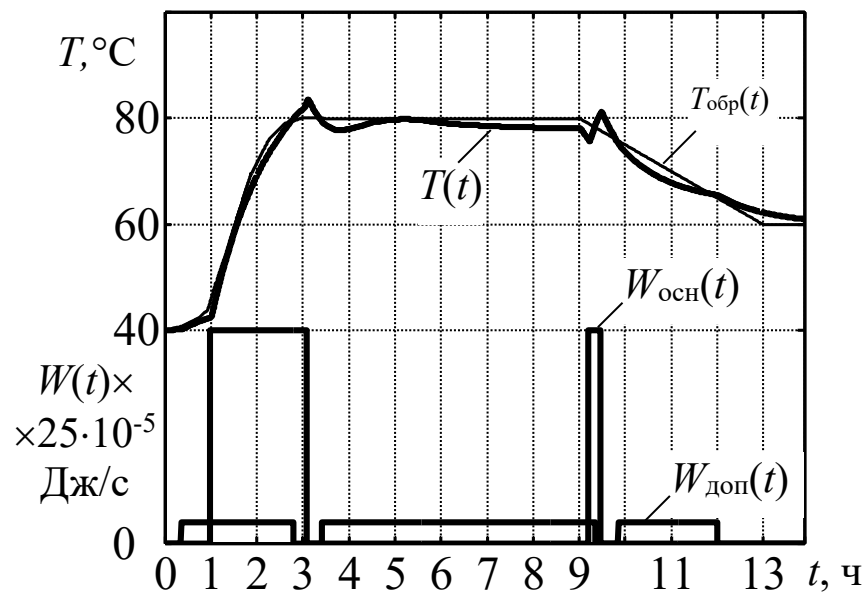


Рисунок 3.4 – Процесс регулирования в системе с основным каналом $W_{\text{осн}}(t)$, двумя дополнительными каналами $W_{\text{пост}}$ и $W_{\text{доп}}(t)$, и S -образным участком $T_{\text{обр}}(t)$ в режиме нагревания

Сравнительные характеристики вариантов управления приведены в Таблице 3.1 и свидетельствуют о наибольшем преимуществе совместного регулирования всеми тремя каналами, когда число переключений наиболее

мощного, основного канала снижается по сравнению с исходной системой в 3 раза, а общее число переключений паровых клапанов во всех трёх каналах меньше, чем в исходном варианте с одним основным управлением $W_{\text{осн}}(t)$.

Таблица 3.1 – Характеристики различных вариантов структуры управления процессом тепловлажностной обработки бетонных изделий

№	Вариант структуры	Число переключений клапанов на этапах обработки							
		Основной клапан			Дополнительные клапаны			Всего	
		Нагревание	Выдерживание	Остывание	Нагревание	Выдерживание	Остывание	Основной клапан	Дополнительные клапаны
1	$W_{\text{осн}}(t)$	6	14	4	-	-	-	24	-
2	$W_{\text{осн}}(t), W_{\text{пост}}$	6	6	4	0	2	0	16	2
3	$W_{\text{осн}}(t), W_{\text{пост}}, W_{\text{доп}}(t)$	6	0	2	6	4	2	8	12
4	$W_{\text{осн}}(t), W_{\text{пост}}, W_{\text{доп}}(t), T_{\text{обр}}(t) \sim S(t)$	2	0	2	2	4	2	4	8

Полученное в четвёртом варианте управления общее количество переключений клапанов является наименьшим и снижено вдвое по сравнению с одноканальным управлением, причём самый мощный клапан вместо 24 раз переключается всего 4 раза (Рисунок 3.4, строка 4 Таблицы 3.1). Следует отметить, что с увеличением числа каналов управления ошибка регулирования (отклонение $T(t)$ от $T_{\text{обр}}(t)$ на Рисунках 3.1-3.4) также заметно снижается.

Пример перехода к многоканальному управлению приведён также в [185].

3.2 Системы модального управления нестационарными объектами

При синтезе систем модального управления нестационарными объектами возникает необходимость решения ряда задач, связанных с построением наблюдателей координат состояния объекта и расчётом собственно регулятора, обеспечивающего требуемые показатели качества системы при вариациях параметров объекта. В том случае, если нестационарный объект управления характеризуется существованием критических режимов функционирования, требования к обеспечению робастности системы управления существенно возрастают.

Покажем, каким образом указанные задачи решаются на основе многоальтернативного принципа разделения и специализации функций, существо которого вытекает из его названия: обеспечение отдельных показателей качества системы управления объектом целесообразно осуществлять независимыми средствами и алгоритмами, синтез которых вследствие такого разделения будет существенно упрощаться.

3.2.1 Адаптивные наблюдатели с разделением движения

Распространённые в настоящее время алгоритмы и методы модального регулирования предполагают наличие оценок координат состояния объектов, в том числе и тех координат, которые недоступны непосредственному измерению [154,156]. Получение этих оценок осуществляется с помощью наблюдателей [156], наиболее востребованным свойством которых является свойство адаптации к нестационарным параметрам объекта, т.е. способность наблюдателей выполнять свои функции в условиях априорно неизвестных значений этих параметров.

Обеспечение указанного свойства возможно, например, путём введения в наблюдатель дополнительных, протекающих в реальном масштабе времени процедур адаптации. В работе [46] такая процедура основана на непрерывной

идентификации (подстройке) параметров наблюдателя в направлении градиента функции невязки $\theta(t) = [y(t) - \hat{y}(t)]^2$:

$$\frac{d h_i}{d t} = -\gamma_i \frac{\partial \theta(t)}{\partial h_i}, \quad (3.1)$$

где $y(t), \hat{y}(t)$ – выходная координата объекта и её оценка соответственно; γ_i – настраиваемый коэффициент алгоритма адаптации.

Недостатком этого способа является обязательное наличие в системе возбуждающего воздействия – рабочего, или специально формируемого – амплитуда гармоник которого достаточно велика для осуществления идентификации.

Рассмотрим путь обеспечения грубости наблюдателя к нестационарным параметрам объекта, не требующий пробных воздействий и основанный на введении в наблюдатель скользящих движений отдельно по каждой оцениваемой координате [47,48,286]. Свойство грубости обеспечивается принципиальной независимостью этих движений от параметров объекта.

Пусть одно из уравнений описания объекта в нормальной форме Коши имеет вид $\dot{x}_1 = x_2$, где $x_1 = y$ – доступная измерению координата, или

$$\dot{y} = x_2. \quad (3.2)$$

Тогда, формируя по этому уравнению структуру наблюдателя Калмана с разрывным управлением (Рисунок 3.5), получим:

$$\dot{\hat{y}} = \hat{x}_2 + M \operatorname{sign}(y - \hat{y}). \quad (3.3)$$

Перейдя к уравнениям относительно невязок $\varepsilon_1 = y - \hat{y}$, $\varepsilon_2 = x_2 - \hat{x}_2$, вычтем (3.3) из (3.2):

$$\dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon_2 - M \operatorname{sign} \varepsilon_1. \quad (3.4)$$

Из уравнения (3.4) следует, что при некотором, достаточно большом значении M при любых ε_2 будет обеспечено условие скольжения $\varepsilon_1 \cdot \dot{\varepsilon}_1 < 0$ в окрестностях точки $\varepsilon_1 = 0$ и $\dot{\varepsilon}_1 = 0$. Отсюда вытекает равенство [286]:

$$0 \approx \varepsilon_2 - (M \operatorname{sign} \varepsilon_1)_{\text{эКВ}}. \quad (3.5)$$

и, далее,

$$\varepsilon_2 = v_{1,\text{ЭКВ}}, \quad (3.6)$$

где $v_{1,\text{ЭКВ}}$ – непрерывное управление, эквивалентное разрывному $v_1 = M \operatorname{sign} \varepsilon_1$ и получаемое на выходе инерционного звена с постоянной времени τ .

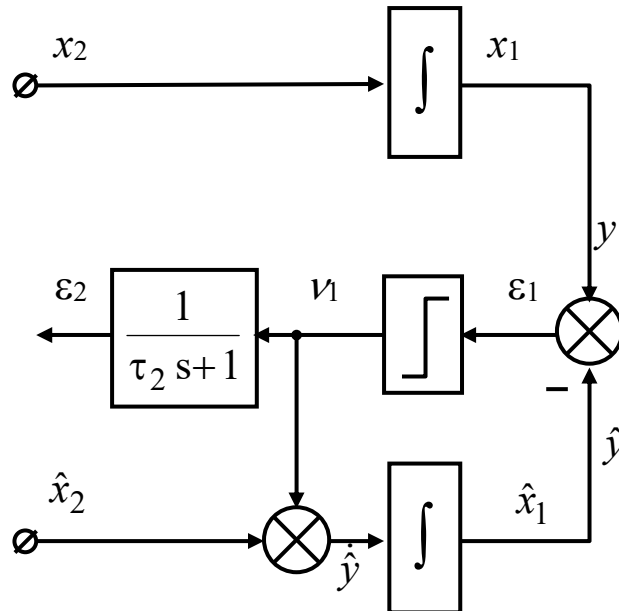


Рисунок 3.5 – Фрагмент наблюдателя со скользящим движением одной координаты

Экспериментальное исследование справедливости соотношения (3.5) проведено на модели Рисунка 3.5, которая представляет собою следящую систему с астатизмом первого порядка относительно \hat{x}_2 , входом y , выходом \hat{y} и разрывным управлением $v_1 = M \operatorname{sign}(y - \hat{y})$. Воздействие \hat{x}_2 исполняет роль возмущающего воздействия, т.е., в принятых обозначениях, $\hat{x}_2 = \varepsilon_2$, что и подтверждается Рисунком 3.6.

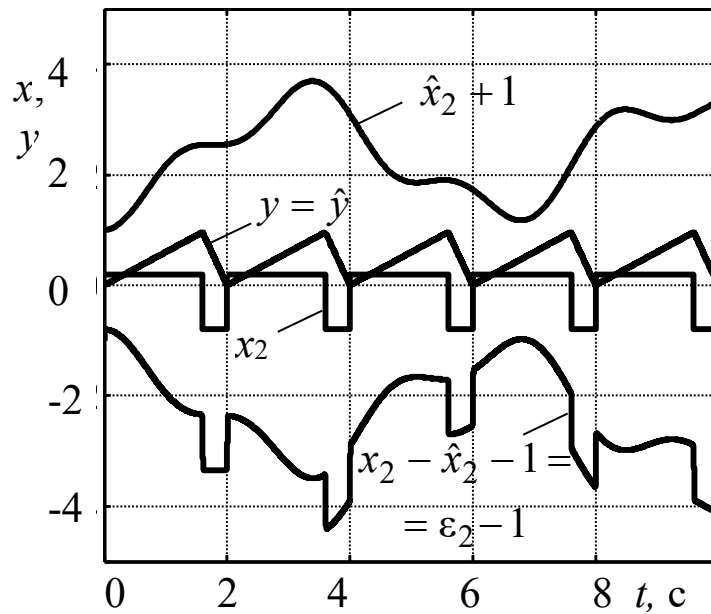


Рисунок 3.6 – Экспериментальное подтверждение равенства (3.5)

Учитывая, что в структуре наблюдателя $\varepsilon_2 = x_2 - \hat{x}_2$, получаем, что эквивалентное управляющее воздействие $v_{1,\text{экв}}$ может быть использовано для последующего формирования разрывного управления $v_2 = M \text{sign } v_{1,\text{экв}}$, обеспечивающего скользящее движение в окрестностях точки $\varepsilon_2 = 0$ и $\dot{\varepsilon}_2 = 0$. Поскольку параметры скользящего движения относительно \hat{x}_1 и \hat{x}_2 при выполнении условия существования скольжения определяются только параметрами соответствующего релейного управления как функции ошибок ε_1 и ε_2 , то появляется возможность построения наблюдателя, в котором реализуются независимые скользящие движения по каждой координате, при этом в процессе наблюдения каждой координаты x_i определяется ошибка наблюдения координаты x_{i+1} , взаимосвязь между которыми имеет вид $\varepsilon_1 \rightarrow 0 \Rightarrow \varepsilon_2 \rightarrow 0 \Rightarrow \dots \Rightarrow \varepsilon_i \rightarrow 0 \Rightarrow \varepsilon_{i+1} \rightarrow 0 \dots$, где знак \Rightarrow обозначает импликативную связь достаточности [131].

Ограничимся для наглядности выкладок объектом третьего порядка, описанным в форме Фробениуса:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2; \\
\dot{x}_2 &= x_3; \\
\dot{x}_3 &= -b_{31}x_1 - b_{32}x_2 - b_{33}x_3 + n_3u; \\
y &= x_1,
\end{aligned} \tag{3.7}$$

где x – координаты состояния $x \in \mathbf{R}^3$; u – управление; b , n – элементы соответствующих матриц.

Заменяя x_1 доступной измерению координатой y и переходя к аналогичной структуре наблюдателя Калмана:

$$\begin{aligned}
\hat{y} &= \hat{x}_2; \\
\dot{\hat{x}}_2 &= \hat{x}_3; \\
\dot{\hat{x}}_3 &= -b_{31}\hat{y} - b_{32}\hat{x}_2 - b_{33}\hat{x}_3 + n_3u,
\end{aligned} \tag{3.8}$$

введём ошибки $\varepsilon_1 = y - \hat{y}$, $\varepsilon_2 = x_2 - \hat{x}_2$, $\varepsilon_3 = x_3 - \hat{x}_3$ и, соответственно (3.3),

рывные управления $k_1M \operatorname{sign}\varepsilon_1$, $k_2M \operatorname{sign}\varepsilon_2$, $k_3M \operatorname{sign}\varepsilon_3$, где вектор $K=[k_1 \ k_2 \ k_3]$

определяется из условия возникновения скольжения $\varepsilon_i \cdot \dot{\varepsilon}_i < 0$. В результате получится система уравнений, описывающая синтезируемый наблюдатель:

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{y}} &= \hat{x}_2 + k_1M \operatorname{sign}(y - \hat{y}); \\
\dot{\hat{x}}_2 &= \hat{x}_3 + k_2M \operatorname{sign}\varepsilon_2; \\
\dot{\hat{x}}_3 &= -b_{31}\hat{y} - b_{32}\hat{x}_2 - b_{33}\hat{x}_3 + k_3M \operatorname{sign}\varepsilon_3 + k_4 \int M \operatorname{sign}\varepsilon_4 dt; \\
\dot{\varepsilon}_2 &= (k_1M \operatorname{sign}(y - \hat{y}) - \varepsilon_2)/\tau_2; \\
\dot{\varepsilon}_3 &= (k_2M \operatorname{sign}\varepsilon_2 - \varepsilon_3)/\tau_3; \\
\dot{\varepsilon}_4 &= (k_3M \operatorname{sign}\varepsilon_3 - \varepsilon_4)/\tau_4,
\end{aligned} \tag{3.9}$$

где слагаемое $k_4 \int M \operatorname{sign}\varepsilon_4 dt$ введено для создания нелинейной подсистемы, обеспечивающей второй порядок астатизма величины ε_3 относительно внешних возмущений, обусловленных неидеальностью физической реализации каскадов наблюдателя.

Структурная схема наблюдателя, соответствующая (3.9), представлена на Рисунке 3.7.

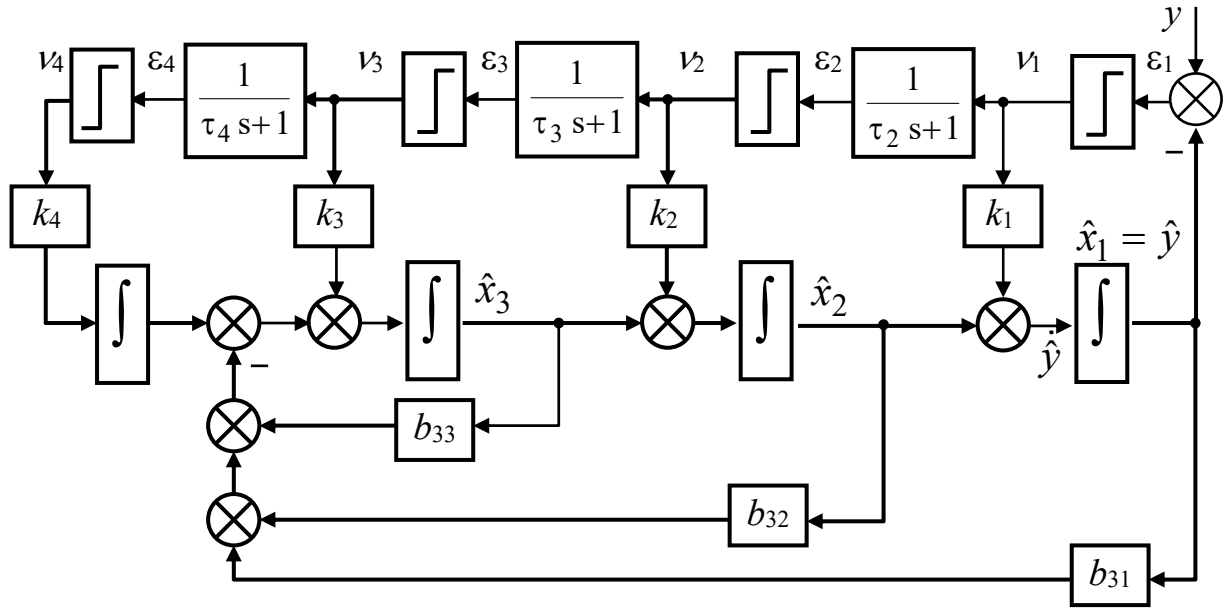


Рисунок 3.7 – Структурная схема адаптивного наблюдателя
с разделением движений

Для проверки свойств адаптации наблюдателя, построенного по структуре Рисунка 3.7 с $M = 4$; $k_1 = 0,1$; $k_2 = 0,2$; $k_3 = 0,04$; $k_4 = 0,2$; $\tau_2 = 0,05$; $\tau_3 = 0,05$; $\tau_4 = 0,001$ и $\delta = \pm 0,0001$, выбран объект с параметрами $b_{31} = 30$; $b_{32} = 20$; $b_{33} = 6 \dots 40$; $n_3 = 1$.

В качестве базового варианта для сравнения использовался типовой наблюдатель Луенбергера пониженного порядка:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}} = & (B_{22} - K_L B_{12})\hat{z} + (N_2 - K_L N_1)u + \\ & + (B_{21} - K_L B_{11})y + K_L \dot{y}, \end{aligned} \quad (3.10)$$

в котором

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -30 & -20 & -6 \end{bmatrix};$$

$$N = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad z = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_3 \end{bmatrix},$$

характеристический полином $|pE - B_{22} + K_L B_{12}| = (p + 6)^2$, E – единичная матрица; $K_L = [6 \ -20]^T$. Результаты наблюдения при максимальном значении b_{33} показаны на Рисунках 3.8-3.10.

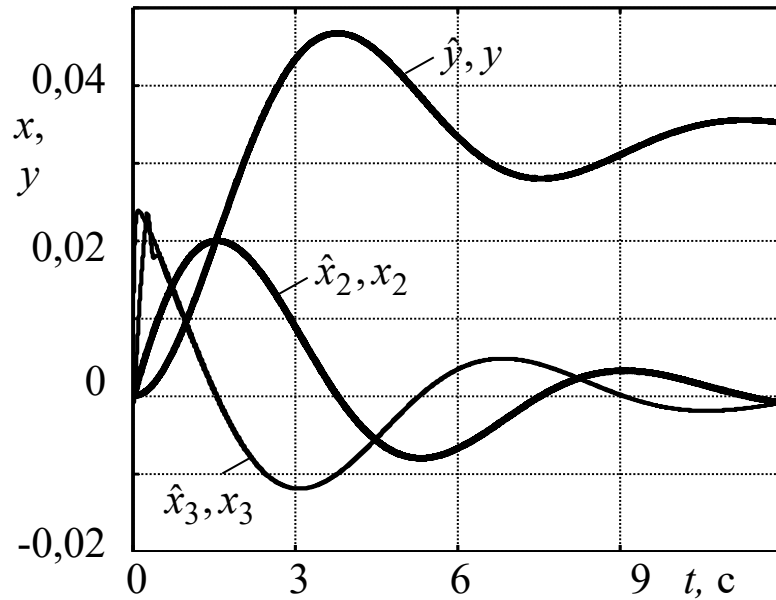


Рисунок 3.8 – Результаты наблюдения координат состояния

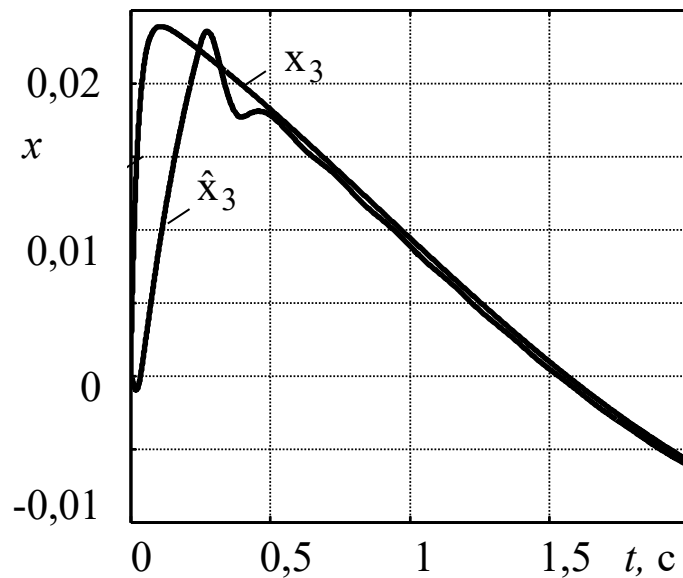


Рисунок 3.9 – Фрагмент результатов наблюдения из Рисунка 3.8

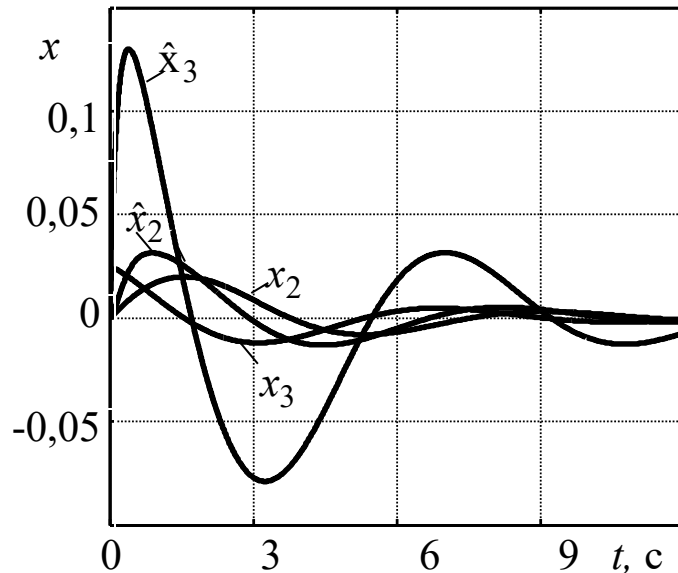


Рисунок 3.10 – Результаты наблюдения в схеме Луенбергера без адаптации

Сравнение результатов наблюдения для объекта с параметром $b_{33}=40$, представленных на Рисунках 3.8, 3.9 и 3.10 показывает очевидные преимущества адаптивного наблюдателя с разделением движений по сравнению с классической схемой, в которой ошибка наблюдения x_2 составляет около 50%, а координаты x_3 – примерно 400% для амплитудных значений.

3.2.2 Робастные системы модального управления

Перейдём теперь к приёмам реализации принципа разделения функций на примере синтеза робастной системы модального управления.

Рассмотрим управляемый динамический процесс, описываемый системой дифференциальных уравнений [239,428]:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Bx(t) + Nu(t); \\ y(t) &= Ax(t), \end{aligned} \quad (3.11)$$

где $x(t)=[x(t)_1 \dots x(t)_n]^T$ – n -мерный вектор состояния процесса; $u(t)$, $y(t)$ – управление и выходная координата; B , N , A – характеристическая матрица, матрицы управления и выхода соответственно.

В общем случае собственные числа p_i исходной характеристической матрицы B , т.е. корни многочлена

$$|pE-B| = p^n + b_{n-1}p^{n-1} + \dots + b_1p + b_0,$$

не обеспечивают требуемого качества процесса, и возникает задача синтеза управления в виде

$$u(t) = g(t) - Rx(t), \quad (3.12)$$

содержащем известное задающее воздействие на систему $g(t)$ и модальный регулятор $R=[r_1 \dots r_n]$, параметры r_i которого подлежат определению.

В результате подстановки (3.12) в (3.11) получим характеристический полином системы $|pE-B+NR|$, поэлементное приравнивание которого к эталонному полиному $C(p)$ с желаемым расположением корней:

$$|pE-B+NR| = p^n + c_{n-1}p^{n-1} + \dots + c_1p + c_0, \quad (3.13)$$

($E = \text{diag}(1 \dots 1)$; $c_n=1$) приведёт к системе из n уравнений с n неизвестными r_i . Решение этой системы уравнений суть искомые параметры r_i регулятора, обеспечивающие требуемое качество управления процессом.

Изложенная выше краткая постановка задачи модального управления опирается на фундаментальный принцип обратной связи по состоянию, давший начало самостоятельному разделу в современной теории управления [154], однако широкому внедрению его результатов в практику препятствует высокая чувствительность получаемого решения к вариациям ΔB матрицы B , неизбежно возникающим из-за неточности определения истинных параметров управляемого процесса или в силу его принципиальной нестационарности.

Аналитически указанное обстоятельство подтверждается очевидным неравенством

$$|pE-B+NR| \neq |pE-(B+\Delta B)+NR|,$$

а также появлением аддитивных составляющих Δb_{ij} в радиусах ρ_i областей Гершгорина [12,301], локализующих собственные значения λ_i характеристической матрицы $|pE-(B+\Delta B)+NR|$ синтезированной системы:

$$G_i(B + \Delta B - NR) = \{z \in \mathbb{C} \mid |z - (b_{ii} + \Delta b_{ii} - n_i r_i)| \leq \rho_i\};$$

$$\rho_i = \sum_{j=1; j \neq i}^n |b_{ij} + \Delta b_{ij} - n_i r_j|;$$

$$\lambda_i \in \bigcup_{j=1}^n G_j(B + \Delta B - NR); \quad i = \overline{1, n}.$$
(3.14)

Для наглядной иллюстрации чувствительности λ_i к вариациям ΔB воспользуемся корневым годографом, построенным для числового примера.

Пример 1.

Пусть имеется дифференциальное уравнение структурно неустойчивого процесса:

$$3y(t)^{(3)} + 19y(t)^{(2)} + 32y(t) = 12u(t), \quad (3.15)$$

с полюсами $p_1 = -6,58$; $p_{2,3} = 0,12 \pm 1,27j$, и зададимся желаемым расположением этих полюсов: $\lambda_1^* = \lambda_2^* = \lambda_3^* = -5$. Перепишав (3.15) в пространстве состояний (3.11) с матрицами:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -32/3 & 0 & -19/3 \end{bmatrix} \quad \text{и} \quad N = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 4 \end{bmatrix},$$

придём к уравнению

$$|pE - B + NR| = (p+5)^3,$$

решение которого позволяет найти параметры модального регулятора $R = [28,58 \quad 18,75 \quad 2,17]$, обеспечивающего заданные значения λ_i^* .

В сформированном желаемом характеристическом полиноме $|pE - (B + \Delta B) + NR|$ вариации ΔB осуществлялись для коэффициента $b_n = 3$ введением множителя $a = 0,5 \dots 2$, т.е. изменением b_n в диапазоне $b_n = 1,5 \dots 6$. Траектория положения λ_i в комплексной плоскости z с указанными значениями a представлена на Рисунке 3.11 и свидетельствует о значительных отклонениях фактических λ_i от заданных значений. В частности, значение радиуса локализации комплексных корней в указанном диапазоне b_n составляет $\rho_{k1} = 5,54$.

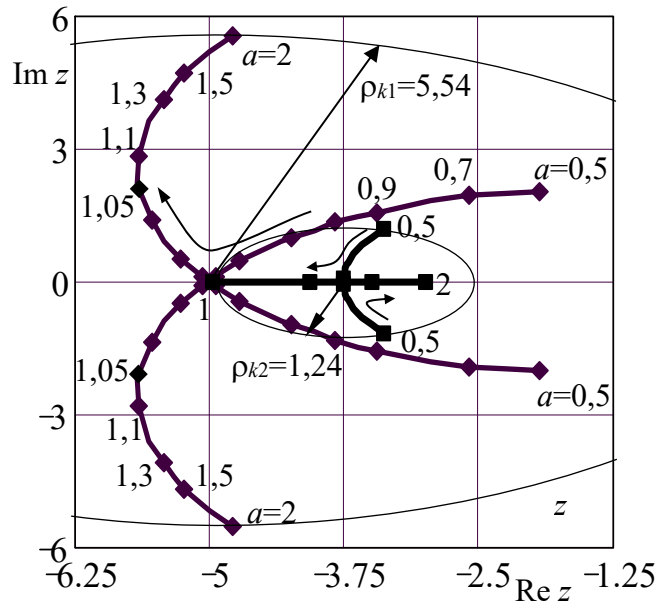


Рисунок 3.11 – Корневые годографы с обычным (3.13) и робастным (3.23) регуляторами: \blacklozenge $\rho_{k1}=5,54$; \blacksquare $\rho_{k2}=1,24$

Таким образом, модальный регулятор, синтезированный без учёта нестационарности параметров объекта в общем случае не обладает свойствами робастности и не поддерживает заданное расположение корней характеристического полинома.

Способ синтеза робастного модального регулятора основан на представлении модели (3.11) в форме Фробениуса:

$$B = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{E}_{n-1} \\ -\mathbf{b} & \end{bmatrix}, \quad (3.16)$$

где $\mathbf{b} = [b_0 \dots b_{n-1}]$; и матрица управления $N = [0 \dots 0 \ 1]^T$.

Переход к аналогичному описанию синтезируемой системы с модальным регулятором

$$B - NR = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{E}_{n-1} \\ -(\mathbf{b} + R) & \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

указывает на возможность представления желаемого полинома $C(p)$ в виде

$$p^n + (b_{n-1} + r_n)p^{n-1} + \dots + (b_1 + r_2)p + b_0 + r_1,$$

из которого вытекают расчётные выражения для параметров регулятора

$$r_{i+1} = c_i - b_i, \quad i = \overline{0, n-1}$$

и для относительной вариации δb параметров процесса:

$$\delta b_i = \frac{\Delta b_i}{b_i + r_{i+1}}; \quad i = \overline{0, n-1}. \quad (3.18)$$

Соотношение (3.18) даёт возможность реализовать простейший способ обеспечения робастности модального управления выбором

$$|r_{i+1}| \gg b_i; \quad i = \overline{0, n-1}, \quad (3.19)$$

где для определённости можно принять $|r_{i+1}| \geq d \cdot b_i$; $d = 5 \dots 10$.

В теоретическом плане такой подход к решению поставленной задачи может быть отнесён к пассивной параметрической адаптации модального регулятора с неявной эталонной моделью, в качестве которой выступает желаемый полином $C(p)$.

Непосредственно вытекающая из (3.13) и (3.19) задача синтеза регулятора

$$\begin{aligned} |pE - B + NR| &= C(p); \\ |r_{i+1}| &\geq d \cdot b_i, \end{aligned} \quad (3.20)$$

не может быть решена в силу того, что входящее в неё условие (3.13) имеет единственное решение, в общем случае не отвечающее (3.19).

Для обеспечения совместности системы (3.13) и (3.19) воспользуемся принципом разделения функций, и выделим из желаемых полюсов $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ некоторую часть $k < n$ доминирующих корней $\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_k^*$, определяющих динамические свойства объекта. Тогда оставшиеся $n - k$ полюсов останутся свободными и могут быть использованы для выполнения дополнительного условия (3.19).

Влияние свободных корней на $y(t)$ следует исключить введением условия достаточной их удалённости от доминирующих корней:

$$\operatorname{Re}(\lambda_j) \leq d \cdot \min[\operatorname{Re}(\lambda_i)]; \quad i = \overline{1, k}; \quad j = \overline{k+1, n}.$$

Представим характеристический полином $C(p)$ как функцию параметров регулятора $C(p, R)$:

$$|pE - B + NR| = p^n + \varphi_{n-1}(R)p^{n-1} + \dots + \varphi_1(R)p + \varphi_0(R),$$

и выразим его коэффициенты $\varphi_s(R)$ через собственные числа λ_i :

$$\varphi_s(R) = c_s(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n); \quad s = \overline{0, n-1}.$$

Теперь изложенные выше требования и условия задачи синтеза робастного модального регулятора примут вид:

$$\begin{cases} \varphi_s(R) = c_s(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n); & s = \overline{0, n-1}; \\ \lambda_i = \lambda_i^*; & i = \overline{1, k}; \\ |r_{\ell+1}| \geq d \cdot b_\ell; & \ell = \overline{0, n-1}; \\ \operatorname{Re}(\lambda_j) \leq d \cdot \min[\operatorname{Re}(\lambda_i)]; & j = \overline{k+1, n}, \end{cases} \quad (3.21)$$

содержащий $2n-k$ неизвестных, n уравнений и $2n-k$ неравенств, которые могут быть выполнены неединственным образом. Из этого следует, что вместе с условиями (3.21) в рассматриваемую обычную алгебраическую задачу можно ввести некоторый критерий качества регулятора R и сформулировать соответствующую задачу математического программирования, доставляющую экстремум выбранному критерию.

В качестве такого критерия J может быть предложено среднее квадратическое отклонение параметров r_i регулятора от их среднегеометрического значения $\Omega = \sqrt[n]{r_1 \cdot r_2 \cdot \dots \cdot r_n}$, нормированного по квадрату Ω :

$$J = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \Omega)^2}{\Omega^2} \rightarrow \min. \quad (3.22)$$

Физический смысл этого критерия заключается в стремлении сократить диапазон числовых значений r_i , $i = \overline{1, n}$, нередко достигающий нескольких порядков.

Отметим, что если в задаче (3.13) матрица управления имеет вид $N = [0 \dots 0 \ \eta_n]^T$, то в (3.21) условие грубости следует переписать в форме:

$$|\eta_n \cdot r_{\ell+1}| \geq d \cdot b_\ell, \quad \ell = \overline{0, n-1}.$$

Рассмотрим пример решения задачи (3.21) с учётом (3.22).

Пример 2.

Воспользуемся исходными параметрами процесса из примера 1:

$$\mathbf{b} = [32/3 \ 0 \ 19/3]; \quad N = [0 \ 0 \ 4]^T;$$

и сформируем задачу (3.21), (3.22) для желаемого расположения корней $\lambda_1^* = \lambda_2^* = -3,75$ в виде (3.23).

$$\left\{ \begin{array}{l} J = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \Omega)^2}{\Omega^2} \rightarrow \min; \quad \Omega = \sqrt[3]{r_1 \cdot r_2 \cdot r_3}; \\ 32/3 + 4r_1 = -\lambda_1^* \lambda_2^* \lambda_3; \quad 4r_2 = \lambda_1^* \lambda_2^* + \lambda_1^* \lambda_3 + \lambda_2^* \lambda_3; \\ 19/3 + 4r_3 = -\lambda_1^* - \lambda_2^* - \lambda_3; \quad \lambda_1^* = \lambda_2^* = -3,75; \\ |4r_1| \geq 10 \cdot 32/3; \quad 4r_2 > 0; \\ |4r_3| \geq 10 \cdot 19/3; \\ \operatorname{Re}(\lambda_3) \leq 10 \cdot \operatorname{Re}(\lambda_1^*). \end{array} \right. \quad (3.23)$$

Решение

$$R = [215,9 \ 120,1 \ 15,83];$$

$$\lambda_1^* = \lambda_2^* = -3,75; \quad \lambda_3 = -62,17,$$

удовлетворяет системе (3.23) и обеспечивает монотонный характер переходной характеристики $y(t)$ и время регулирования $t_p = 1,28$ с, полученные в примере 1.

Появление свойств робастности синтезированного регулятора с разделением функций по сравнению с примером 1 количественно подтверждается уменьшением радиуса локализации комплексных корней с $\rho_{k1} = 5,54$ до $\rho_{k2} = 1,24$ (Рисунок 3.11).

Отметим, что на практике в некоторых случаях при выборе значения d может обнаружиться проблема плохой обусловленности характеристического полинома, и возникнет дополнительная задача его регуляризации.

С задачей регуляризации полиномов можно познакомиться в работах [54,191]. В частности в [191] указывается, что частой причиной плохой обусловленности полиномов является наличие у них кратных корней. Применительно к синтезу модального регулятора это означает, что при выборе системы доминирующих корней $\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_k^*$ следует избегать их совпадения или близкого расположения на комплексной плоскости.

Выше было показано, что при синтезе робастного модального регулятора целесообразно воспользоваться описанием объекта в координатах пространства состояний, образующих характеристическую матрицу Фробениуса (3.16).

Однако такая система координат $x = [x_1 \dots x_n]^T$ в общем случае не имеет физического содержания, и возникает дополнительная задача получения вектора x координат состояния на основе только двух доступных физическому измерению величин $u(t)$ и $y(t)$. Эта задача является задачей построения наблюдателя координат x .

Покажем, что указанная задача также решается на основе принципа разделения функций, и попутно рассмотрим некоторые важные особенности использования неадаптивных наблюдателей в нестационарных системах.

Из вида матрицы A следует, что величина $y(t)$ не совпадает ни с одной координатой состояния, и необходимо построить наблюдатель полного порядка [125]:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= K_H \hat{x}(t) + N_H u(t) + Q(y(t) - \hat{y}(t)); \\ \hat{y}(t) &= A_H \hat{x}(t), \end{aligned} \quad (3.24)$$

в котором $\hat{x}(t)$ и $\hat{y}(t)$ наблюдаемые величины; Q – матрица ошибок размером $[n \times 1]$, подлежащая определению; K_n, N_n, A_n – матрицы, элементы которых равны элементам соответствующих матриц K, N, A нестационарного объекта (3.11) при некотором принятом номинальном значении его параметров.

Переходя к изображениям по Лапласу из (3.24) получим уравнение движения наблюдателя:

$$\hat{x}(s) = (sE - K_n + QA_n)^{-1} N_n u(s) + (sE - K_n + QA_n)^{-1} Qy(s), \quad (3.25)$$

с характеристическим полиномом

$$|sE - K_n + QA_n| = V(s). \quad (3.26)$$

Полином $V(s)$ содержит элементы q_0, q_1, \dots, q_n матрицы Q . Это обстоятельство позволяет найти q_0, q_1, \dots, q_n путём почленного приравнивания $V(s)$ к типовому, например, биномиальному полиному n -го порядка $V(s) = (s - \Omega_{ob})^n$, в котором полюсы Ω_n наблюдателя выбираются из соотношения:

$$\Omega_n \gg \sqrt[n]{|\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_n|}. \quad (3.27)$$

Неравенство (3.27) обеспечивает малую ошибку наблюдения истинных координат x в условиях нестационарности параметров объекта, т.е. в условиях вариаций элементов матриц K, N и A , в отличие от неизменяемых матриц K_n, N_n, A_n , входящих в уравнение движения наблюдателя. Как будет показано в числовом примере, значение Ω_n приходится выбирать значительно больше среднегеометрического корня объекта, т.е. строить наблюдатель с высоким быстродействием.

При цифровой реализации таких наблюдателей на контроллерах могут возникнуть аппаратные ограничения [17], и от грубых наблюдателей с условием (3.27) следует переходить к более гибким – адаптивным наблюдателям.

Остановимся теперь на том обстоятельстве, что введение наблюдателя в структуру системы управления вносит в неё дополнительные нули и полюсы.

Действительно, переписав уравнения (3.11) и (3.24) движения объекта и наблюдателя в виде единой системы, на вход которой поступает управляющее воздействие $u(t)$:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Kx(t) + Nu(t); \\ y(t) = Ax(t), \\ \dot{\hat{x}}(t) = K_H \hat{x}(t) + N_H u(t) + Q(y(t) - \hat{y}(t)); \\ \hat{y}(t) = A_H \hat{x}(t), \end{cases} \quad (3.28)$$

или

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\hat{x}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & 0 \\ QA & K_H - QA_H \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ \hat{x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N \\ N_H \end{bmatrix} \cdot u(t), \quad (3.29)$$

получим характеристический полином системы в виде:

$$\left| \begin{array}{c|c} sE - K & 0 \\ \hline -QA & sE - K_H + QA_H \end{array} \right| = |sE - K| \cdot |sE - K_H + QA_H|, \quad (3.30)$$

указывающем на то, что в системе множество полюсов объекта объединяется с множеством полюсов наблюдателя. При этом характеристические полиномы объекта и наблюдателя не содержат общих элементов, т.е. выполняется теорема о разделении собственных значений характеристических матриц объекта и наблюдателя, и размещение полюсов наблюдателя при его синтезе не влияет на значения полюсов объекта [3,329] Из этого вытекает, что синтез модального регулятора может осуществляться по условию (3.20) независимо от наблюдателя [136].

Для определения нулей системы (3.29) перейдем к изображениям по Лапласу вектора координат $\hat{x}(t)$, воспользовавшись для этого уравнением (3.25) и очевидным равенством $y(s) = A(sE - K)^{-1}Nu(s)$:

$$\hat{x}(s) = (sE - K_H + QA_H)^{-1}N_H u(s) + (sE - K_H + QA_H)^{-1}QA(sE - K)^{-1}Nu(s), \quad (3.31)$$

или:

$$\hat{x}(s) = (sE - K_H + QA_H)^{-1} \left[N_H + QA(sE - K)^{-1} N \right] u(s). \quad (3.32)$$

Первоначально примем, что матрицы наблюдателя равны соответствующим матрицам объекта, т.е. $K_H = K$, $N_H = N$, $A_H = A$. Тогда:

$$\hat{x}(s) = (sE - K + QA)^{-1} \left[N + QA(sE - K)^{-1} N \right] u(s), \quad (3.33)$$

и общая передаточная матрица $W_{об,н}(s)$ объекта с наблюдателем, связывающая управляющее воздействие $u(s)$ с вектором $\hat{x}(s)$ наблюдаемых координат получит вид:

$$W_{об,н}(s) = (sE - K + QA)^{-1} \left[E + QA(sE - K)^{-1} \right] N. \quad (3.34)$$

Для дальнейшего преобразования выражения (3.34) введём обозначения $sE - K = C$, $QA = D$.

Перепишем (3.34) с учётом обозначений:

$$W_{об,н}(s) = \left[(C + D)^{-1} + (C + D)^{-1} DC^{-1} \right] \cdot N, \quad (3.35)$$

и для слагаемого $(C + D)^{-1}$ применим тождество Вудбери [362]:

$$(C + D)^{-1} = C^{-1} - (C + D)^{-1} DC^{-1}. \quad (3.36)$$

После подстановки (3.36) в (3.35) имеем:

$$\begin{aligned} W_{об,н} &= \left[(C + D)^{-1} + (C + D)^{-1} DC^{-1} \right] \cdot N = \\ &= \left[C^{-1} - (C + D)^{-1} DC^{-1} + (C + D)^{-1} DC^{-1} \right] \cdot N = C^{-1} N. \end{aligned} \quad (3.37)$$

В результате получаем:

$$W_{об,н}(s) = (sE - K)^{-1} N, \quad (3.38)$$

т.е. при $K_n = K$, $N_n = N$, $A_n = A$ передаточная матрица $W_{об,н}(s)$ объекта с наблюдателем совпадает с соответствующей передаточной матрицей собственно объекта $W_n(s) = (sE - K)^{-1} N$.

Отсюда следует, что в идеальном случае, при равенстве матриц $K_n = K$, $N_n = N$, $A_n = A$ наблюдателя и объекта, нули наблюдателя совпадают с его полюсами, и компенсируются [282].

В реальности, в первую очередь из-за нестационарности объекта, указанные матрицы не равны, и нули, вносимые в систему наблюдателем, отличаются от его полюсов, но могут оставаться близкими к ним.

При выборе полюсов наблюдателя по условию (3.27) заметного влияния нулей наблюдателя на поведение системы, как правило, не возникает, однако в ходе синтеза необходима проверка этого влияния во всём диапазоне нестационарности параметров объекта. Покажем это на числовом примере.

Пример 3.

Пусть объект описывается передаточной функцией $W_{об}(s)$ с нестационарной частотой p резонансных колебаний, которые по условиям эксплуатации этого объекта принимаются недопустимыми, и должны быть подавлены:

$$W_{об}(s) = \frac{0.2(s + 0.2 + 400j)(s + 0.2 - 400j)}{(s + 0.5 + pj)(s + 0.5 - pj)(s + 100)}. \quad (3.39)$$

Объект содержит комплексные нули $s_{1,2} = -0.2 \pm 400j$, занимающие доминирующее положение на комплексной плоскости s . Значение среднегеометрического корня объекта: $\Omega_{об} = 34,2 \text{ с}^{-1}$.

Амплитудные $L(\omega)$ и фазовые $\varphi(\omega)$ частотные характеристики демонстрируют ярко выраженные колебательные свойства объекта для диапазона $p = [6 \dots 20 \dots 60] \text{ с}^{-1}$, Рисунок 3.12.

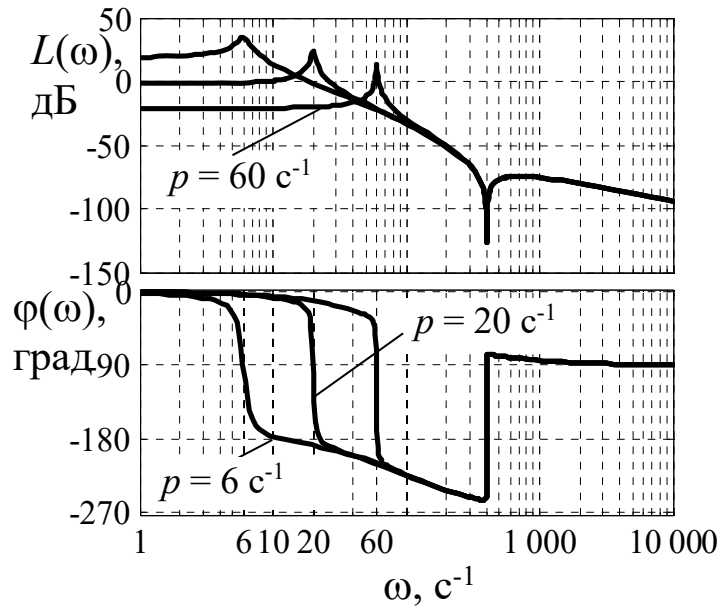


Рисунок 3.12 – Логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики объекта

Синтез модального регулятора в постановке (3.21) проводился со значениями: $\lambda_1 = -20 \text{ c}^{-1}$, $\lambda_2 = -100 \text{ c}^{-1}$, $d = 5$, где λ_1 и λ_2 выбраны по частотам сопряжения объекта (3.39) для $p = 20 \text{ c}^{-1}$, см. Рисунок 3.12. Полученные коэффициенты модального регулятора: $R = [1133975 \quad 71939,75 \quad 606]$ обеспечили для этого значения p систему полюсов: $\lambda_1 = -20 \text{ c}^{-1}$, $\lambda_2 = -100 \text{ c}^{-1}$, $\lambda_3 = -587 \text{ c}^{-1}$. Грубость системы полюсов при изменении p в диапазоне $p = [6 \dots 60] \text{ c}^{-1}$ подтверждается Таблицей 3.2.

Таблица 3.2 – Анализ чувствительности полюсов объекта с модальным регулятором при изменении частоты p резонанса

$p, \text{ c}^{-1}$	$\lambda_1, \text{ c}^{-1}$	$\lambda_2, \text{ c}^{-1}$	$\lambda_3, \text{ c}^{-1}$
6	-19,4	-100	-587,6
20	-20,0	-100	-587,0
60	-25,7	-100	-581,3

Из Таблицы 3.2 следует, что во всём диапазоне изменения частоты p резонанса полюсы системы с модальным регулятором остаются вещественными, т.е. колебательные составляющие в собственном движении объекта отсутствуют (область Гершгорина в данном случае представляет собою отрезок вещественной оси комплексной плоскости корней).

Синтез наблюдателя (3.25) проводился с выбранными значениями полюсов $\Omega_{об} = \Omega_{об} = \Omega_{об} = 10\Omega_{об} = -342 \text{ с}^{-1}$. Получены значения матрицы ошибок: $Q = [0,026 \quad 8,32 \quad 398,4]$. Значения нулей и полюсов, вносимых наблюдателем в систему в диапазоне $p = [6 \dots 60] \text{ с}^{-1}$ даны в Таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Анализ чувствительности нулей и полюсов, вносимых в систему наблюдателем при изменении частоты p резонанса

$p, \text{ с}^{-1}$	Нули, с^{-1}			Полюсы, с^{-1}
6	$-318+36j$	$-318-36j$	-389	$-342,$
20	-342	-342	-342	$-342, -342$
60	$-382+90j$	$-382-90j$	-262	

Таблица 3.3 показывает, что нули, вносимые в систему наблюдателем во всём диапазоне $p = [6 \dots 60] \text{ с}^{-1}$, располагаются достаточно далеко от доминирующего полюса системы $\lambda_1 = -20 \text{ с}^{-1}$, и близки к собственным полюсам наблюдателя $\Omega_{н1,2,3} = -342 \text{ с}^{-1}$.

Частотные характеристики объекта с наблюдателем и модальным регулятором показаны на Рисунке 3.13 и подтверждают отсутствие у него резонансных свойств в рассматриваемом диапазоне нестационарности p .

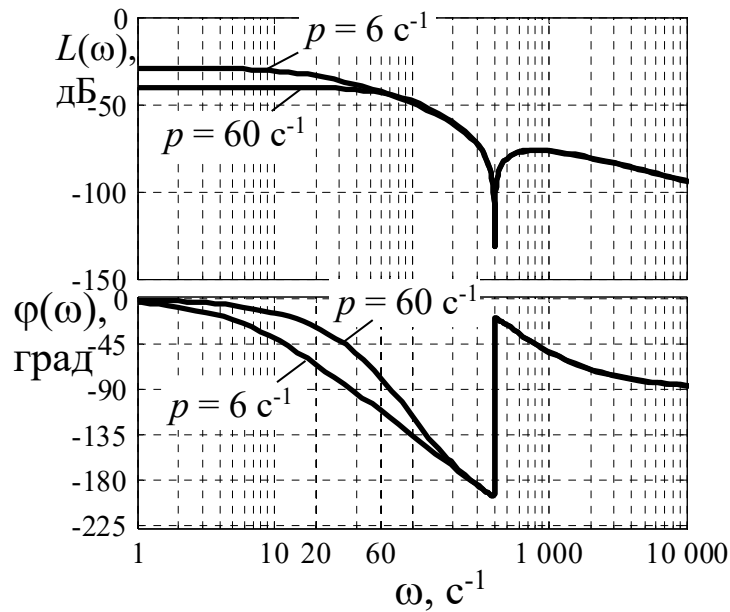


Рисунок 3.13 – Частные характеристики объекта с наблюдателем и модальным регулятором для диапазона изменений $p = [6 \dots 60] \text{ с}^{-1}$

Анализ полученных частотных характеристик объекта (см. Рисунок 3.13) позволяет сообщить системе свойство астатизма ведением простого пропорционально-интегрального звена $W_k(s)$, настроенного на среднюю частоту $p = 20 \text{ с}^{-1}$ и содержащего дополнительный коэффициент передачи, соответствующий подъёму амплитудной характеристики примерно на 20...25 дБ:

$$W_k(s) = \left(1 + \frac{20}{s}\right) \cdot 10. \quad (3.40)$$

Переходные процессы в системе с наблюдателем, модальным регулятором и пропорционально-интегральным звеном показаны на Рисунке 3.14.

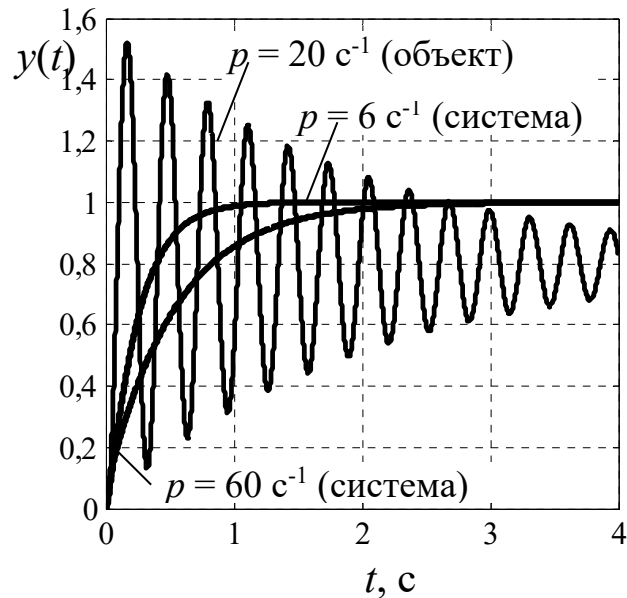


Рисунок 3.14 – Переходные процессы на выходе объекта (при $p = 20 c^{-1}$) и на выходе системы регулирования (при $p = 6 c^{-1}$ и $p = 60 c^{-1}$)

Таким образом, результаты численного моделирования подтверждают результативность изложенных выше приёмов модального синтеза робастных систем на основе принципа разделения функций:

- разделение собственных чисел характеристической матрицы системы на части, одна из которых формирует требуемый монотонный характер переходного процесса в системе, а другая обеспечивает свойство грубости модальному регулятору;

- разделение процедур синтеза наблюдателя координат и модального регулятора таким образом, что регулятор и наблюдатель проектируются независимо друг от друга;

- разделение задачи обеспечения грубости управления, решаемой модальным регулятором, и задачи обеспечения точности и быстродействия системы, решаемой простейшим пропорционально-интегральным регулятором.

3.3 Автономные гомеостатические системы

Гомеостатизм как свойство живых систем поддерживать в допустимых пределах собственные биологические параметры для своего существования в изменяющихся условиях внешней среды (см. главы 1,2) в наиболее полной степени опирается на использование в этих системах принципов многоальтернативности: многоуровневость структуры, блочность строения, специализацию и разделение функций.

Покажем использование этих принципов для обеспечения гомеостатического свойства живучести систем электроснабжения орбитальных космических аппаратов [216,220,415].

Надёжное обеспечение электрической энергией автономных космических аппаратов в условиях существенно изменяющейся плотности светового потока, переменной температуры и площади затенения солнечных батарей, варьируемой мощности одновременно работающих потребителей не может быть обеспечено на основе некоторой постоянной, пусть даже многократно резервированной структуры системы электроснабжения.

Опыт проектирования и эксплуатации таких систем указывает на необходимость активной перестройки режимов функционирования и взаимодействия её узлов в зависимости от текущих условий полёта, то есть указывает на необходимость соответствующего управления [192,244,311,75].

Рассмотрим реализацию такого гомеостатического управления на примере системы электроснабжения российского сегмента Международной космической станции [183,186,280,281,406].

К основным подсистемам рассматриваемой системы электроснабжения относятся, Рисунок 3.15:

- подсистема солнечных батарей, являющаяся первичным источником энергии на борту станции;

– подсистема источника высокого напряжения, находящегося на внешнем по отношению к космической станции аппарате и играющего роль вторичного источника энергии;

– подсистема электрохимических аккумуляторных батарей, накапливающих энергию при её избытке в системе и отдающей – при недостатке.

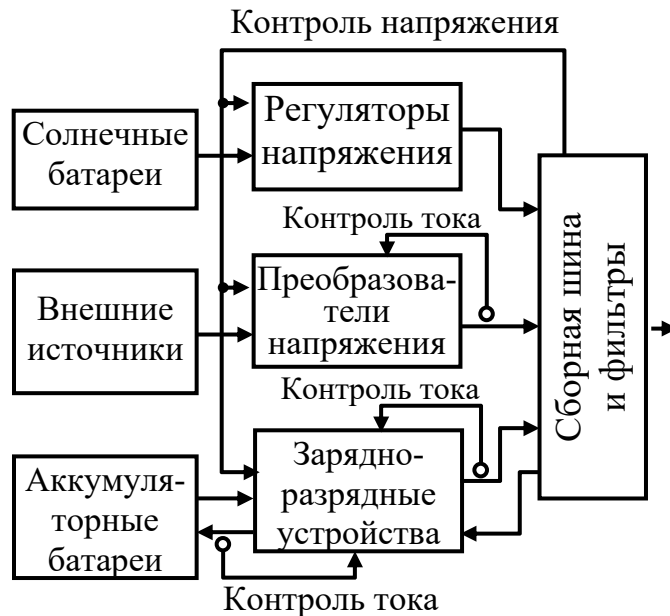


Рисунок 3.15 – Общий состав системы электроснабжения

Все подсистемы снабжены контурами автоматического регулирования.

Функциональная схема системы стабилизации напряжения для солнечной батареи представлена на Рисунке 3.16.

Регулируемой величиной является напряжение U_n на нагрузке. Задающее воздействие – постоянное опорное напряжение $U_{оп}$.

Наиболее существенными внешними воздействиями на подсистему солнечных батарей являются [449]:

R_n – сопротивление нагрузки, Ом;

W – плотность светового потока, Вт/м²;

T – температура элементов батареи, К.

Общее число $N_{СБ}$ солнечных батарей полностью обеспечивает все потребители электроэнергией за счёт параллельного включения.

Система регулирования 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 в соответствии со схемой Рисунка 3.16, а оставшиеся $N_{СБ} - n$ батарей остаются незадействованными.

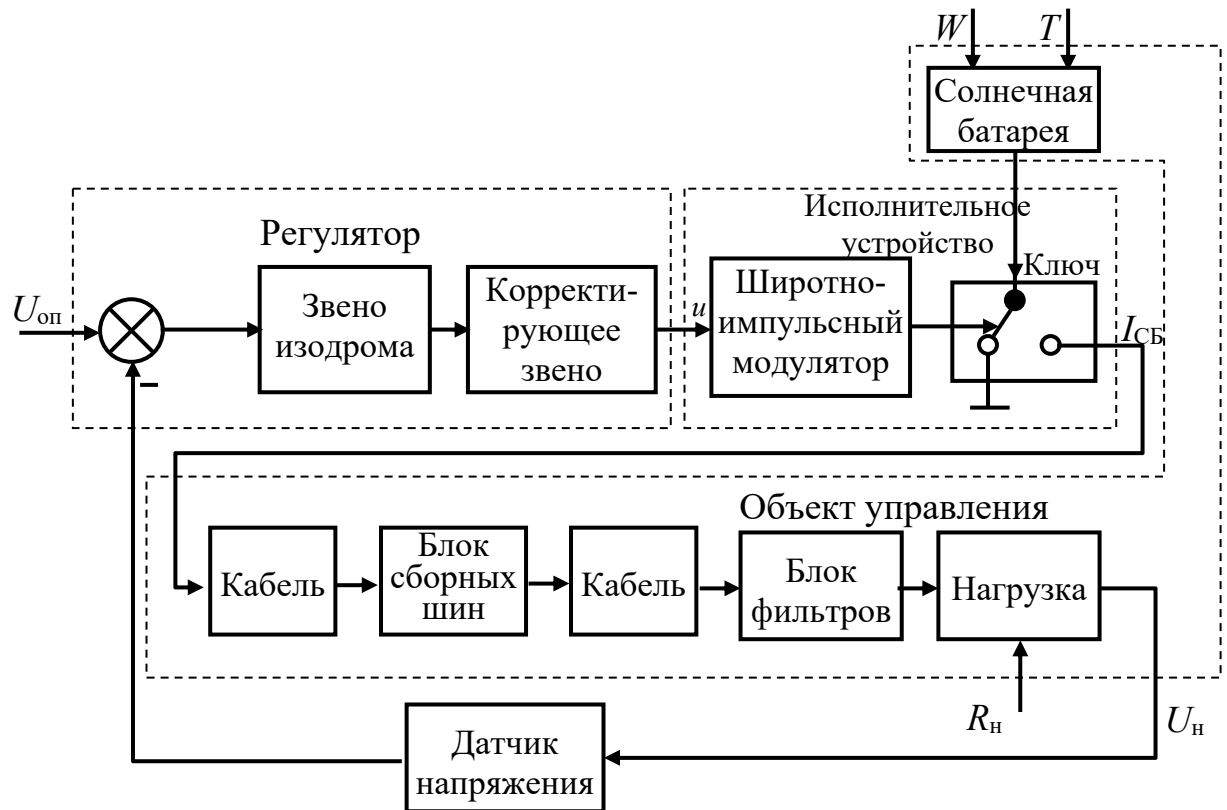


Рисунок 3.16 – Функциональная схема системы стабилизации напряжения при питании от солнечной батареи

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. В частности, отказ или отключение любого количества солнечных батарей не изменяет динамические свойства системы управления.

Для технической реализации изложенного принципа работы подсистемы солнечных батарей используется разбиение общей зоны её регулирования на неперекрывающиеся диапазоны активного регулирования для каждой батареи. На Рисунке 3.17 показан пример такого разбиения для $N_{CB} = 3$, где u – сигнал управления на входе широтно-импульсного преобразователя, I_{CB1}, \dots, I_{CB3} – токи солнечных батарей CB_1, \dots, CB_3 , отдаваемые в нагрузку.

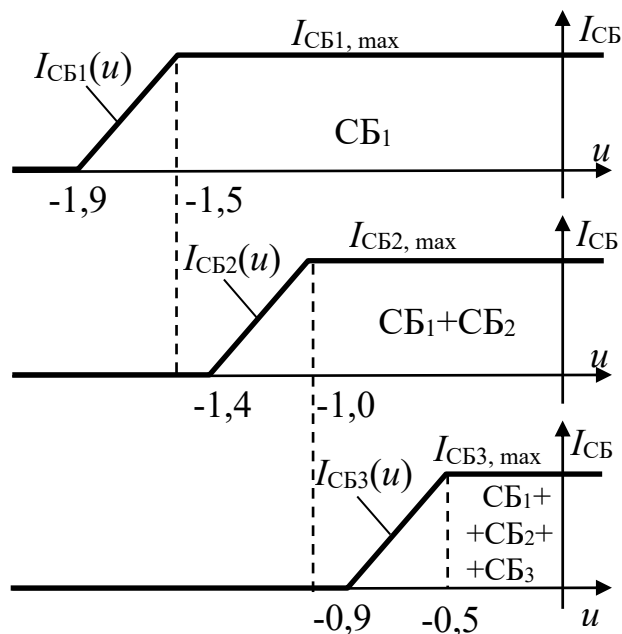


Рисунок 3.17 – Регулировочные характеристики преобразователей для трёх солнечных батарей

При значениях сигнала управления $u > -0,5$ все три батареи будут стремиться отдать свой максимальный ток в нагрузку. Если сумма этих токов избыточна, и для электроснабжения достаточно, например, тока одной батареи, то в результате действия обратной связи управление u будет уменьшаться, последовательно отключая от нагрузки СБ₃ и СБ₂ до тех пор, пока u не войдет в диапазон $-1,9 \leq u \leq -1,5$ активного регулирования тока батареи СБ₁.

Результаты моделирования описанных процессов для ситуаций с попаданием в тень и аварийным отключением одной из двух работающих солнечных батарей представлены на Рисунке 3.18.

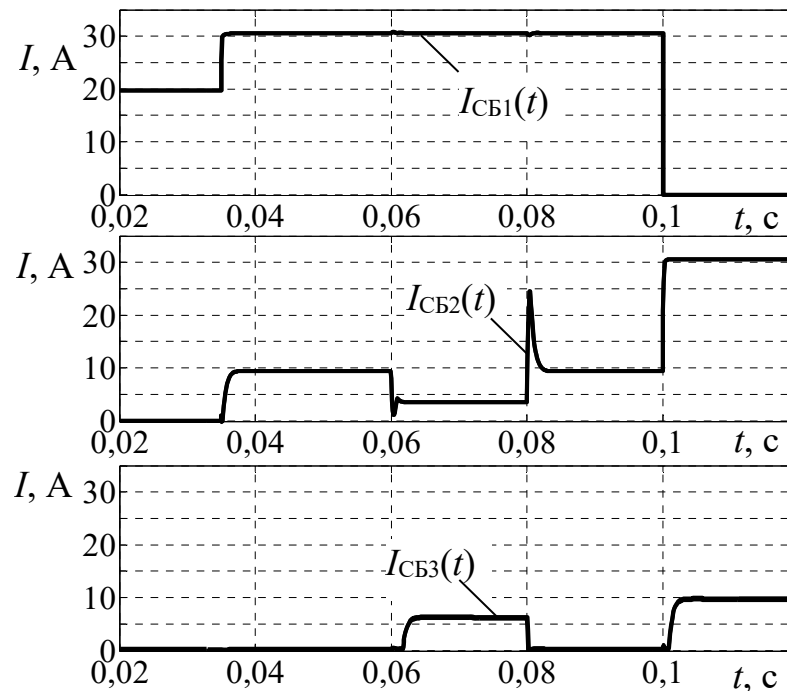


Рисунок 3.18 – Переключение солнечных батарей в режимах с затенением СБ₂ и отключением СБ₁

На Рисунке 3.18 иллюстрируются следующие критические режимы функционирования подсистемы солнечных батарей:

1. В момент времени $t = 0,035$ с происходит скачкообразное увеличение тока нагрузки с 20 А до 40 А. Поскольку максимальный ток одной батареи $I_{СБ, \max} = 30$ А, то батарея СБ₁ начинает отдавать в нагрузку свой полный ток 30 А, и

дополнительно в работу вступает батарея СБ₂, отдающая регулируемый ток 10 А. Батарея СБ₃ для электроснабжения потребителей в этом режиме не требуется, и её ток, отдаваемый в нагрузку, равен нулю.

2. На интервале времени $t = [0,06; 0,08]$ с возникает затенение батареи СБ₂ (плотность светового потока уменьшается с $W = 1000$ Вт/м² до $W = 100$ Вт/м²). Полный ток, отдаваемый этой батареей, падает с $I_{СБ2} = 10$ А до значения $I_{СБ2} = 4$ А, и недостающий ток 6 А потребители получают от батареи СБ₃.

3. В момент времени $t = 0,1$ с имитируется аварийное отключение батареи СБ₁. Необходимый для потребителей ток 40 А обеспечивается полным током батареи СБ₂ и регулируемым током 10 А батареи СБ₃.

Функциональная схема подсистемы с внешним вторичным источником высокого напряжения показана на Рисунке 3.19.

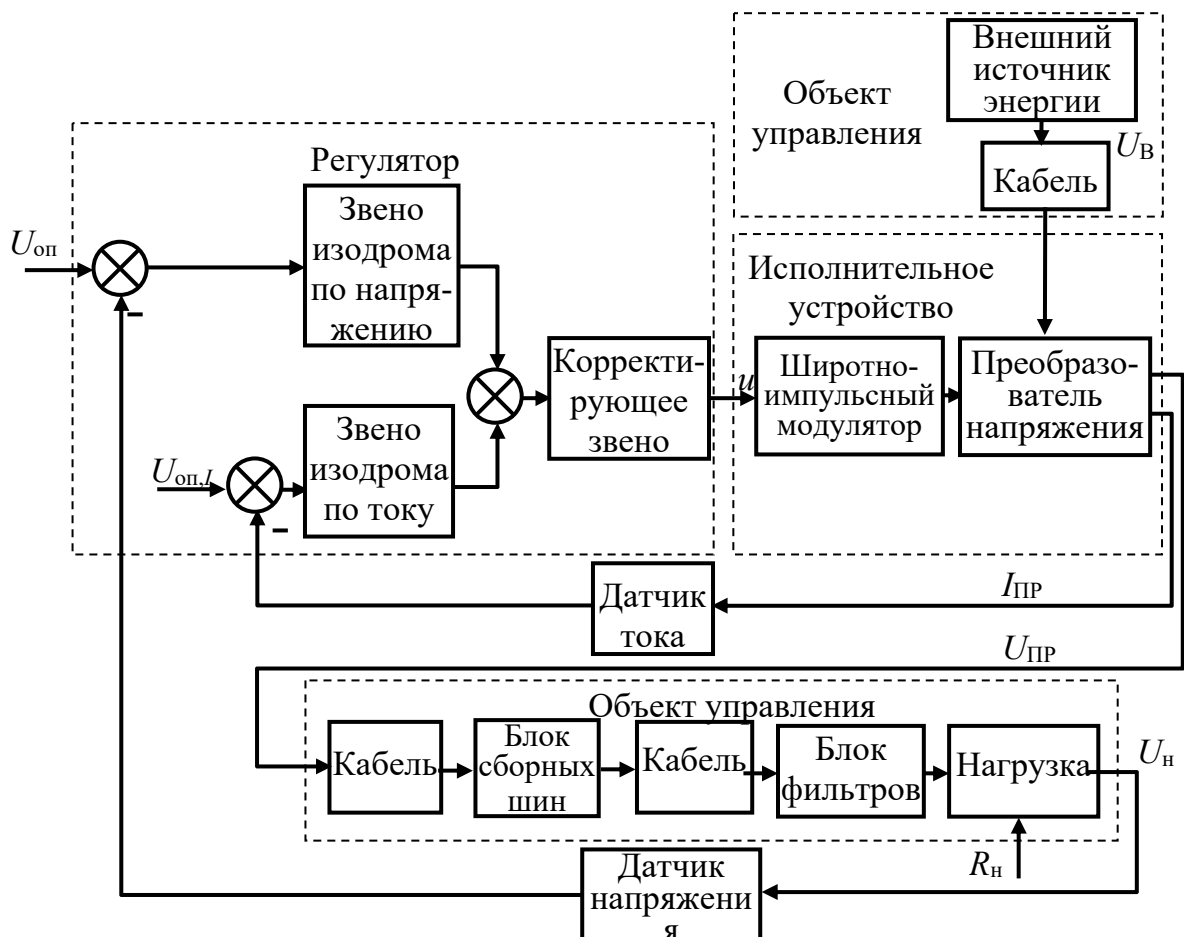


Рисунок 3.19 – Функциональная схема системы стабилизации напряжения и тока при питании от внешнего источника

Рассматриваемая подсистема предназначена для подключения к потребителям электроэнергии внешнего высоковольтного источника энергии, напряжение U_B которого с целью совместной работы с подсистемой солнечных батарей согласуется с последними с помощью управляемого преобразователя (см. Рисунок 3.19).

Для обеспечения высокой надёжности работы этой подсистемы использован многоальтернативный принцип селективности – разделения и специализации её функций, обеспечивающих устойчивую работу подсистемы в различных режимах. Поскольку высоковольтный источник энергии является источником напряжения, то наиболее распространённым критическим режимом его функционирования является режим перегрузки по току, и техническая реализация указанного принципа заключается в том, что при токах преобразователя $I_{ПР}$, не превышающих заданного значения $I_{ПР, \max}$, в подсистеме функционирует контур регулирования напряжения U_N (см. Рисунок 3.19). Но если в случае аварийного, либо штатного роста мощности потребления ток преобразователя достигнет критической величины $I_{ПР, \max}$, то управление переходит к контуру регулирования тока, обеспечивающему сохранение равенства $I_{ПР} = I_{ПР, \max}$, безопасного для оборудования.

Контур регулирования (стабилизации) напряжения при этом параметрически блокируется за счёт большего коэффициента передачи канала управления током. При снятии нагрузки автоматически осуществляется обратная передача функции управления подсистемой от контура тока к контуру напряжения.

Иллюстрация критических режимов работы подсистемы вторичного источника напряжения представлена на Рисунке 3.20.

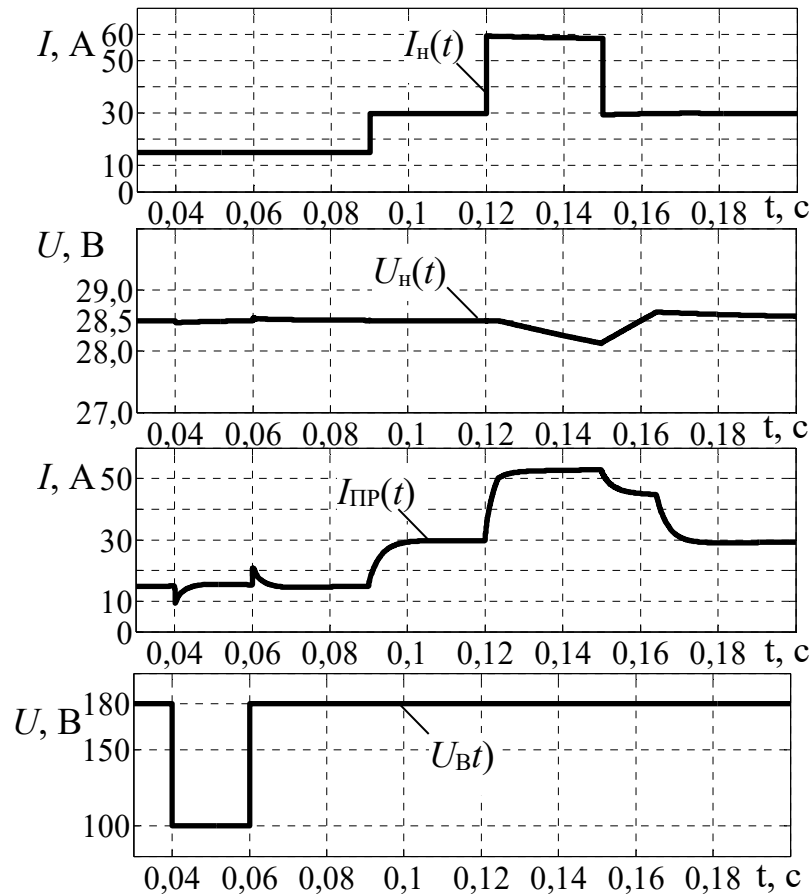


Рисунок 3.20 – Функционирование подсистемы вторичных источников энергии в режимах перегрузки по току и провалов входного напряжения

На Рисунке 3.20 показаны:

1. $I_H(t)$ – изменение тока нагрузки в момент времени $t = 0,09$ с со значения 15 А до 30 А. Эти значения не превышают максимального тока преобразователя $I_{ПР,max} = 50$ А. В интервале времени $t = [0,12;0,15]$ с требуемый ток нагрузки $I_H = 60$ А выходит за пределы $I_{ПР,max}$.

2. $U_H(t)$ – изменение напряжения на нагрузке. Видно, что в диапазоне допустимых токов $I_H \leq I_{ПР,max}$ контур регулирования напряжения стабилизирует значение U_H на заданном уровне $U_H = 28,5 \pm 0,5$ В; при перегрузке по току для сохранения равенства $I_{ПР} = I_{ПР,max}$ напряжение U_H снижается.

3. $I_{ПР}(t)$ – изменение тока, отдаваемого преобразователем в нагрузку. В интервале $t = [0,12;0,15]$ с управление преобразователем переходит к контуру тока, который ограничивает ток преобразователя значениями 50...52 А.

4. $U_B(t)$ – изменение уровня входного напряжения, подаваемого на преобразователь. На интервале времени $t = [0,04;0,06]$ с воспроизводится кратковременное падение (провал) этого напряжения со 180 В до 100 В. Работающий в этом режиме контур регулирования напряжения поддерживает значение $U_H(t)$ на заданном уровне.

Подсистема аккумуляторных батарей выполняет две функции: накопление энергии при её избытке на станции и снабжение потребителей электроэнергией при её недостатке (затенение солнечных батарей и отсутствие внешнего вторичного источника питания).

Функциональная схема, поясняющая реализацию принципа многоуровневости и разделения функций в подсистеме, изображена на Рисунке 3.21, на котором показано, что реверсивный преобразователь напряжения управляется двумя независимыми каналами регулятора (канал заряда и канал разряда), каждый из которых содержит двухуровневую систему управления: по напряжению (при токах, не превышающих критические значения), и по току (при токах, стремящихся превысить критическое значение).

Переключение работы этих каналов осуществляется автоматически в результате выделения в общем диапазоне регулирования напряжения в системе электроснабжения отдельных уровней (зон) работы всех её подсистем (Рисунок 3.22). Переход из одной зоны в другую происходит в соответствии с текущим значением тока нагрузки и состоянием аккумуляторных батарей, в частности: при небольшой мощности работающих потребителей они обеспечиваются электроэнергией от солнечных батарей, которые поочерёдно подключаются по мере роста потребляемой мощности (см. Рисунок 3.17), причём к потребителям относятся также аккумуляторные батареи, работающие в режиме заряда.

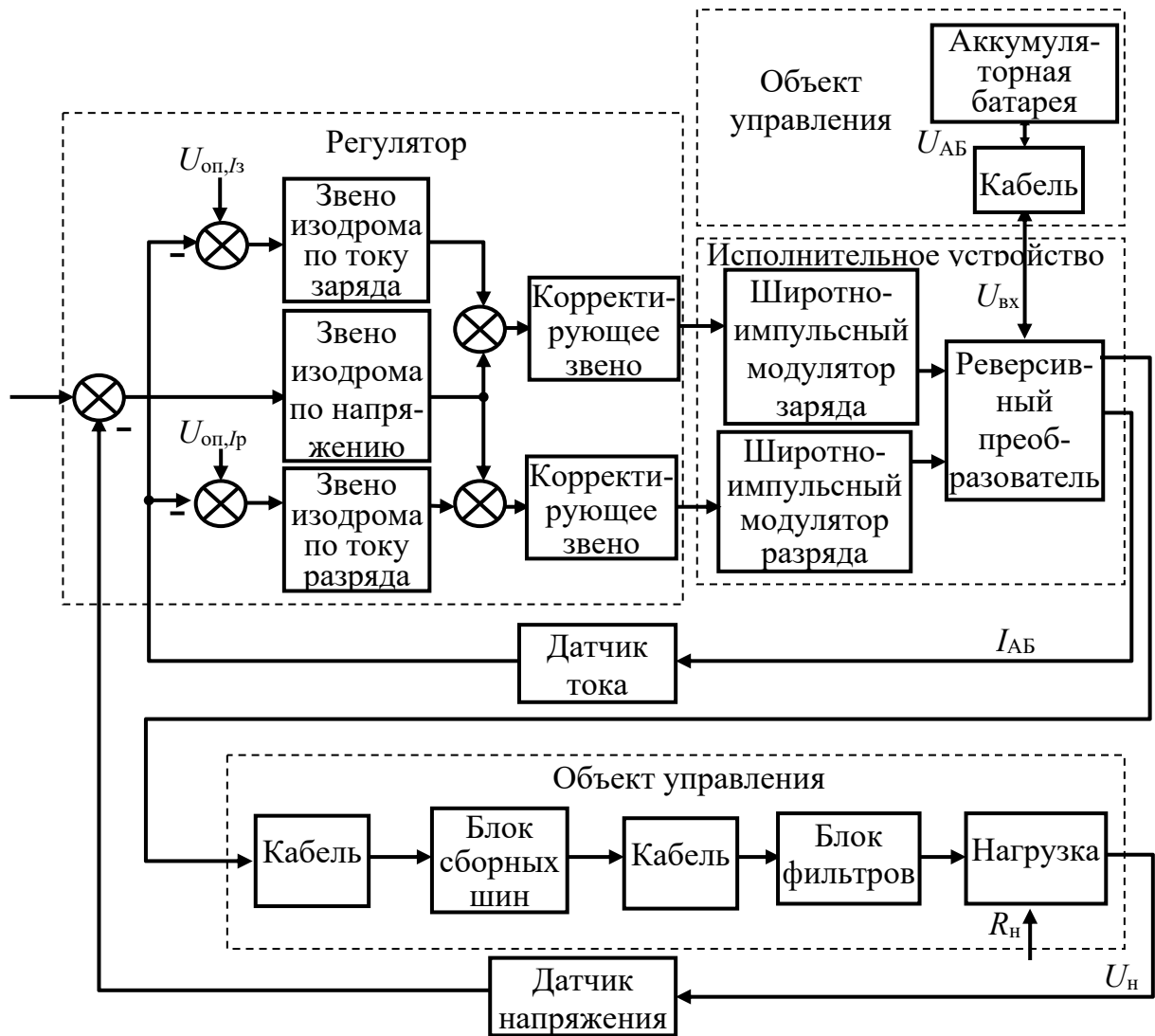


Рисунок 3.21 – Функциональная схема стабилизации напряжения и тока при питании от аккумуляторных батарей

Если мощность потребителей превысит суммарную мощность подсистемы солнечных батарей, то сигнал управления u перейдёт в зону активного регулирования вторичного источника питания, переводя все солнечные батареи в режим отдачи полного тока, Рисунок 3.22.

Дальнейший рост мощности потребителей, не обеспечиваемой подсистемами солнечных батарей из-за перехода станции в теньевую часть орбиты, а также в случае отключения внешнего вторичного источника приведёт систему в состояние, при котором будет прекращён заряд аккумуляторных батарей и они перейдут в режим разряда, Рисунок 3.22.

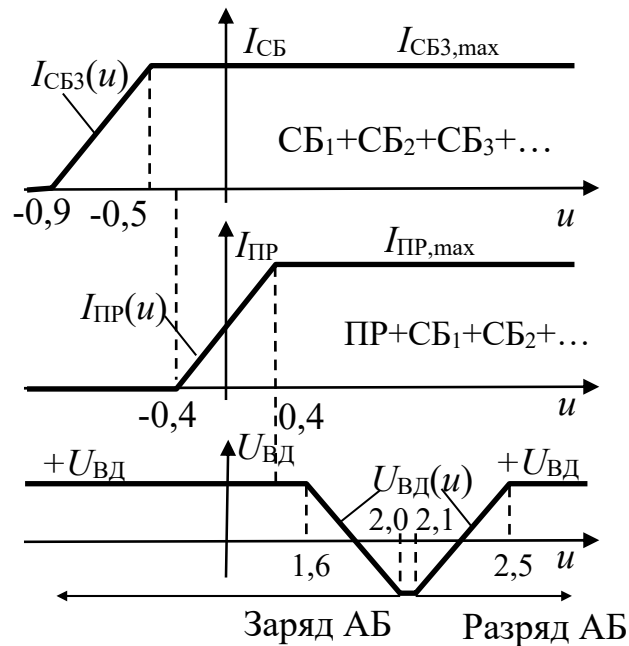


Рисунок 3.22 – Диапазоны работы солнечных батарей, вторичного источника и аккумуляторных батарей

Реверсивный преобразователь подсистемы аккумуляторных батарей управляет режимами заряда и разряда с помощью регулируемого напряжения вольтодобавки $U_{ВД}$, выбираемого автоматически в зависимости от текущей разности напряжения на нагрузке и на зажимах аккумуляторных батарей.

Управление u является единым для всех подсистем питания и обеспечивает их согласованное взаимодействие. На Рисунке 3.23 иллюстрируется процесс такого взаимодействия при значительном изменении тока нагрузки и существенном затенении солнечных батарей. Во всех ситуациях в системе потребители бесперебойно обеспечиваются электроэнергией, избыток которой (при $I_n < 60$ А, Рисунок 3.23) направляется на заряд аккумуляторных батарей.

Таким образом, многоуровневое управление осуществляется не только в отдельных подсистемах, но и в системе электроснабжения станции в целом.

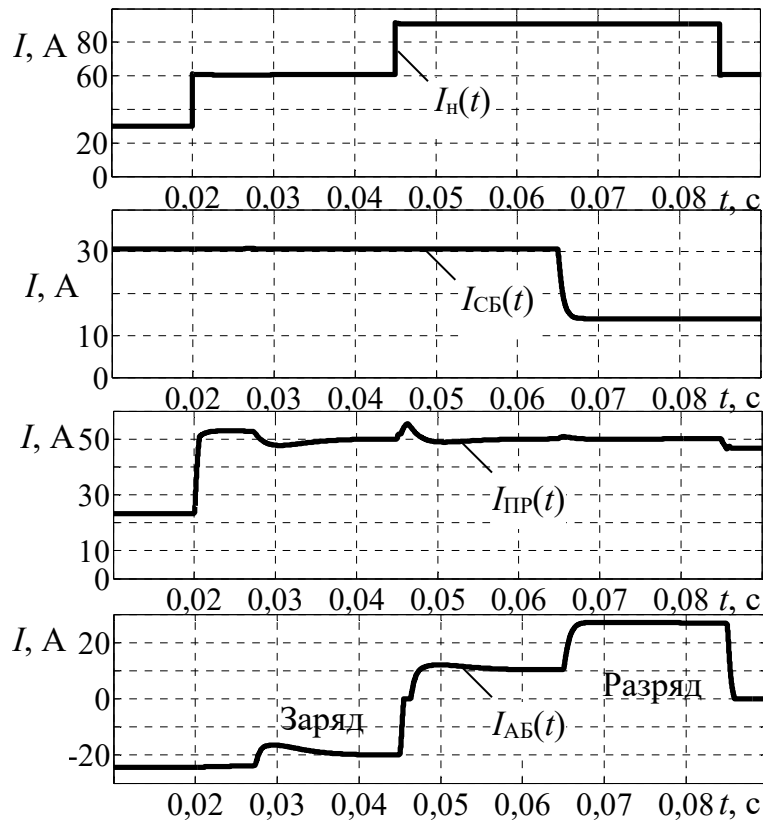


Рисунок 3.23 – Взаимодействие подсистем питания при изменении тока нагрузки и затенении при $t > 0,065$ с

Анализ режимов работы автономной системы электроснабжения космической станции показывает, что живучесть рассматриваемой системы достигается в результате применения эволюционных принципов многоальтернативного управления [210,212,215]:

- многоуровневости, создающей многообразие поведенческих стратегий системы путём передачи управления и распределения функций электроснабжения между подсистемами и в каждой из них в зависимости от текущей ситуации;
- модульности, многократно снижающей возможность каскадного (технологически связанного) развития аварийной ситуации и отказа;
- разделения функций, обеспечивающего высокую устойчивость организованных каналов управления с узкими функциональными назначениями.

На основе этих принципов реализуется активное перенаправление энергетических и информационных потоков системы и изменение стратегии функционирования её подсистем в экстремальных ситуациях.

3.4 Системы адаптивной идентификации нелинейных объектов

Задача адаптивной идентификации нелинейных объектов и систем приобрела в настоящее время особую актуальность в связи с быстрым развитием телекоммуникационных систем и растущими требованиями к показателям качества соответствующих каналов связи [350,361,431]. Одним из важнейших и, как правило, критическим показателем является уровень нелинейных искажений, возникающих в электронных устройствах каналов. Наиболее распространённым способом борьбы с этими искажениями является предварительная нелинейная коррекция сигналов, осуществляемая с помощью прямой или инверсной модели системы [350,451]. Для построения такой модели системы необходимо определение её параметров, т.е. возникает задача идентификации нелинейной системы.

Рассмотрим задачу адаптивной идентификации сложной нелинейной системы. Попытка создать адекватную модель такой системы в виде однокаскадной структуры, построенной на основе концепции “чёрного ящика”, сталкивается с принципиальным ограничением: некоммутативностью её частей. Для преодоления этого ограничения предлагается решать задачу нелинейной идентификации на основе принципов многоальтернативности: модульности построения модели, разделения функций её узлов и организации многоуровневой структуры [225, 231,409,421].

На Рисунке 3.24 представлена структура нелинейной системы, содержащая n компонентов, каждый из которых включает в себя безынерционное звено с нелинейной статической характеристикой $f_i(x)$ и динамическое звено $w_i(j\omega) = w_i(\omega) \cdot e^{j \cdot \varphi_i(\omega)}$ с нелинейной фазовой частотной характеристикой $\varphi_i(\omega)$, $i = \overline{1, n}$.

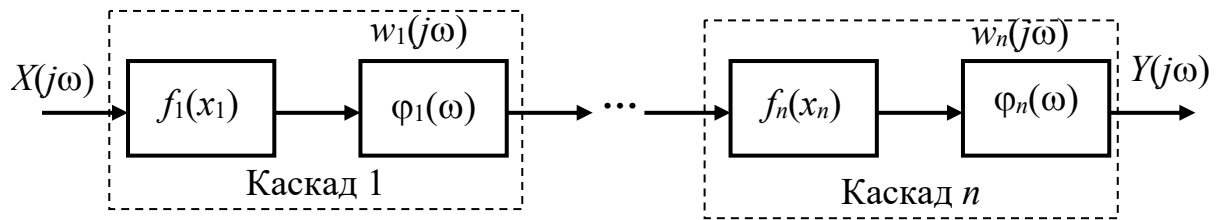


Рисунок 3.24 – Структура нелинейной системы

В результате прохождения через такую систему входной сигнал $X(j\omega) = x(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}$ получит искажения, обусловленные нелинейностью $f_i(x)$, т.е. изменением коэффициента передачи системы в зависимости от амплитуды $x(\omega)$, и искажения, обусловленные нелинейностью $\varphi_i(\omega)$, т.е. неодинаковым временем запаздывания гармонических составляющих с разной частотой ω .

Таким образом, задача идентификации характеристик такой системы с целью их последующей коррекции требует получения оценок $\hat{f}_i(x)$, $\hat{\varphi}_i(\omega)$ и $\hat{w}_i(j\omega)$.

Простейшее решение поставленной задачи заключается в формировании эквивалентной нелинейной системы с такими сосредоточенными характеристиками $\hat{F}(x)$, $\hat{\Phi}(\omega)$ и $\hat{W}(j\omega)$, чтобы минимизировать ошибку $e(j\omega) = Y(j\omega) - \hat{Y}(j\omega)$, Рисунок 3.25.

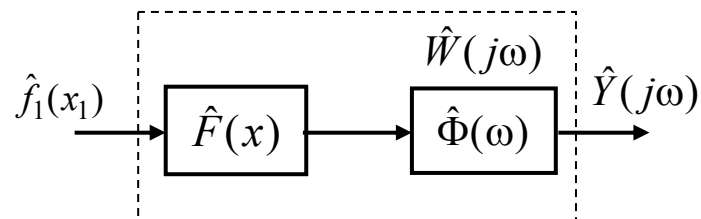


Рисунок 3.25 – Модель эквивалентной системы с сосредоточенными нелинейными характеристиками $\hat{F}(x)$, $\hat{\Phi}(\omega)$

Независимо от метода определения $\hat{F}(x)$, $\hat{\Phi}(\omega)$ и $\hat{W}(j\omega)$ принципиальным недостатком такого подхода к решению поставленной задачи является использование концепции «чёрного ящика»: представление нелинейной системы в виде устройства с сосредоточенными характеристиками $\hat{F}(x)$, $\hat{\Phi}(\omega)$ и $\hat{W}(j\omega)$. При таком представлении некоммутативность исходных нелинейных преобразований $f_i(x)$: $w_i(j\omega) \cdot f_i(x_i(j\omega)) \neq f_i(w_i(j\omega) \cdot x_i(j\omega))$, $i = \overline{1, n}$ приводит к неоправданному усложнению сосредоточенных характеристик $\hat{F}(x)$, $\hat{\Phi}(\omega)$, $\hat{W}(j\omega)$ и, как следствие, к увеличению ошибки идентификации $e(j\omega)$ [148,181,263,305].

Для повышения качества идентификации предложено перейти к решению поставленной задачи на основе принципов многоальтернативности [202,203]: модульности, многоуровневости и разделения функций.

Реализация перечисленных выше принципов в рассматриваемой задаче заключается, прежде всего, в отказе от концепции «чёрного ящика» и использовании внутренней структуры нелинейной системы для её покаскадной многоуровневой параметризации с отдельным выполнением задач адаптивной идентификации и собственно нелинейной коррекции.

Покаскадная идентификация в простейшем случае основана на использовании структуры модели, идентичной известной структуре исходной нелинейной системы, Рисунок 3.26.

Из Рисунка 3.26 следует, что адаптивная модель воспроизводит структуру исходной нелинейной системы, что даёт возможность упростить процесс идентификации параметров модели за счёт модульности (каскадности) структуры модели.

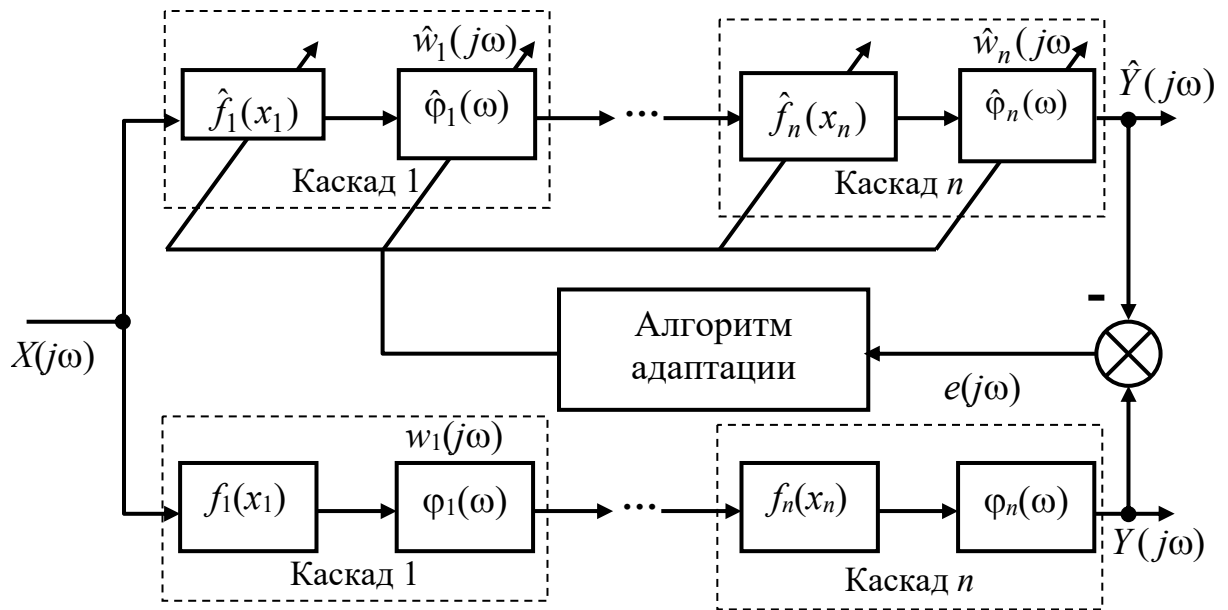


Рисунок 3.26 – Покаскадная идентификация нелинейной системы по выходному сигналу

От реализации этого способа можно ожидать заметного улучшения качества идентификации, но такое решение проблемы является неполным: используются только сведения о структуре нелинейной системы и её выходной координате $Y(j\omega)$, однако её внутреннее состояние по-прежнему не раскрывается.

В том случае, если внутренние координаты состояния нелинейной системы доступны измерению или восстановлению с помощью наблюдателей, можно уменьшить ошибку $e(j\omega)$ на основе покаскадной идентификации с использованием вектора состояния этой системы, Рисунок 3.27 [188,319].

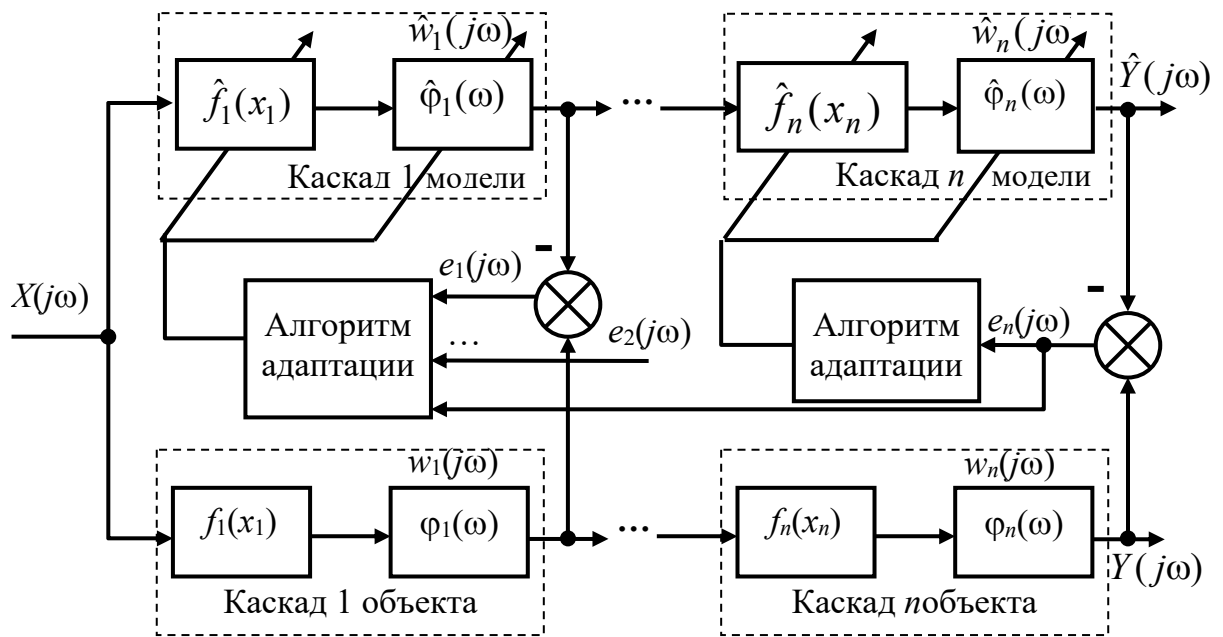


Рисунок 3.27 – Покаскадная идентификация с использованием вектора состояния нелинейной системы

Сходимость алгоритмов идентификации по структуре Рисунка 3.27 также улучшится вследствие декомпозиции этого процесса на параллельные вычисления и доминирующей роли более быстрых автономных контуров настройки.

Важным преимуществом идентификации на основе вектора состояния нелинейной системы является возможность построения многоуровневой структуры алгоритма адаптации: каждый контур адаптации уровня i включает в себя контуры с номерами $1, \dots, i-1$. Иначе говоря, процесс идентификации каждого последующего каскада иерархически подчинён процессу идентификации предыдущего каскада. Такой многоуровневый принцип построения алгоритма адаптации обеспечивает возможность совместного, синергетического эффекта функционирования автономных контуров.

Покаскадная адаптация полностью применима к задаче идентификации инверсной системы (задаче обратной идентификации).

Структура идентификации инверсной системы показана на Рисунке 3.28.

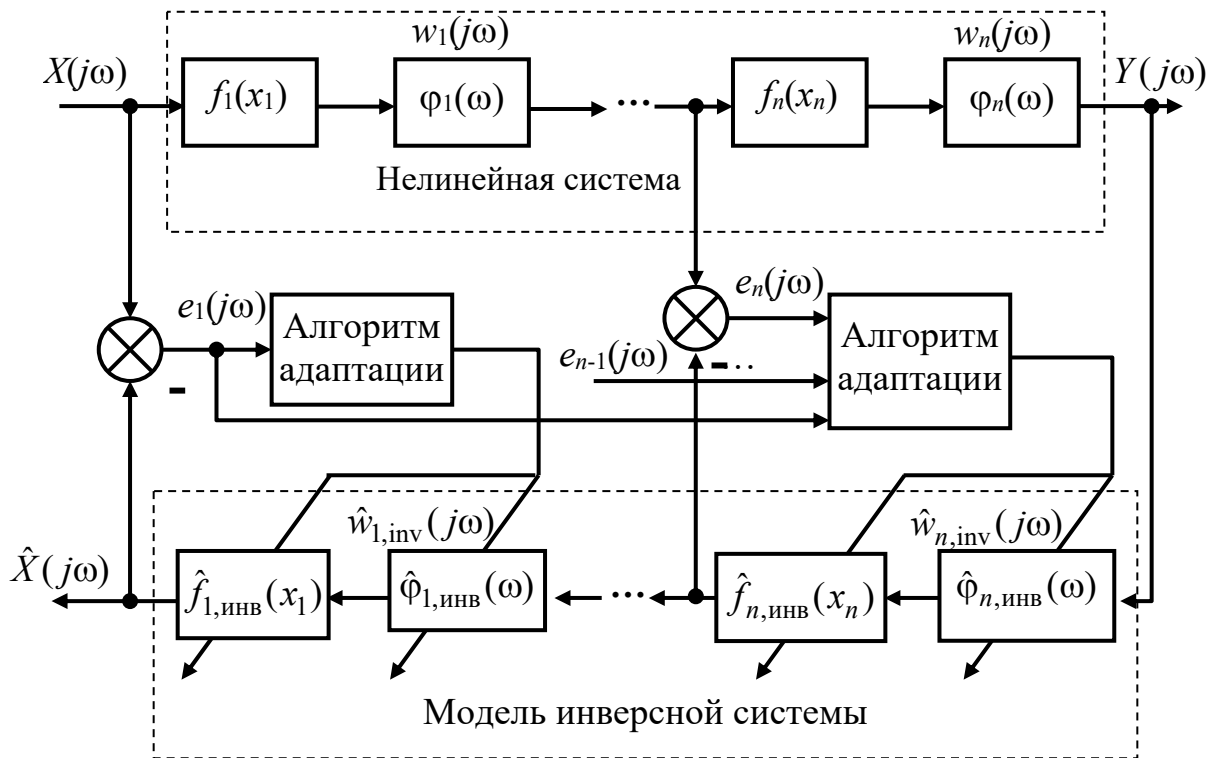


Рисунок 3.28 – Структура идентификации инверсной нелинейной системы

Структура процесса обратной идентификации полностью сохраняет преимущества по каскадной и многоуровневой адаптации.

Структура системы с нелинейной коррекцией на основе обратной идентификации с использованием нейросетей показана на Рисунке 3.29.

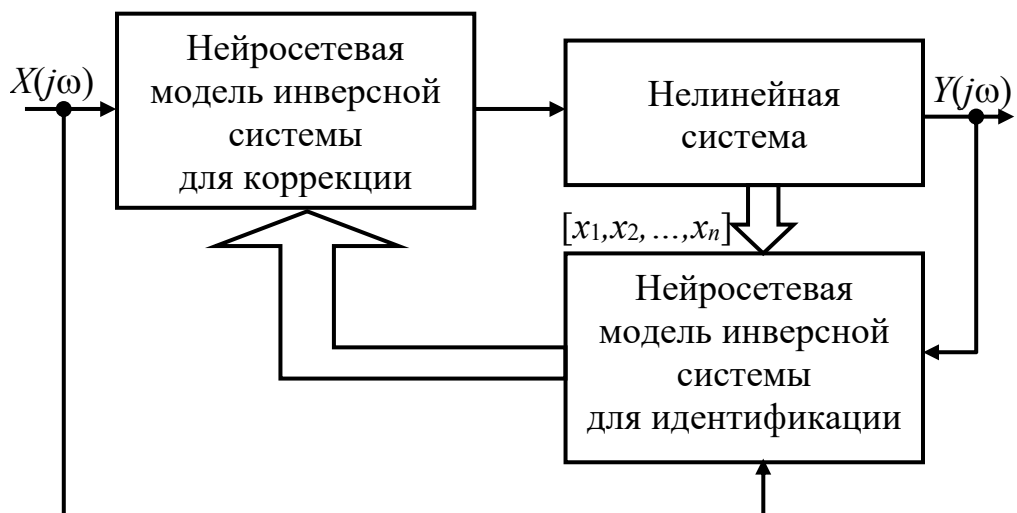


Рисунок 3.29 – Нелинейная коррекция с обратной идентификацией

В структуре на Рисунке 3.29 реализован принцип разделения функций: нейросеть в обратной связи осуществляет функцию непрерывной идентификации инверсной нелинейной системы и передаёт вектор M найденных весовых коэффициентов идентичной нейросети в прямом канале, которая выполняет функцию собственно коррекции нелинейной системы.

Для экспериментальной проверки изложенных выше методов нелинейной идентификации была использована двухкаскадная система, содержащая элементы $f_1(x_1)$, $w_1(j\omega)$, $f_2(x_2)$, $w_2(j\omega)$ (Рисунок 3.24):

$$f_1(x(j\omega)) = 2.5(1 - e^{-0.7x(j\omega)\text{sign}(x(j\omega))}) \cdot \text{sign}(x(j\omega)); \quad (3.41)$$

$$y_1(j\omega) = \frac{k_1}{1 + j\omega T_1} \cdot f_1(x(j\omega)); \quad (3.42)$$

$$f_2(y_1(j\omega)) = 1.25(1 - e^{-0.8y_1(j\omega)\text{sign}(y_1(j\omega))}) \cdot \text{sign}(y_1(j\omega)); \quad (3.43)$$

$$y_2(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega T_2} \cdot f_2(y_1(j\omega)), \quad (3.44)$$

где k_1 – коэффициент передачи динамического звена $w_1(j\omega)$;

T_1, T_2 – постоянные времени звеньев $w_1(j\omega)$ и $w_2(j\omega)$ соответственно.

Сравнивались три модели идентификации:

Модель идентификации с сосредоточенными нелинейными характеристиками, Рисунок 3.25:

$$\hat{F}(x_1) = \sum_{i=1}^4 h_i x_1 \cdot |x_1|^{i-1} = h_1 x_1 + h_2 x_1 \cdot |x_1| + h_3 x_1 \cdot |x_1|^2 + h_4 x_1 \cdot |x_1|^3, \quad (3.45)$$

$$\hat{W}(j\omega) = \frac{\hat{k}_1}{(1 + j\omega \hat{T}_1)(1 + j\omega \hat{T}_2)}. \quad (3.46)$$

$$e(h_1, h_2, h_3, h_4, \hat{T}_1, \hat{T}_2, \hat{k}_1) = \sum_{i=1}^m (Y(i) - \hat{Y}(i))^2 \rightarrow \min, \quad (3.47)$$

где h_i , $i = 1, \dots, 4$, $\hat{T}_1, \hat{T}_2, \hat{k}_1$ – идентифицируемые параметры модели; m – объём выборки данных, используемой для идентификации. Численный поиск минимального значения ошибки проводился методом сопряжённых градиентов.

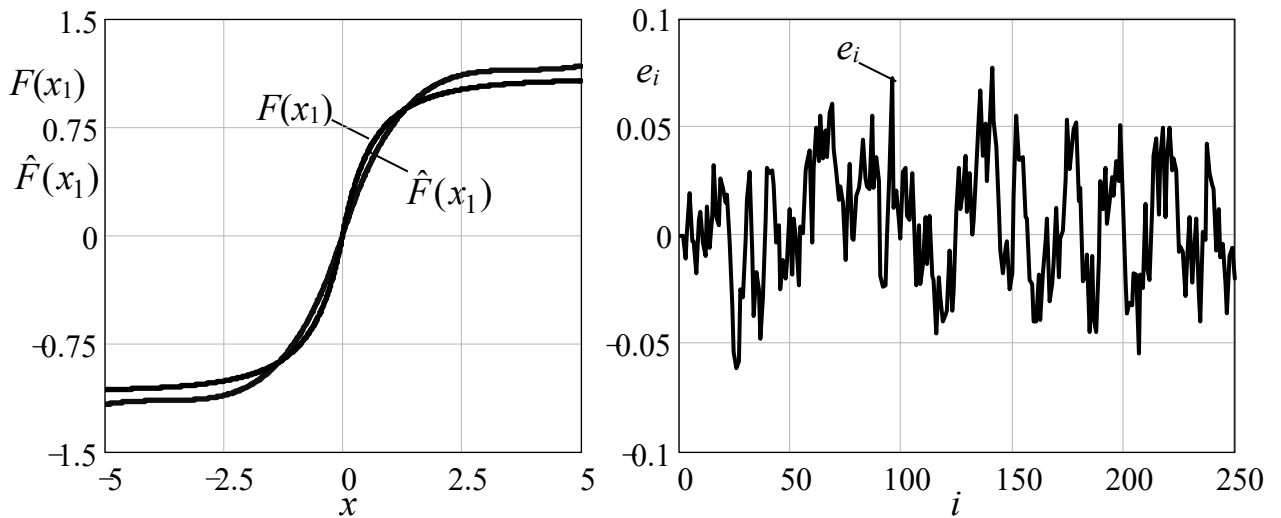


Рисунок 3.30 – Результаты идентификации на модели с сосредоточенными нелинейными характеристиками

Модель покаскадной идентификации по выходному сигналу системы, Рисунок 3.26:

$$\hat{f}_1(x_1) = \sum_{i=1}^2 h_{1i} x_1 \cdot |x_1|^{i-1} = h_{11} x_1 + h_{12} x_1 \cdot |x_1|; \quad (3.48)$$

$$\hat{f}_2(x_2) = \sum_{i=1}^2 h_{2i} x_2 \cdot |x_2|^{i-1} = h_{21} x_2 + h_{22} x_2 \cdot |x_2|; \quad (3.49)$$

$$\hat{W}_1(j\omega) = \frac{\hat{k}_1}{1 + j\omega \hat{T}_1}; \quad (3.50)$$

$$\hat{W}_2(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega \hat{T}_2}; \quad (3.51)$$

$$e(h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}, \hat{T}_1, \hat{T}_2, \hat{k}_1) = \sum_{i=1}^m (Y(i) - \hat{Y}(i))^2 \rightarrow \min, \quad (3.52)$$

где $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}, \hat{T}_1, \hat{T}_2, \hat{k}_1$ – идентифицируемые параметры.

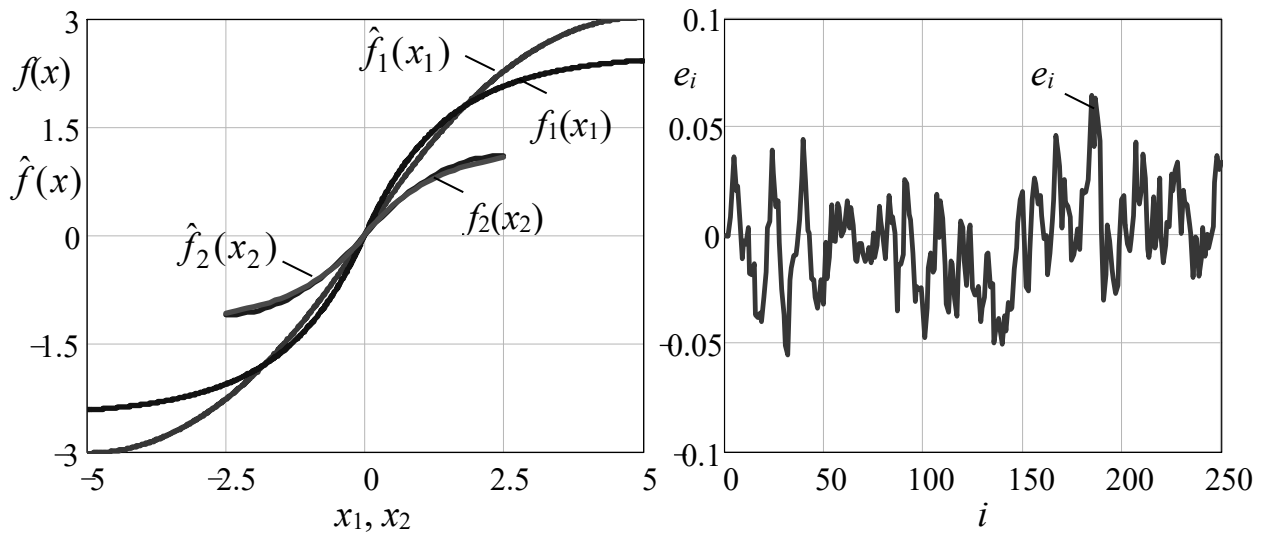


Рисунок 3.31 – Результаты покаскадной идентификации по выходному сигналу системы

Модель покаскадной идентификации по вектору состояния, Рисунок 3.27:

$$\hat{f}_1(x_1) = \sum_{i=1}^3 h_{1i} x_1 \cdot |x_1|^{i-1} = h_{11} x_1 + h_{12} x_1 \cdot |x_1| + h_{13} x_1 \cdot |x_1|^2; \quad (3.53)$$

$$\hat{f}_2(x_2) = \sum_{i=1}^2 h_{2i} x_2 \cdot |x_2|^{i-1} = h_{21} x_2 + h_{22} x_2 \cdot |x_2|; \quad (3.54)$$

$$\hat{W}_1(j\omega) = \frac{\hat{k}_1}{1 + j\omega \hat{T}_1}; \quad (3.55)$$

$$\hat{W}_2(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega \hat{T}_2}; \quad (3.56)$$

$$e_1(h_{11}, h_{12}, h_{13}, \hat{T}_1, \hat{k}_1) = \sum_{i=1}^m (x_2(i) - \hat{x}_2(i))^2 \rightarrow \min; \quad (3.57)$$

$$e = e_2(h_{21}, h_{22}, \hat{T}_2) = \sum_{i=1}^m (Y(i) - \hat{Y}(i))^2 \rightarrow \min. \quad (3.58)$$

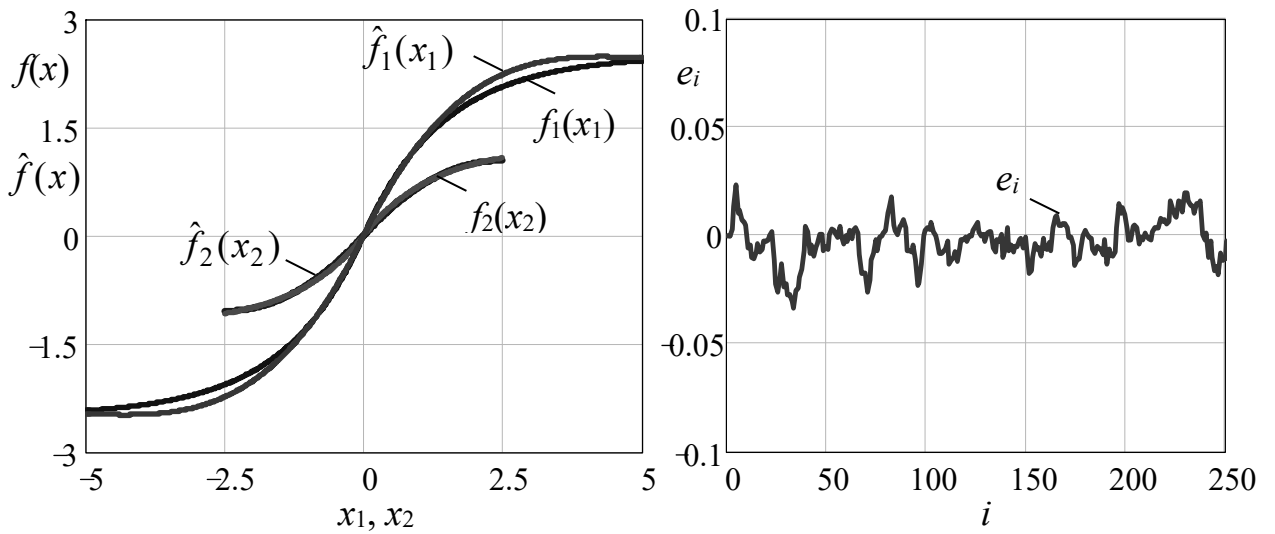


Рисунок 3.32 – Результаты покаскадной идентификации по вектору состояния

Достигнутые значения ошибок e для рассмотренных моделей идентификации приведены в Таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Сравнение ошибок идентификации различными моделями

№	Вариант модели	Порядок модели	Среднее квадратическое значение ошибки, дБ
1	Однокаскадная сосредоточенная модель	7	-31
2	Двухкаскадная модель с адаптацией по выходу	7	-33
3	Двухкаскадная модель с адаптацией по вектору состояния	5	-40

Результаты экспериментального сопоставления перечисленных моделей подтверждают преимущества адаптивной идентификации нелинейных систем на основе принципов многоальтернативности. Использование этих принципов в решении проблемы адаптивной идентификации 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 подзадачи малой размерности и для организации параллельных вычислений в реальном масштабе времени;

- построить систему обратной нелинейной коррекции с двумя отдельными моделями, одна из которых выполняет функцию идентификации параметров системы, а другая – собственно процесс нелинейной коррекции.

3.5 Системы с сигнальной адаптацией

Методы снижения чувствительности системы к изменениям свойств объекта за счёт отрицательных обратных связей с большими коэффициентами усиления относят к сигнальной адаптации [14,32]. Сигнальная адаптация значительно проще параметрической и хорошо приспособлена для быстрых вариаций параметров объекта [20,269,137].

Общепризнанным существенным недостатком этой адаптации является узкий диапазон компенсируемого изменения свойств объекта [101], т.е. режим

нормального функционирования системы, ограниченный этим узким диапазоном следует отнести к её критическому режиму, отклонение от которого является недопустимым.

Рассмотрим способ устранения указанного недостатка сигнальной адаптации на основе использования эволюционной концепции многоальтернативного управления, в частности – принципов многоуровневости и модульности [242]. Предполагается, что выделение в объекте нескольких блоков (каскадов) низкого порядка и введение для каждого блока соответствующего контура сигнальной адаптации позволит увеличить глубину адаптации всей системы в целом. Возможность такого выделения каскадов определяется конкретной структурой объекта управления, и вполне ожидаема, например, в системах управления электромеханическими, электротехническими и радиотехническими преобразователями энергии большой мощности [2,34,225,231,280].

Рассмотрим объект:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Bx(t) + Nu(t); \\ y(t) &= Ax(t), \end{aligned} \quad (3.59)$$

в котором $x(t)=[x(t)_1 \dots x(t)_n]^T$ – вектор состояния объекта; $y(t)$ – управляемая (выходная) величина; $u(t)$ – управляющее воздействие (аргумент t далее везде опущен); B – характеристическая матрица объекта, $[n \times n]$; N – матрица управления, $[n \times 1]$; A – матрица выхода, $[1 \times n]$. Матрицы B, N и A объекта содержат нестационарные элементы, изменяющиеся во времени.

Применим к этому объекту схему одноуровневой сигнальной адаптации с явной эталонной моделью, Рисунок 3.33 [101]:

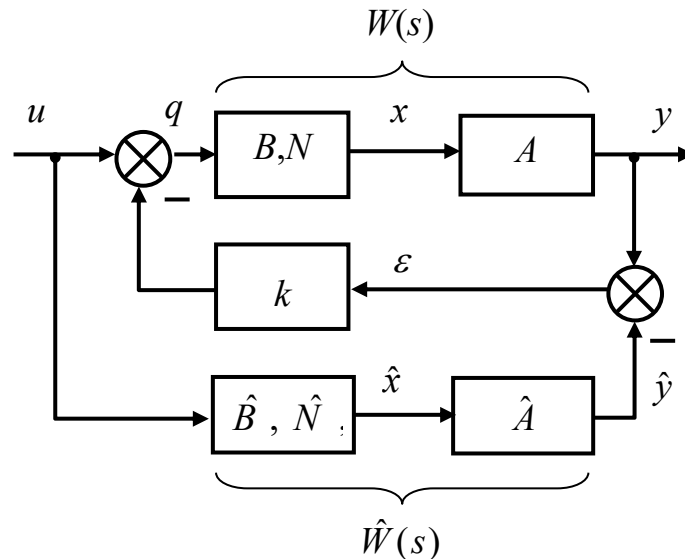


Рисунок 3.33 – Структурная схема системы одноуровневой сигнальной адаптации с явной эталонной моделью

Эталонная модель объекта обозначена на Рисунке 3.33 матрицами $\hat{B}, \hat{N}, \hat{A}$ и величинами \hat{x}, \hat{y} , имеющими названия аналогичные объекту (1). Коэффициент k – скалярная постоянная, образующая замкнутый контур сигнальной адаптации; ε – ошибка адаптации. $W(s)$ и $\hat{W}(s)$ – передаточные функции объекта и эталонной модели соответственно.

Уравнения движения представленной на Рисунке 3.33 схемы имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{x} = Bx + N(u - k \cdot \varepsilon); \\ y = Ax, \\ \dot{\hat{x}} = \hat{B}\hat{x} + \hat{N}u; \\ \hat{y}(t) = \hat{A}\hat{x}; \\ \varepsilon = y - \hat{y}. \end{cases} \quad (3.60)$$

Система уравнений (3.60) указывает на принципиальную возможность сигнальной компенсации вариаций матриц B, N и A объекта слагаемым $k\varepsilon$, входящим в общее управление $q = u - k\varepsilon$.

Подставляя из (3.60) выражения для y и \hat{y} в уравнение для ε , а затем ε – в уравнение для \dot{x} , получим:

$$\begin{cases} \dot{x} = (B - NkA)x + N(k\hat{A}\hat{x} + u); \\ \dot{\hat{x}} = \hat{B}\hat{x} + \hat{N}u, \end{cases} \quad (3.61)$$

Проведём анализ свойств схемы (3.60),(3.61). Перепишем (3.61) в виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\hat{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B - NkA & Nk\hat{A} \\ 0 & \hat{B} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ \hat{x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N \\ \hat{N} \end{bmatrix} \cdot u. \quad (3.62)$$

В результате найдём характеристический полином схемы с одноуровневой сигнальной адаптацией:

$$\left| \begin{array}{c|c} sE - B + NkA & -NkA \\ \hline 0 & sE - \hat{B} \end{array} \right| = |sE - B + NkA| \cdot |sE - \hat{B}|, \quad (3.63)$$

$$E = \text{diag}(1 \dots 1).$$

Выражение (3.63) показывает, что собственные числа характеристической матрицы схемы (3.60) без изменений повторяют корни характеристического полинома $|sE - \hat{B}|$ эталонной модели, и включают в себя также корни характеристического полинома $|sE - B + NkA|$ объекта, которые могут существенно измениться из-за введения коэффициента обратной связи k . При этом подразумевается, что полином $|sE - \hat{B}|$ гурвицев, т.е. эталонная модель выбирается заведомо устойчивой с некоторым значением максимального корня этого полинома $\hat{\lambda}_{\max} < 0$.

Для анализа влияния коэффициента k на устойчивость замкнутого контура адаптации представим матрицы объекта (3.59) в форме Фробениуса:

$$B = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{E}_{n-1} \\ -\mathbf{c} & \end{bmatrix}; \quad N = [0 \dots 0 \ 1]^T; \quad A = [b_0 \dots b_m \ \mathbf{0}], \quad (3.64)$$

где $[b_0 \dots b_m \ \mathbf{0}]$ и $\mathbf{c} = [c_0 \dots c_{n-1}]$ — соответственно коэффициенты полиномов числителя и знаменателя передаточной функции $W(s)$ объекта на Рисунке 3.33:

$$W(s) = \frac{y(s)}{q(s)} = A(sE - B)^{-1}N, \quad (3.65)$$

или

$$W(s) = \frac{B(s)}{C(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + c_{n-1} s^{n-1} + \dots + c_1 s + c_0}; \quad m < n. \quad (3.66)$$

Перепишав полином $|sE - B + NkA|$ с учётом (3.64), (3.65) и (3.66) получим:

$$\begin{aligned} |sE - B + NkA| &= s^n + c_{n-1} s^{n-1} + c_{n-2} s^{n-1} + \dots \\ &+ (c_m + b_m k) s^m + (c_{m-1} + b_{m-1} k) s^{m-1} + \dots + (c_1 + b_1 k) s + c_0 + b_0 k. \end{aligned} \quad (3.67)$$

Выражение (3.67) показывает, что одноуровневая сигнальная адаптация, применяемая к объекту (3.59) сопровождается увеличением исходных коэффициентов c_i его характеристического полинома до значений $c_i + b_i k$, ($i = 0 \dots m$). Обратим внимание, что такому изменению подвергаются не все, а только первые $m+1$ коэффициентов s .

Такое частичное и непропорциональное изменение коэффициентов исходного характеристического полинома $|sE - B|$ объекта в общем случае приводит к непредсказуемому перемещению собственных чисел матрицы $B - NkA$ в комплексной плоскости их значений, что вступает в противоречие со стремлением повысить качество адаптации путём увеличения k .

Несмотря на этот общий вывод, рассмотрим несколько конкретных случаев.

1) Объект первого порядка (интегратор).

Для такого объекта характеристический полином контура сигнальной адаптации имеет вид:

$$|sE - B + NkA| = s + b_0 k. \quad (3.68)$$

В этом случае контур адаптации при любых неотрицательных значениях k сохраняет свою устойчивость. Однако в результате введения контура адаптации интегрирующие свойства объекта теряются, и он приобретает свойства инерционного звена. В связи с этим анализ этого случая сводится к анализу объектов в виде инерционного звена (п. 2).

2) Объект первого порядка (инерционное звено).

Вид характеристического полинома контура сигнальной адаптации:

$$|sE - B + NkA| = s + c_0 + b_0k. \quad (3.69)$$

Коэффициент k обратной связи контура входит только в свободный член $c_0 + b_0k$ этого полинома, и всегда есть возможность выбора достаточно большого k , при котором выполняется неравенство $-(c_0 + b_0k) \ll \hat{\lambda}_{\max}$, т.е. схема адаптации обеспечит систему доминирующих корней своего характеристического полинома практически идентичную корням полинома $|sE - \hat{B}|$ эталонной модели в широком диапазоне изменения параметров c_0 и b_0 объекта.

3) Объект второго порядка.

Для объекта второго порядка характеристический полином контура сигнальной адаптации имеет два варианта реализации – для объекта с форсированием:

$$|sE - B + NkA| = s^2 + (c_1 + b_1k)s + c_0 + b_0k, \quad (3.70)$$

и для объекта без форсирования:

$$|sE - B + NkA| = s^2 + c_1s + c_0 + b_0k. \quad (3.71)$$

Воспользуемся аналитическим выражением для корней $s_{1,2}$ полинома (3.70):

$$s_{1,2} = -\frac{c_1 + b_1k}{2} \pm \sqrt{\frac{(c_1 + b_1k)^2}{4} - (c_0 + b_0k)}. \quad (3.72)$$

Из (3.72) следует, что для случая (3.70) выбор достаточно большого k обеспечивает доминирующее положение корням полинома $|sE - \hat{B}|$ эталонной модели без потери устойчивости контура адаптации.

В случае (3.71) $b_1 = 0$ и выражение (3.72) приобретает вид:

$$s_{1,2} = -\frac{c_1}{2} \pm \sqrt{\frac{c_1^2}{4} - (c_0 + b_0k)}, \quad (3.73)$$

из которого вытекает, что с ростом коэффициента k корни становятся комплексными, и их мнимая часть возрастает. На вещественную часть корней $s_{1,2}$ коэффициент k не влияет. Из этого следует, что с увеличением k частота собственных колебаний контура увеличивается, и может быть выведена за пределы рабочей области частот всей системы управления.

Устойчивость контура по-прежнему сохраняется при любом значении k .

Проанализируем возможность подавления резонансных частот контура в полной схеме адаптации для случая (3.71).

Передаточная функция полной схемы адаптации (Рисунок 3.33) имеет вид:

$$W_a(s, k) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{W(s)(k\hat{W}(s) + 1)}{1 + kW(s)}. \quad (3.74)$$

Предел выражения (3.74) при k , стремящимся к бесконечности:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} W_a(s, k) = \hat{W}(s) \quad (3.75)$$

указывает на принципиальную – теоретическую способность схемы на Рисунке 3.33 воспроизвести свойства эталонной модели.

Найдём количественную – практическую оценку значений k , при которых отмеченные выше резонансные колебания контура адаптации будут подавлены до заданного уровня, например, (-20) дБ.

Возьмём объект:

$$W(s) = \frac{1}{s^2 + 0.2s + 1} \quad (3.76)$$

с ярко выраженными колебательными свойствами (коэффициент демпфирования для этого объекта равен $0,1$), и эталонную модель:

$$\hat{W}(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \quad (3.77)$$

с вещественными корнями характеристического полинома, т.е. с монотонным характером переходного процесса на её выходе.

В результате подстановки (3.76) и (3.77) в (3.74) получим $W_a(s)$, и далее – частотные и переходные характеристики схемы адаптации для значений $k = 1 \dots 100$, Рисунки 3.34, 3.35.

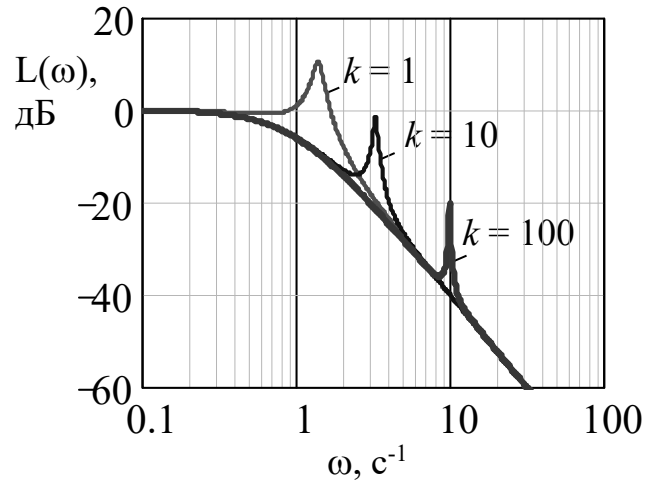


Рисунок 3.34 – Амплитудные частотные характеристики схемы адаптации для различных значений коэффициента k

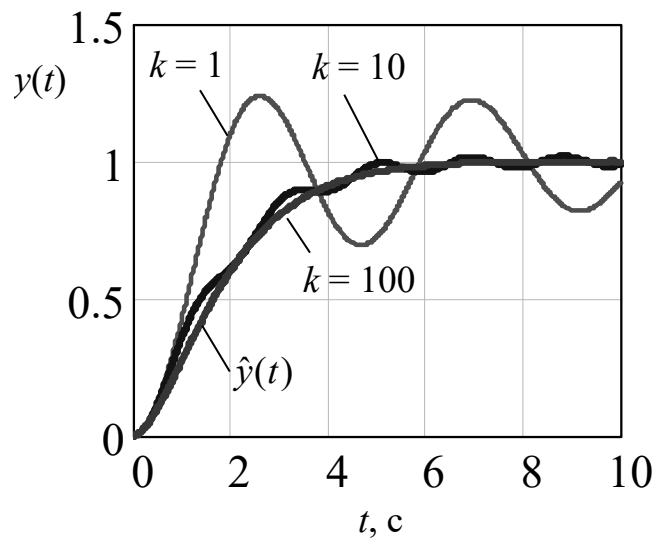


Рисунок 3.35 – Переходные характеристики схемы адаптации для различных значений коэффициента k

При значении $k = 100$ переходные характеристики схемы адаптации визуально совпадают с переходной характеристикой $\hat{y}(t)$ эталонной модели. Резонансный выброс в амплитудной частотной характеристике схемы не превышает значения (-20) дБ.

Таким образом, для объектов второго порядка рассматриваемая схема одноуровневой сигнальной адаптации может быть реализована со значениями

коэффициента k обратной связи контура адаптации без ограничений по критерию устойчивости.

4) Объект третьего порядка.

Для объекта третьего порядка характеристический полином контура сигнальной адаптации для варианта без форсирования имеет вид:

$$|sE - B + NkA| = s^3 + c_2s^2 + c_1s + c_0 + b_0k. \quad (3.78)$$

Наиболее сильным условием реализации этого варианта является условие устойчивости. По критерию Гурвица для (3.78) получаем:

$$c_2c_1 > c_0 + b_0k. \quad (3.79)$$

Условие (3.79) для нестационарного объекта является практически невыполнимым не только в силу априорно неизвестного изменения его параметров c_2, c_1, c_0, b_0 , но и в силу принципиального противоречия с принципом работы рассматриваемой схема сигнальной адаптации: повышение качества адаптации требует увеличения коэффициента k , но увеличение k затрудняет выполнение условия устойчивости (3.79).

Аналогичные трудности возникают и для вариантов объекта с форсированием.

Описанная ситуация в ряде случаев может быть смягчена тем обстоятельством, что в реальных объектах количество доминирующих корней характеристического полинома обычно невелико, и такого рода объекты можно рассматривать как динамические звенья второго и даже первого порядков.

Представленный анализ приводит к выводу о том, что для применения рассматриваемой схемы сигнальной адаптации необходимо из полного объекта высокого порядка физически выделить подобъекты первого и второго порядков, и для каждой их этих выделенных частей сформировать отдельную схему адаптации. Иными словами, устранить выявленную выше принципиальную ограниченность сигнальной адаптации можно, если использовать блочное представление объекта управления и построить соответствующую

многоуровневую схему сигнальной адаптации для каждого блока с динамическим порядком не выше второго.

Структура такой схемы для объекта третьего порядка показана на Рисунке 3.36.

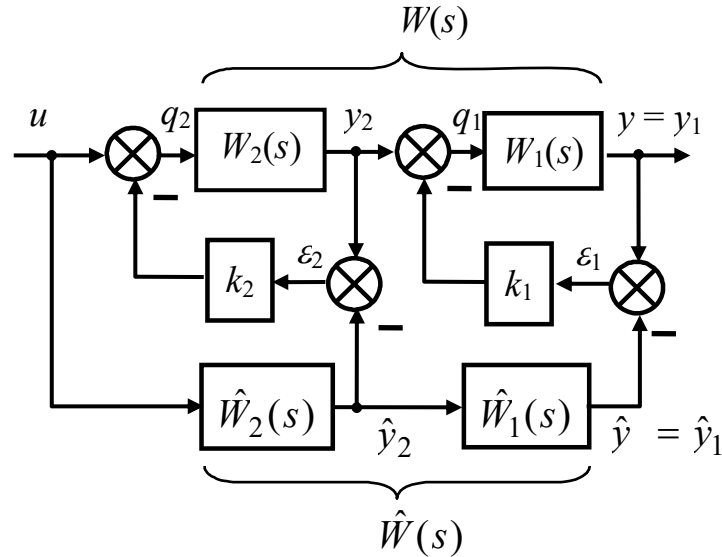


Рисунок 3.36 – Структурная схема системы двухуровневой сигнальной адаптации с явной эталонной моделью

На Рисунке 3.36 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.

Передаточная функция $\tilde{W}(s)$ структуры на рисунке 3.36 имеет вид:

$$\tilde{W}(s, k_1, k_2) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{W(s)(k_2\hat{W}_2(s) + 1)}{(1 + k_1W_1(s))(1 + k_2W_2(s))} + \frac{W_1(s)k_1\hat{W}(s)}{1 + k_1W_1(s)}. \quad (3.80)$$

Очевидно, что:

$$\lim_{\substack{k_1 \rightarrow \infty \\ k_2 \rightarrow \infty}} \tilde{W}(s, k_1, k_2) = \hat{W}(s). \quad (3.81)$$

Существенно, что многоуровневая сигнальная адаптация не является тривиальным последовательным соединением одноуровневых каскадов, в этом случае происходило бы накопление ошибки адаптации в каждом каскаде.

Как следует из Рисунка 3.36, взаимосвязи между уровнями адаптации разделены на два канала: эталонный канал в каждом каскаде формирует эталонные управления \hat{y}_2 и затем \hat{y}_1 независимо от истинного состояния объекта, т.е. без ошибки. Поэтому ошибка ε_2 , содержащаяся в сигнале y_2 , войдёт в сигнал q_1 , затем в ε_1 и будет компенсироваться вместе с собственной ошибкой первого уровня.

Уравнения движения младших уровней адаптации не могут быть описаны с помощью одной передаточной функции вида (3.74), а имеют вид, например, для Рисунка 3.36:

$$y(s, k_1) = \frac{W_1(s)}{1 + k_1 W_1(s)} y_2(s) + \frac{W_1(s) k_1 \hat{W}_1(s)}{1 + k_1 W_1(s)} \hat{y}_2(s). \quad (3.82)$$

С увеличением k_1 приходим к результату:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} y(s, k_1) = \hat{W}_1(s) \hat{y}_2(s), \quad (3.83)$$

который эквивалентен (3.75).

Представленная на Рисунке 3.36 схема двухуровневой сигнальной адаптации вследствие замыкания каждого каскада обратной связью, как уже отмечалось, не может содержать последовательно включённый интегратор. Поэтому схема Рисунка 3.36 не обладает свойствами астатизма, т.е. в ней всегда присутствует статическая ошибка между y и u .

Для устранения этой ошибки схему сигнальной адаптации следует охватить общей обратной связью, и включить в прямой канал системы регулятор с интегрирующим звеном (см. пример ниже).

Для числового примера будем использовать объект третьего порядка, который может быть разделён на два каскада – первого и второго порядков, причём в общем случае каскад второго порядка имеет комплексные корни характеристического полинома:

$$W(s) = \frac{b_0^1}{s + c_0^1} \cdot \frac{b_0^2}{s^2 + c_1^2 s + c_0^2}. \quad (3.84)$$

Значения нестационарных параметров объекта представлены в Таблице 3.5.

Таблица 3.5 – 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

Среднегеометрический диапазон R разброса параметров объекта:

$$R = \sqrt[5]{\frac{10}{0,2} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{0,2} \cdot \frac{0,2}{0,1} \cdot \frac{1}{0,1}} = 5,5.$$

В качестве эталонной модели выберем два звена соответственно первого и второго порядков с монотонными переходными характеристиками и общим временем регулирования $t_p = 6,4$ с:

$$\hat{W}(s) = \frac{1}{s+1} \cdot \frac{1}{s^2+2s+1}. \quad (3.85)$$

Переходные характеристики вариантов объекта и эталонной модели показаны на Рисунке 3.37 и демонстрируют существенные изменения свойств объекта при указанных в Таблице 3.5 изменениях параметров.

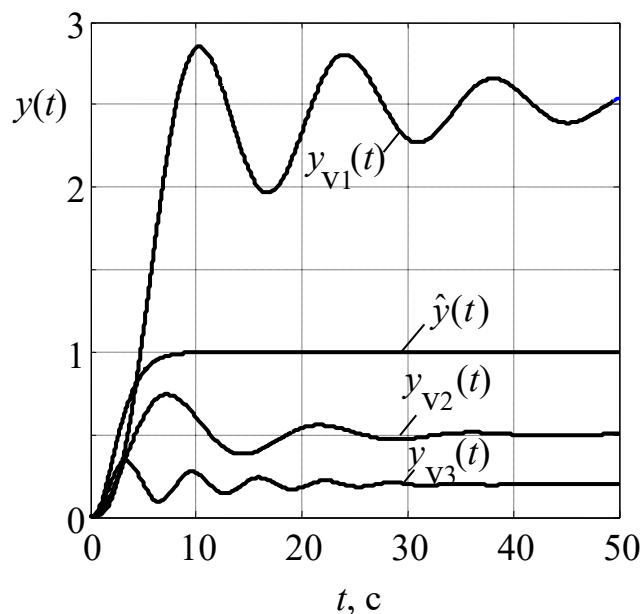


Рисунок 3.37 – Переходные характеристики вариантов объекта и модели

Реализуем схему двухуровневой сигнальной адаптации по Рисунку 3.36, в которой на основе проведённого выше анализа примем $k_1 = k_2 = 100$. Переходные процессы показаны на Рисунке 3.38.

Для наглядного сравнения на Рисунке 3.38 показан результат одноуровневой адаптации варианта v1 по схеме Рисунка 3.33. В этой схеме условие устойчивости (3.79) ограничивает коэффициент k варианта v1 критическим значением:

$$k < \frac{c_2 c_1 - c_0}{b_0} = \frac{0,3 \cdot 0,22 - 0,04}{0,1} = 0,26. \quad (3.86)$$

Для обеспечения запаса устойчивости в схеме одноуровневой адаптации выбрано значение $k = 0,15$.

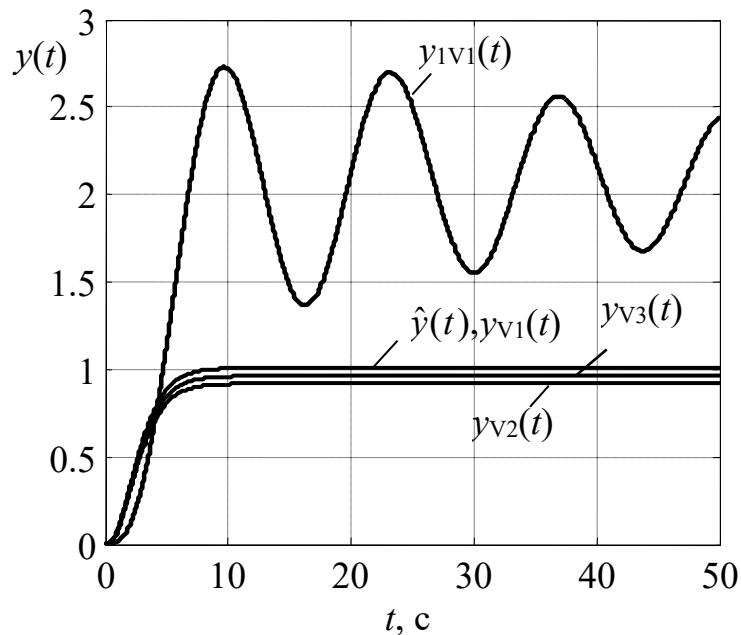


Рисунок 3.38 – Переходные характеристики для эталонной модели ($\hat{y}(t)$) и вариантов объекта в схемах одноуровневой ($y_{1v1}(t)$) и двухуровневой ($y_{v1}(t), y_{v2}(t), y_{v3}(t)$) сигнальной адаптации

Рисунок 3.38 подтверждает практическую непригодность одноуровневой адаптации для данного примера (этого следовало ожидать из-за чрезвычайно малого коэффициента $k = 0,15$), а также иллюстрирует высокое качество двухуровневой схемы адаптации.

В то же время на Рисунке 3.38 видно теоретически предсказанное существование статической ошибки величин $y_{v2}(t)$ и $y_{v3}(t)$ относительно эталонного процесса $\hat{y}(t)$.

С целью устранения этой ошибки охватим схему двухконтурной адаптации общей отрицательной обратной связью, и введём в систему регулятор с интегрирующим звеном, Рисунок 3.39:

$$W_p(s) = \frac{10(s+1)^3}{s(0,01s+1)^2}. \quad (3.87)$$

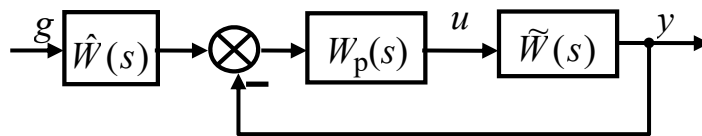


Рисунок 3.39 – Структурная схема астатической системы управления с сигнальной адаптацией

Переходные процессы в астатической системе управления показаны на Рисунке 3.40, и на доли процента отличаются от эталонного процесса для всех вариантов нестационарных параметров, указанных в Таблице 3.5.

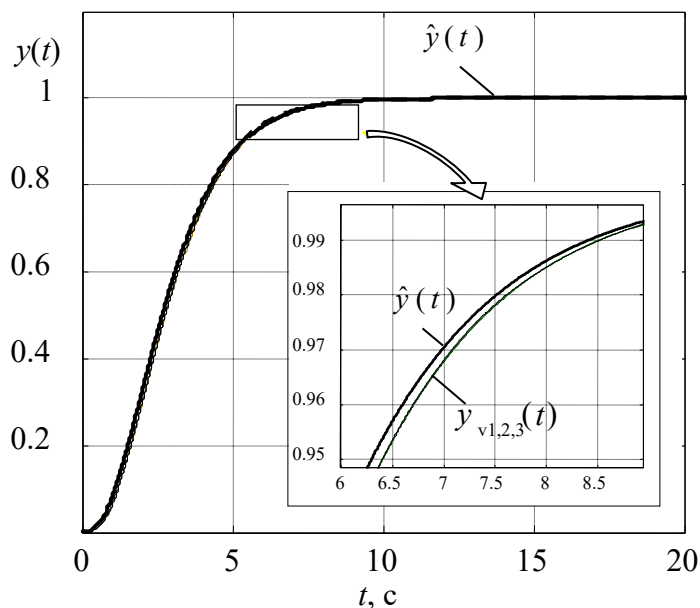


Рисунок 3.40 – Переходные процессы в полной системе управления с многоуровневой сигнальной адаптацией и дополнительным регулятором

Отметим, что время регулирования в полной системе управления соответствует заданному значению $t_p = 6,4$ с, см. Рисунок 3.40.

Результаты многоальтернативного синтеза и исследования системы сигнальной адаптации с явной эталонной моделью позволяют сделать следующие выводы:

традиционно считающийся узким рабочий диапазон сигнальной адаптации может быть существенно расширен, если нестационарный объект управления структурно и физически представить в виде последовательно соединённых каскадов с доминирующим динамическим порядком каждого из них не выше второго;

указанное представление объекта позволяет реализовать многоуровневую схему сигнальной адаптации, представляющую собою иерархически подчинённое соединение одноуровневых схем с двумя параллельными каналами: канал с каскадами объекта и канал с соответствующими каскадами эталонной модели. Такая организация уровней адаптации исключает накопление ошибок адаптации каждого каскада;

разделение схемы адаптации на части низкого порядка принципиально устраняет противоречие между качеством схемы адаптации и её устойчивостью;

результаты моделирования подтверждают высокое качество предложенной схемы сигнальной адаптации и демонстрируют, тем самым, конструктивный характер использованной в основе этой схемы эволюционной концепции многоальтернативности.

3.6 Многоагентные системы со стратегией магистрального движения

В сложных многоагентных системах необходимость многоальтернативного подхода к управлению определяется не только различием необходимых алгоритмов управления, но и различием целей этого управления для разных текущих состояний системы. При этом общей задачей управления является выведение системы из произвольного неравновесного состояния на некоторую

сбалансированную – магистральную траекторию движения с последующим её удержанием на этой траектории. Подразумевается, что всякое отклонение от магистральной траектории приводит к ухудшению качества многоагентной системы, и движение по этой траектории следует отнести к критическому режиму её функционирования.

В качестве наиболее наглядного примера рассмотрим задачу формирования траектории роста экономических показателей региона с помощью некоторых механизмов государственного управления процессами рыночного взаимодействия отраслей [177,274]. Поскольку объём ресурсов такого управления ограничен, то требуется решить задачу распределения этого объёма во времени между конкурирующими отраслями. При этом возникает многоальтернативность цели этого распределения: достижение общесистемной цели – развития региона и одновременно – сохранение конкурентного характера взаимодействия отраслей, т.е. создание таких условий каждому элементу экономической системы, отклонение от которых становится ему невыгодным [151,168,170,172]. В результате такого «открытого» управления обеспечивается согласование общецелевой функции и функций предпочтения каждой отрасли и, как следствие, максимальное приближение процесса развития региона к выбранной магистральной траектории [96,177].

Пусть состояние замкнутой расширяющейся экономической системы региона, содержащего n взаимосвязанных чистых отраслей, соответствует траектории своего развития, описываемой диагональной системой линейных уравнений [112,420]:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= B \cdot x(t) + H \cdot u(t); \\ y(t) &= (E - A) \cdot x(t); \\ e \cdot u(t) &= U, \end{aligned} \tag{3.88}$$

где x – валовой выпуск продукции отраслей, $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$; y – объёмы конечного потребления продукции отраслей, $y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T$; u – внешнее воздействие – инвестиции в отрасли, $u = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_n]^T$; B – характеристическая

диагональная матрица размером $[n \times n]$; H – диагональная матрица коэффициентов приростной капиталотдачи от инвестиций, $[n \times n]$; A – матрица коэффициентов прямых материальных затрат, $[n \times n]$; E – единичная матрица, $[n \times n]$; U – общий объём инвестиций в регион на рассматриваемом интервале времени; e – единичный вектор-строка, $[1 \times n]$.

Если известно начальное состояние системы $x_n(0)$, и на период времени T определён экономический горизонт её развития $x_k(T)$, то в условиях ограниченного общего объёма U инвестиций может быть сформировано множество траекторий $x(t)$ движения системы в пространстве её состояний, определяемое различным распределением инвестиций U по отраслям: $U = \sum_{i=1}^n u_i(t)$

Примем, что лучшей траектории соответствует наименьшее время T . Тогда система уравнений (3.88) будет описывать собою дифференциальную игру [86,250], в которой локально противоположные интересы каждого игрока в увеличении своей доли $u_i(t)$ ресурсов U в общем случае не обеспечивают движение по экстремальной (в смысле минимума T) траектории и требуется внешнее управление распределением общих ресурсов U по отраслям.

Для определения траектории $x^*(t)$, переводящей систему из состояния $x(0) = x_n$ в состояние $x(T) = x_k$ за минимальное время T сформулируем вариационную задачу:

$$T = \int_0^T 1 dt \rightarrow \min; \quad (3.89)$$

$$x(0) = x_n; \quad x(T) = x_k,$$

с ограничениями (3.88), составляющими совместно с (3.89) линейный функционал, содержащий функцию L Лагранжа:

$$\int_0^T L(x, u, \Lambda, \lambda) dt = \int_0^T [1 + \Lambda(\dot{x}(t) - B \cdot x(t) - H \cdot u(t)) + \lambda_{n+1}(e \cdot u(t) - U + u_{n+1}^2)] dt \rightarrow \min, \quad (3.90)$$

где $\Lambda = [\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n]$ и λ_{n+1} – неопределённые множители; $u_{n+1}(t)$ – дополнительная переменная.

Необходимым условием существования экстремалей $x^*(t)$ и $u^*(t)$ является выполнение системы уравнений Эйлера [321]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} &= 0; \\ \frac{\partial L}{\partial u_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{u}_i} &= 0; \\ i &= \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (3.91)$$

В силу линейности $L(x, u, \Lambda, \lambda)$ относительно u система (3.91) несовместна, т.е. экстремум функционала (3.90) достигается в классе кусочно-постоянных управлений $u_i(t) = u_i = \text{const}$, удовлетворяющих ограничению: $\sum_{i=1}^n u_i = U$.

Таким образом, вариационная задача (3.89) сводится к оптимизационной задаче поиска минимума времени T на конечном числе переменных u_i :

$$\begin{aligned} T_1(x_{н1}, x_{к1}, u_1) &\rightarrow \min; \\ \sum_{i=1}^n u_i &= U; \\ T_j(x_{нj}, x_{кj}, u_j) &\leq T_1(x_{н1}, x_{к1}, u_1); \\ j &= \overline{2, n}, \end{aligned} \quad (3.92)$$

где T_j – время движения координаты x_j из точки $x_{нj}$ в точку $x_{кj}$.

С целью иллюстрации решения (3.92) и определения вида экстремалей $x^*(t)$ рассмотрим случай с $n = 2$:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= ax_1 + bu_1; \\ \dot{x}_2 &= cx_2 + du_2; \\ x_1(0) &= x_{н1}; \\ x_2(0) &= x_{н2}. \end{aligned} \quad (3.93)$$

Решение (3.93) имеет вид:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \left(x_{H1} + \frac{b}{a} u_1 \right) e^{at} - \frac{b}{a} u_1; \\ x_2(t) &= \left(x_{H2} + \frac{d}{c} u_2 \right) e^{ct} - \frac{d}{c} u_2, \end{aligned} \quad (3.94)$$

который с учётом конечных условий $x_1(T_1) = x_{K1}$, $x_2(T_2) = x_{K2}$ позволяет определить выражения для T_i и сформулировать задачу математического программирования [109]:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{1}{a} \ln \left(\frac{x_{K1} + \frac{b}{a} u_1}{x_{H1} + \frac{b}{a} u_1} \right) \rightarrow \min; \\ T_2 &= \frac{1}{c} \ln \left(\frac{x_{K2} + \frac{d}{c} u_2}{x_{H2} + \frac{d}{c} u_2} \right); \\ T_2 &\leq T_1; \quad u_1 + u_2 = U. \end{aligned} \quad (3.95)$$

Решение (3.95) даёт значения u_1^* , u_2^* , обеспечивающие минимальное значение T_1 , причём этот минимум достигается при условии $T_2 = T_1$.

Подставляя u_1^* , u_2^* в (3.94) получим выражения для экстремалей $x_1^*(t)$, $x_2^*(t)$. Траектория $x^*(t)$ для числовых параметров $a = 0,8$; $b = 1,6$; $c = 4$; $d = 16$; $x_{H1} = 3$; $x_{H2} = 1$; $x_{K1} = 5$; $x_{K2} = 10$; $U = 1$, $T_1 = T_2 = 0,45$; $u_1^* = 0,81$; $u_2^* = 0,19$ представлен на Рисунке 3.41.

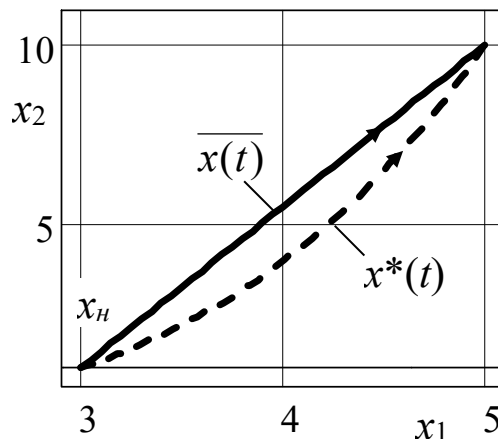


Рисунок 3.41 – Экстремали наискорейшего $x^*(t)$ и пропорционального $\bar{x}(t)$ роста

Использование экстремали $x^*(t)$ наискорейшего роста в качестве магистральной траектории привлекательно с точки зрения постоянства инвестиций ($u_i = \text{const}$) на заданном этапе развития и теоретической возможностью разомкнутого управления траекторией роста. Однако, принятые исходные предпосылки о линейности уравнений движения системы и постоянстве на интервале $[0, T]$ её параметров B, H, A не выполняются на практике.

В связи с этим, в качестве магистрали целесообразно рассмотреть траекторию пропорционального роста валового выпуска $\bar{x}(t)$ (см. Рисунок 3.41) опирающуюся на предпосылку о её формировании в условиях изменяющихся параметров системы на основе замкнутого принципа регулирования [10,18,106,115,149].

Таким образом, решение поставленной задачи будем рассматривать в следующей постановке:

магистральная траектория $\bar{y}(t)$ соответствует пропорциональному росту конечного потребления $y_i(t)$ продукции отраслей;

управляющими воздействиями являются инвестиции $u_i(t)$ в отрасли; общий объём инвестиций U ;

управление осуществляется на основе отклонений $\varepsilon(t) = y_m(t) - y(t)$ конечного потребления $y_i(t)$ от текущих магистральных значений $y_{m,i}(t)$, Рисунок 3.42.

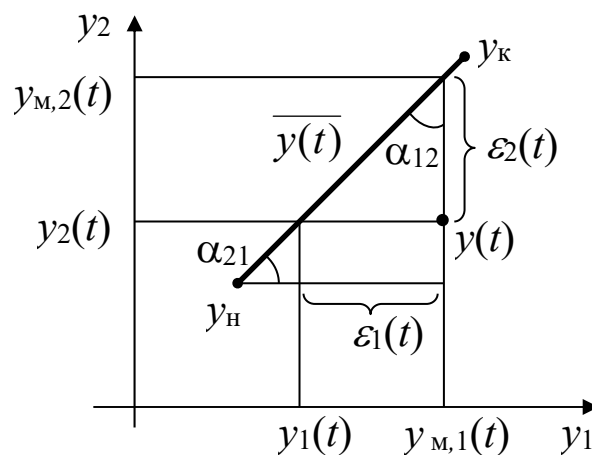


Рисунок 3.42 – Определение отклонения текущего состояния $y(t)$ системы от магистрали $\bar{y}(t)$

Траектория пропорционального развития при условии сохранения межотраслевого баланса:

$$y(t)=(E-A)x(t), \quad (3.96)$$

в силу линейности преобразования (3.96) отображается в эквивалентную траекторию $\bar{y}(t)$ в пространстве $y(t)$ конечного потребления.

Таким образом, можно поставить задачу разработки алгоритма управления инвестициями $u_i(t)$, обеспечивающими пропорциональный сбалансированный рост конечного потребления $y_i(t)$ продукции отраслей $i = \overline{1, n}$.

В теории управления эта задача сводится к регулированию относительного движения в многоагентной системе [170,172], содержащей n одномерных агентов с текущими координатами $y_i(t)$, каждая из которых стремится в результате управления к своему магистральному значению:

$$y_{m,i}(t) = y_{n,i} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} \left(\frac{y_j(t) - y_{n,j}}{n-1} \alpha_{ij} \right), \quad (3.97)$$

где α_{ij} – коэффициент пропорционального развития:

$$\alpha_{ij} = \frac{y_{k,i} - y_{n,i}}{y_{k,j} - y_{n,j}},$$

y_n, y_k – начальные и конечные значения потреблений, получаемые из векторов x_n и x_k с помощью соотношения (3.96).

Вычисляя отклонение от магистрали в виде (Рисунок 3.42):

$$\varepsilon(t) = y_m(t) - y(t), \quad (3.98)$$

мы можем перейти к формированию управляющих воздействий $u_i(t)$.

Учитывая, что $\varepsilon(t)$ содержит, по меньшей мере, линейно изменяющуюся во времени компоненту, остановимся на управлении с пропорциональной и интегрирующей составляющими:

$$u(t) = k_1 \varepsilon(t) + k_2 \int \varepsilon(t) dt, \quad (3.99)$$

где k_1, k_2 – постоянные коэффициенты, определяющие вклад в управление указанных составляющих.

Поскольку реальное планирование и выделение инвестиций реализуется поэтапно, через определённые интервалы времени, то процедура управления может носить дискретный характер:

1. К моменту t_m окончания текущего временного интервала $[t_{m-1}, t_m]$ для всех отраслей i определяется текущее расстояние $\varepsilon_i(t_m)$.

2. Для ближайшего интервал планирования $[t_m, t_{m+1}]$ находятся значения инвестиций $u_i(t_{m+1})$ в каждую отрасль:

$$u_i(t_{m+1}) = k_1 \varepsilon_i(t_m) + k_2 \sum_{p=1}^m \varepsilon_i(t_p). \quad (3.100)$$

Отметим, что реализация магистрального управления возможна при достаточно большом объёме U инвестиций региона.

Для численной проверки изложенного алгоритма магистрального управления воспользуемся следующей математической моделью экономической системы региона [113,419,420]:

Положим, что экономическая система региона содержит $i = \overline{1, n}$ взаимосвязанных производственных отраслей, конкурирующих между собою в привлечении внешних инвестиций $u_i(t)$, объём которых на текущем временном интервале t является ограниченным: $\sum_{i=1}^n u_i(t) = u(t)$.

Взаимосвязь валовой продукции $x_i(t)$ отраслей определяется уравнением межотраслевого баланса [145]:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}(t) x_j(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t) \sum_{j=1}^n a_{ji}(t), \quad (3.101)$$

в котором $a_{ij}(t)$ – компоненты технологической матрицы A ; $\sum_{j=1}^n a_{ij}(t)x_j(t) = z_i(t)$ –

потребление на производственные нужды; $x_i(t) \sum_{j=1}^n a_{ji}(t) = s_i(t)$ – промежуточная

продукция.

Величина $y_i(t) = x_i(t) - z_i(t)$ определяет собою конечное потребление, для которого может быть установлено некоторое текущее максимальное значение $y_{\max,i}(t)$.

Введённые обозначения позволяют перейти к построению модели рассматриваемой системы как совокупности n конкурирующих агентов, изменяющих выпуск $x_i(t)$ своей продукции во времени:

$$\dot{x} = F(x, z, y, s, y_{\max}, u). \quad (3.102)$$

В общем случае F является нелинейным преобразованием.

Ограничимся линейным приближением в виде:

$$\dot{x}_i(t) = b_i x_i(t) + h_i u_i(t), \quad (3.103)$$

содержащем b_i и h_i – коэффициенты роста объёма валовой продукции $x_i(t)$ и отдачи от инвестиций $u_i(t)$.

Конкурирующие способности отраслей в выделении каждой из них доли $u_i(t)$ от общих инвестиций $u(t)$, выразим через показатели $d_i(t)$, вычисляемые в виде отношения объёмов чистой и валовой продукции:

$$d_i(t) = \frac{x_i(t) - s_i(t)}{x_i(t)}. \quad (3.104)$$

В результате значения вектора $u(t)$ внешнего воздействия на экономическую систему определяются в виде:

$$u_i(t) = \frac{d_i(t)}{\sum_{j=1}^n d_j(t)} u(t). \quad (3.105)$$

Помимо инвестиций, распределяемых на конкурсной основе, в модель целесообразно ввести директивные составляющие $u_{д,i}(t)$ инвестиций:

$$u_i(t) = \frac{d_i(t)}{\sum_{j=1}^n d_j(t)} \left(u(t) - \sum_{j=1}^n u_{д,j}(t) \right) + u_{д,i}(t). \quad (3.106)$$

Показатели конкурентоспособности $d_i(t)$ выполняют функции мультипликаторов для параметров b_i модели (3.103), которая с учётом (3.106) получит вид:

$$\dot{x}_i(t) = b_i d_i(t) x_i(t) + h_i \left[\frac{d_i(t)}{\sum_{j=1}^n d_j(t)} \left(u(t) - \sum_{j=1}^n u_{д,j}(t) \right) + u_{д,i}(t) \right]. \quad (3.107)$$

Дальнейшее уточнение модели (3.107) осуществим введением мультипликатора неудовлетворённого спроса:

$$m_{c,i}(t) = 1 - \frac{y_i(t)}{z_i(t) + y_{\max,i}(t)}, \quad (3.108)$$

и ограничителя спроса:

$$g_{c,i}(t) = 1 - \frac{y_i(t)}{y_{\max,i}(t)}. \quad (3.109)$$

С учётом (3.108) и (3.109) получим:

$$\dot{x}_i(t) = [b_i d_i(t) m_{c,i}(t) x_i(t) + h_i \left[\frac{d_i(t)}{\sum_{j=1}^n d_j(t)} \left(u(t) - \sum_{j=1}^n u_{д,j}(t) \right) + u_{д,i}(t) \right]] \cdot g_{c,i}(t). \quad (3.110)$$

Введём в полученную модель возможность существования в регионе дотационных отраслей с объёмом продукции $x_i(t)$, который поддерживается на некотором малом, но обязательном значении $y_{\min,i}(t)$. В том случае, если выполнится равенство $x_i(t) - y_{\min,i}(t) = z_i(t)$, отрасль i будет являться

критической отраслью, сдерживающей развитие всех смежных отраслей $j \neq i$. Указанное ограничивающее влияние дотационных отраслей учтём в модели множителями $g_{n,i}(t)$:

$$g_{n,i}(t) = \left[\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left(1 - \frac{y_{\min,j}(t)}{x_j(t) - z_j(t)} \right) \right]^{\frac{\beta}{n-1}}. \quad (3.111)$$

Значение множителя $g_{n,i}(t)$ снижается по мере отставания выпуска $x_j(t)$ от потребления $z_j(t)$; β – вес влияния множителя $g_{n,i}(t)$.

После введения (3.111) в (3.110) итоговое выражение для дифференциального уравнения экономической системы примет окончательный вид:

$$\dot{x}_i(t) = \left[b_i d_i(t) m_{c,i}(t) x_i(t) + h_i \frac{d_i(t)}{\sum_{j=1}^n d_j(t)} \left(u(t) - \sum_{j=1}^n u_{д,j}(t) \right) + u_{д,i}(t) \right] \cdot g_{c,i}(t) g_{n,i}(t). \quad (3.112)$$

Отметим, что дифференциальные уравнения (3.112) содержат в правой части валовые продукции $x_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ каждой отрасли и позволяют описывать экономику региона как систему взаимодействующих агентов, управление которыми должно обеспечивать их согласованное развитие.

В построенной модели в качестве внешних, управляющих воздействий на экономику региона выделены:

- директивные составляющие инвестиций $u_{д,i}(t)$;
- инвестиции, распределяемые на конкурентной основе: $u(t) - \sum_{j=1}^n u_{д,j}(t)$;
- максимальные значения конечного потребления $y_{\max,i}(t)$, изменяемые посредством государственных закупок.

Проверка работоспособности алгоритма управления проводилась при следующих числовых параметрах модели для $n = 3$:

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1,5 \end{bmatrix}; \quad H = \begin{bmatrix} 1 \\ 1,5 \\ 1,2 \end{bmatrix}, \quad y_{\max} = \begin{bmatrix} 2 \\ 2,5 \\ 4 \end{bmatrix};$$

$$D(t) = e^T - A^T e^T; \quad A = \begin{bmatrix} 0,1 & 0,3 & 0,1 \\ 0,5 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,4 & 0,1 \end{bmatrix}; \quad y_{\min} = \begin{bmatrix} 0,2 \\ 0,1 \\ 0,3 \end{bmatrix}$$

$$k_1 = 500; k_2 = 100.$$

На Рисунке 3.43 показаны траектории движения системы при различных значениях общего объёма U инвестиций.

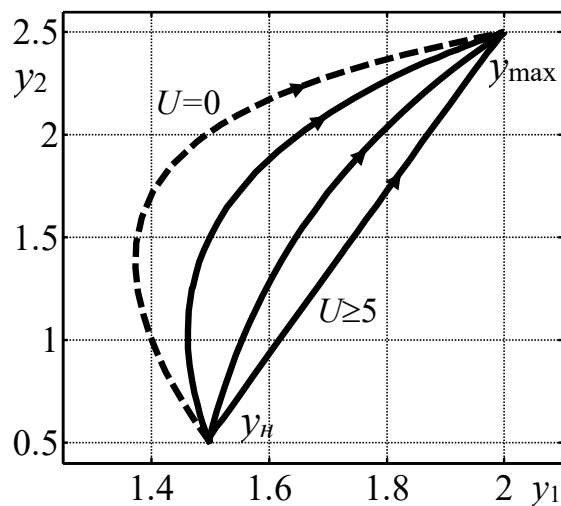


Рисунок 3.43 – Влияние общего объёма U инвестиций на траекторию движения

При $U \geq 5$ траектория становится магистральной. Этот рисунок иллюстрирует также отличие регулируемого пропорционального роста (траектории, изображённые сплошными линиями) от развития в условиях неуправляемого взаимодействия отраслей (штриховая линия).

На Рисунке 3.44 показаны соответствующие Рисунку 3.43 результаты магистрального управления тремя отраслями при движении системы из y_n в y_{\max} при $U = 6$.

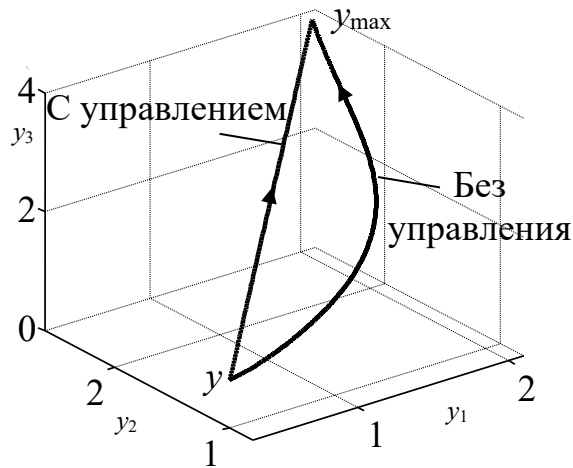


Рисунок 3.44 – Иллюстрация магистрального управления тремя отраслями

Рисунок 3.45 позволяет визуально оценить работоспособность алгоритма (3.97)-(3.100) при изменении матрицы A коэффициентов прямых материальных затрат происходящем, например, в результате инновационной деятельности первой отрасли по сокращению производственных расходов (коэффициент a_{21} изменяется со значения 0,5 до 0,4).

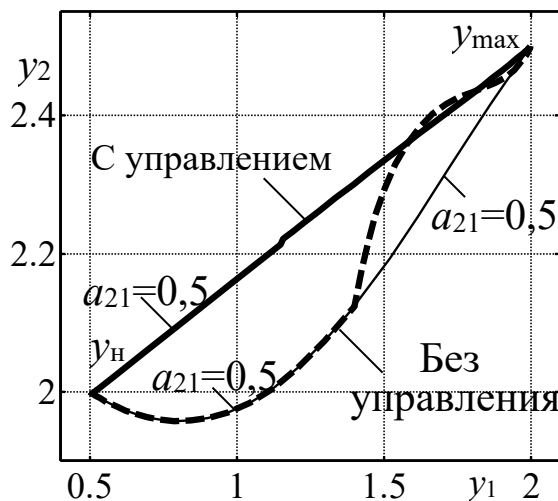


Рисунок 3.45 – Изменения управляемой и неуправляемых траекторий движения системы под влиянием инновационной деятельности отраслей: тонкая сплошная линия – для $a_{21} = 0,5$ без внешнего управления; штриховая линия – для изменившегося коэффициента a_{21} со значения 0,5 на значение 0,4 также при отсутствии внешнего управления

Отметим, что без внешнего управления (штриховая линия) в системе наблюдаются существенные изменения (неравномерность) в темпах развития отраслей.

На Рисунке 3.46 показано движение системы из начального состояния $x_1(0) = 2, x_2(0) = 1,5$, существенно отклонившегося от магистральной траектории, при этом управление на конкурсной основе сравнительно медленно возвращает систему к магистрали (примерно за 7,5 модельных единиц времени).

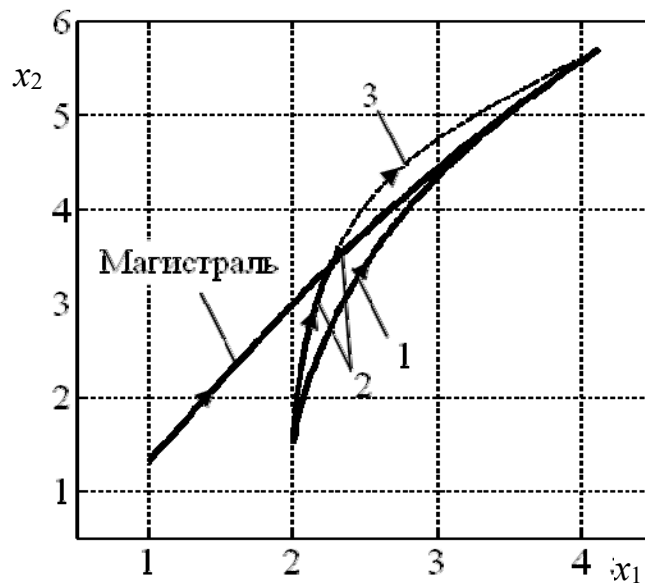


Рисунок 3.46 – Траектории развития отраслей региона при различных управлениях:

- 1 – управление на конкурсной основе; 2 – многоальтернативное управление (директивное – на начальном этапе, и конкурсное – на магистральном участке);
- 3 – избыточное директивное управление, отклоняющее систему от магистрали

Директивное введение в отрасль 2 инвестиций $u_{д2}(t)$ позволило быстро (за 1,5 единицы времени) вывести систему на магистральную траекторию, после чего распределение инвестиций уже на конкурсной основе обеспечило движение экономической системы по магистрали.

Рассмотренный выше алгоритм многоальтернативного управления можно представить как иерархическую структуру, содержащую два альтернативных уровня – варианта управления: нижний уровень, соответствующий

конкурентному распределению инвестиций, и верхний уровень, определяемый директивным введением инвестиций или увеличением государственных закупок.

Цели управления на каждом уровне также различны: на нижнем уровне ставится цель равномерного и согласованного развития отраслей вдоль магистральной траектории в процессе конкурентного взаимодействия, а в тех случаях, когда по каким-либо причинам это развитие отклонится от магистрального, осуществляется переход к директивному управлению с целью возвращения к магистрали.

Выводы по главе 3

1. Предложенная система многоальтернативного управления многорежимным процессом тепловлажностной обработки бетона основана на принципе разделения функций подачи пара между исполнительными устройствами в каждом режиме, и позволяет уменьшить ошибки регулирования и существенно повысить надёжность системы.

2. Проведённый синтез адаптивного наблюдателя с разделением движений и его сравнение с классической схемой Луенбергера показали, что в результате такого разделения достигается многократное уменьшение ошибки наблюдения координат нестационарного объекта.

3. Разработанная методика синтеза робастного модального регулятора с использованием принципа многоальтернативности и разделения функций позволяет решить следующие задачи проектирования и обеспечения качества системы:

– разделение собственных чисел характеристической матрицы системы на части, одна из которых формирует требуемый монотонный характер переходного процесса в системе, а другая обеспечивает свойство грубости модальному регулятору;

– разделение процедур синтеза наблюдателя координат и модального регулятора таким образом, что регулятор и наблюдатель проектируются независимо друг от друга;

– разделение задачи обеспечения грубости управления, решаемой модальным регулятором, и задачи обеспечения точности и быстродействия системы, решаемой простейшим пропорционально-интегральным регулятором

4. Представленный в главе анализ режимов работы автономной системы электроснабжения космической станции показывает, что живучесть рассматриваемой системы достигается в результате применения эволюционных принципов многоальтернативного управления:

– многоуровневости, создающей многообразие поведенческих стратегий системы путём передачи управления и распределения функций электроснабжения между подсистемами и в каждой из них в зависимости от текущей ситуации;

– модульности, многократно снижающей возможность каскадного (технологически связанного) развития аварийной ситуации и отказа;

– разделения функций, обеспечивающего устойчивую многорежимную работу организованных каналов управления с узкими функциональными назначениями.

На основе этих принципов реализуется активное перенаправление энергетических и информационных потоков системы и изменение стратегии функционирования её подсистем в критических ситуациях.

5. Построенные на основе принципов многоальтернативности модели систем адаптивной идентификации нелинейных объектов дают 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 подзадачи малой размерности и для организации параллельных вычислений в реальном масштабе времени;

– построить систему обратной нелинейной коррекции с двумя отдельными моделями, одна из которых выполняет функцию идентификации параметров системы, а другая – собственно процесс нелинейной коррекции.

6. Применение принципов многоальтернативности для синтеза системы сигнальной адаптации позволило получить следующие результаты:

– традиционно считающийся узким рабочий диапазон сигнальной адаптации может быть существенно расширен, если нестационарный объект управления структурно и физически представить в виде последовательно соединённых каскадов с доминирующим динамическим порядком каждого из них не выше второго;

– указанное представление объекта позволяет реализовать многоуровневую схему сигнальной адаптации, представляющую собою иерархически подчинённое соединение одноуровневых схем с двумя параллельными каналами: канал с каскадами объекта и канал с соответствующими каскадами эталонной модели. Такая организация уровней адаптации исключает накопление ошибок адаптации каждого каскада;

– разделение схемы адаптации на части низкого порядка принципиально устраняет противоречие между качеством схемы адаптации и её устойчивостью.

7. Изложенный в главе алгоритм многоальтернативного управления, построенный на примере многоагентной экономической системы, представляет собою иерархическую структуру, содержащую два альтернативных уровня – варианта управления: нижний уровень, соответствующий конкурентному распределению инвестиций, и верхний уровень, определяемый директивным введением инвестиций или увеличением государственных закупок.

Цели управления на каждом уровне также различны: на нижнем уровне ставится цель равномерного и согласованного развития отраслей вдоль магистральной траектории в процессе конкурентного взаимодействия, а в тех

случаях, когда по каким-либо причинам это развитие отклонится от магистрального, осуществляется переход к директивному управлению с целью возвращения к магистрали.

Предложенный алгоритм многоальтернативного управления многоагентной системой позволяет быстро возвращать её из произвольного неравновесного состояния на магистральную траекторию сбалансированного развития.

Основные материалы данной главы изложены в работах [46,47,48,54,55,63,112,113,185,202,203,210,212,215,216,220,221,224,225,231,239, 242,243,280,406,409,415,419,420,421,428,449].

ГЛАВА 4. МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В СТОХАСТИЧЕСКИХ И ХАОТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С КРИТИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ

Существенной ограниченностью систем с детерминированным выбором управления (глава 3) является их «неприспособленность» к самоорганизации структуры, необходимость в которой возникает при непредвиденных перестройках в объекте, приводящих, например, к изменению его динамического порядка, топологии и знаков причинно-следственных связей. Многообразие таких перестроек может быть настолько большим, что заранее установить детерминированное соответствие некоторого управления каждому из этих состояний становится невозможным. В настоящей главе будет рассмотрена модель такой системы, имитирующей возникновение свойства гомеостазиса в живых организмах.

Кроме того, будет предложена модель марковской системы многоальтернативного управления с большим количеством состояний и случайными переходами между этими состояниями, а также продемонстрированы приёмы многоальтернативного управления в системах с хаотическими режимами.

4.1 Гомеостатические системы со случайным управлением

В биологических системах процесс гомеостазиса (от греч. ὅμιος – равный и στάσις – состояние) реализуется путём многоуровневого регулирования, последовательно использующего альтернативные ресурсы системы по мере удаления объекта от заданного состояния.

Оперируя понятием пространства состояний, можно сформулировать следующую общую стратегию гомеостатической стабилизации искусственных систем: при отклонениях изображающей точки $x = [x_1 \ x_2 \dots x_n]^T$ системы от положения равновесия, не выходящих за пределы некоторой допустимой области Ω , состояние стабильности обеспечивается параметрически соответствующей

локальной подсистемой; при недостаточности ресурсов управления локальной подсистемы изображающая точка достигает границы области Ω , т.е. возникает критический режим, и в процесс стабилизации включаются другие подсистемы, обладающие, в своей совокупности, всеми ресурсами многомерного управления [209,211]. В результате взаимосвязанного действия этих подсистем происходят значительные внутренние перестройки структуры системы, которые удерживают переменные состояния в заданной области Ω . Схематично (для двух вариантов структур) такие переходы от структуры S_1 к структуре S_2 показаны на Рисунке 4.1.

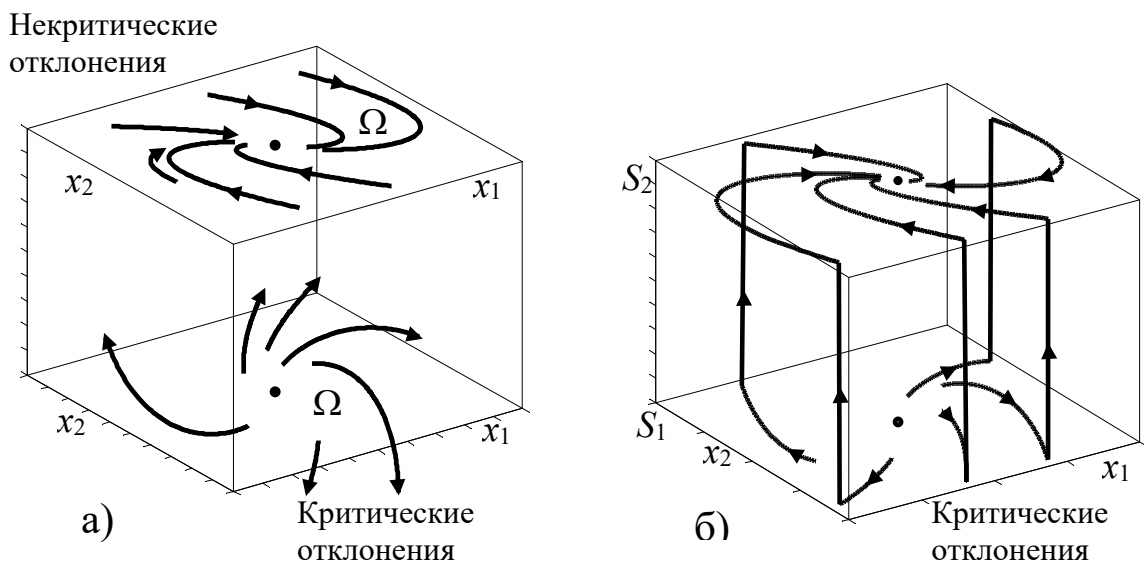


Рисунок 4.1 – Представление многоуровневого управления

процессом: а) параметрический уровень;

б) структурный уровень – переход от структуры S_1 к структуре S_2

В соответствии с классификацией [200] такие системы следует отнести к классу многоальтернативных систем управления, поскольку при достижении системой критического режима (границы области Ω) подключается альтернативный – иерархически более высокий уровень стабилизации системы, обладающий, в свою очередь, множеством альтернативных вариантов внутрискруктурных связей, при этом стохастический характер управления делает траекторию приведения изображающей точки системы в заданную область Ω непредсказуемой, т.е. реализуется дополнительное разнообразие робастного

управления недетерминированного характера на уровне вынужденных движений системы в рамках текущего варианта структуры.

Построим модель такой системы, и проведём количественное исследование ожидаемого свойства её ультрастабильности в результате многоальтернативного управления.

Простейшее устройство, реализующее изложенный выше способ стабилизации без использования памяти, предложено У. Эшби [322,323] и названо гомеостатом. Это название распространилось в настоящее время на все искусственные системы, в том числе и с памятью, имитирующие биологический принцип стабилизации.

Рассмотрим имитационную модель гомеостата [60,204], состоящего из четырёх локальных подсистем $\text{Subsystem1}, \dots, \text{Subsystem4}$, Рисунок 4.2. Выход каждой из них определяет соответствующую компоненту управления $u = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T$, поступающего последовательно через пропорциональное и ограничивающее звенья на вход многомерного объекта:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu; \\ y = Cx + Du, \end{cases} \quad (4.1)$$

в котором x – вектор состояния (использовался объект 16-го порядка) $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{16}]^T$; y – вектор регулируемых величин, значения которых требуется поддерживать в определённых пределах Ω , $y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_4]^T$; A – характеристическая матрица диагонального вида, $[A] = [16 \times 16]$, например: $\text{diag}A = [-10, -1, -2, -2, -5, -7, -1, -2, -3, -1, -5, -3, -2, -1, -1, -4]$; матрицы B и C обеспечивают наличие полного набора внутренних перекрёстных связей в объекте, а также управляемость и наблюдаемость системы; $D=0$. Канал ввода возмущения f (см. Рисунок 4.2), реализован в модели аналогичной системой уравнений 16-го порядка, но с другими коэффициентами.

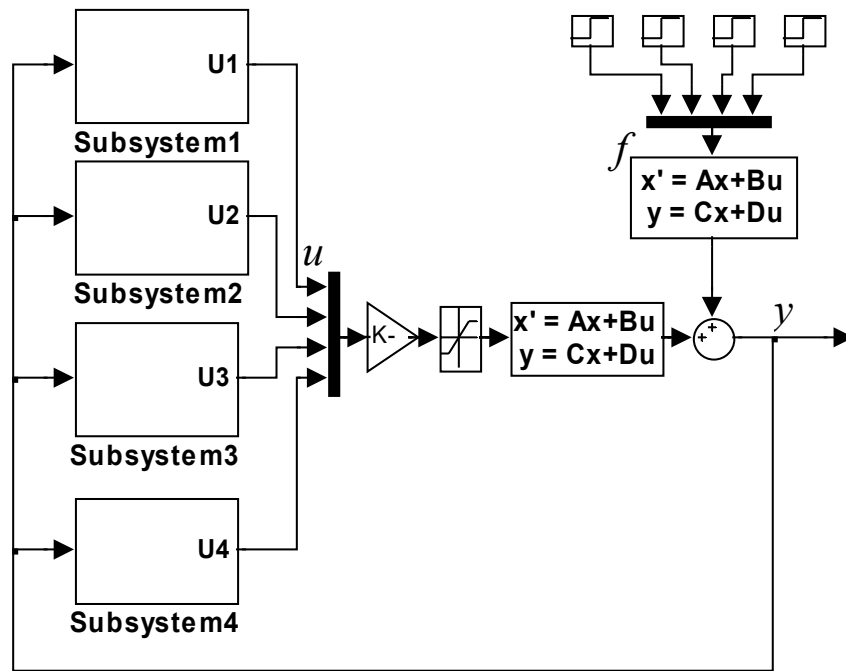


Рисунок 4.2 – Общая структура многомерной системы

Локальная подсистема управления Subsystem(i) (Рисунок 4.3) содержит четыре стохастических мультипликатора $M_{i,j}$, $j = 1, \dots, 4$, каждый из которых осуществляет умножение текущего значения регулируемой величины $y_j(t)$ на случайную величину $\xi_{i,j}(t)$, равномерно распределённую на отрезке $\xi_{i,j}(t) = [-\xi_{i,j,\max}, \xi_{i,j,\max}]$. При этом подсистема может находиться в одном из трёх состояний:

- если $y_i \in \omega$, ($\omega = [-3; 3]$), то все мультипликаторы умножают $y_j(t)$ на некоторые постоянные числа $\xi_{i,j}$, о текущем выборе которых будет сказано ниже. В этом режиме состояние объекта близко к заданному, и случайные вариации управления не требуются;

- если $y_i \notin \omega$, но $y_i \in \Omega$, ($\Omega = [-5; 5]$), то мультипликатор $M_{i,i}$ использует случайные значения $\xi_{i,i}(t)$, т.е. в системе по сравнению с предшествующим режимом дополнительно начинает действовать локальная стохастическая стабилизация по регулируемой величине y_i . Такой режим возникает при приближении регулируемой величины y_i к допустимой границе области Ω ;

- если $y_i \notin \Omega$, то все мультипликаторы $M_{i,j}$, $j = 1, \dots, 4$, участвуют в стохастической стабилизации с использованием полного вектора $y(t)$. В этом режиме при управлении используются перекрёстные связи многомерной системы.

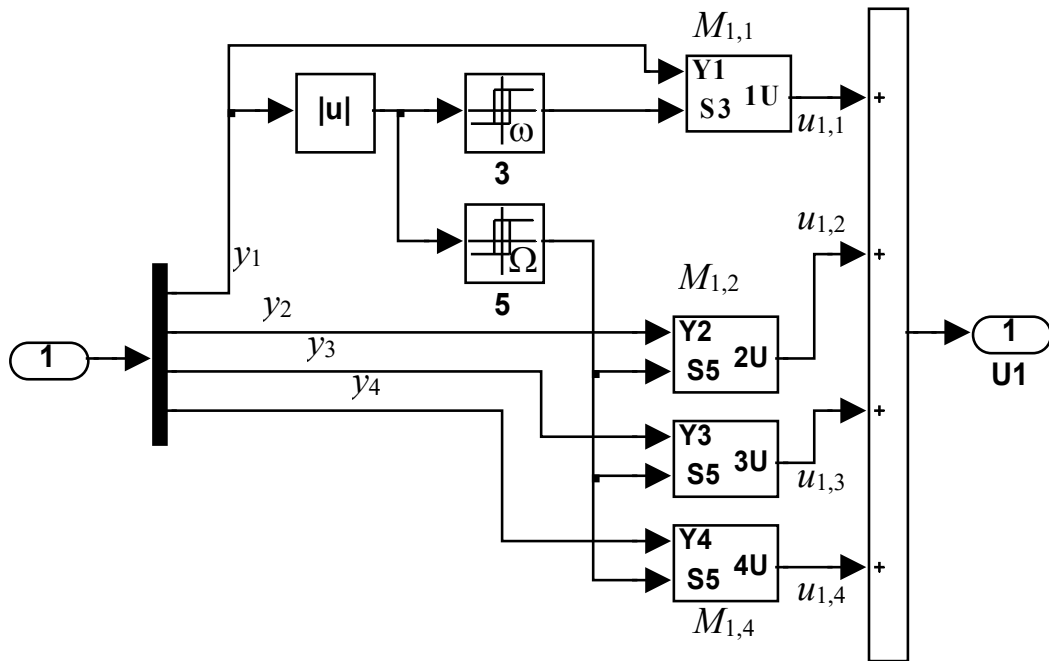


Рисунок 4.3 – Структурная схема локальной подсистемы управления Subsystem1

В итоге можно записать общее выражение для управления $u_i(t)$ по полному вектору $y(t)$:

$$u_i(t) \Big|_{y_i \notin \Omega} = \sum_{j=1}^4 u_{i,j}(t) \Big|_{y_i \notin \Omega} = \sum_{j=1}^4 y_i(t) \cdot \xi_{i,j}(t). \quad (4.2)$$

Как только в результате управления в момент времени $t_{\Omega,i}$ выполнится условие $y_i \notin \omega$ и $y_i \in \Omega$, т.е. величина y_i возвратится в область Ω , генераторы случайных чисел, входящие в мультипликаторы $M_{i,j}$, $j \neq i$, отключаются, запоминая на своём выходе значения $\xi_{i,j}(t_{\Omega,i})$, $j \neq i$. Аналогичное сохранение значений $\xi_{i,i}(t_{\omega,i})$ реализуется в моменты $t_{\omega,i}$ при вхождении регулируемой величины y_i в область ω : $y_i \in \omega$.

Таким образом, в режимах локальной стабилизации управление имеет вид:

$$u_i(t > t_{\Omega,i}) \Big|_{\substack{y_i \notin \omega \\ y_i \in \Omega}} = y_i(t) \cdot \xi_{i,i}(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^4 y_i(t) \cdot \xi_{i,j}(t_{\Omega,i}), \quad (4.3)$$

$$u_i(t > t_{\omega,i}) \Big|_{y_i \in \omega} = y_i(t) \cdot \xi_{i,i}(t_{\omega,i}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^4 y_i(t) \cdot \xi_{i,j}(t_{\Omega,i}). \quad (4.4)$$

В изложенном алгоритме управления количество N альтернативных структур, возникающих в процессе регулирования, определяется выражением:

$$N = \sum_{k=0}^4 C_4^k \cdot 2^k = 81,$$

и, как будет показано ниже, обеспечивает грубость системы.

Первоначальному исследованию подлежало собственное движение системы после снятия внешнего воздействия из произвольного исходного состояния, не входящего в допустимую область Ω , в начало координат $y = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$.

На Рисунке 4.4 показано изменение вектора управления $u(t)$ в координатах (u_1, u_3, u_4) , для которого характерны первоначально большие значения, в том числе достигающие границ области $|u_i| \leq 5$. Приближение системы к началу координат сопровождается переходом к локальной стабилизации с меньшими случайными вариациями управления, и при попадании вектора $y(t)$ в область ω управление приобретает детерминированный непрерывный характер (заключительный участок траектории на Рисунке 4.4).

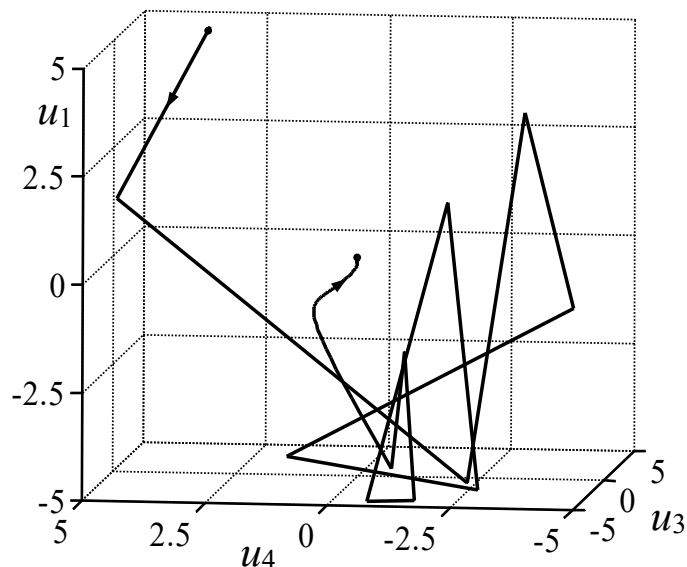


Рисунок 4.4 – Характер управления при движении системы после снятия внешнего возмущения

На Рисунке 4.5 указанное собственное движение величин y_1, \dots, y_4 занимает интервал времени 1,5...2 с.

Иллюстрация стабилизирующих свойств многоальтернативного управления даётся на примере обработки системой ступенчатых возмущающих воздействий $f = [f_1 \dots f_4]^T$, поступающих в моменты времени 5, 10, 15 и 20 с соответственно.

Реакция неуправляемого объекта на эти возмущения приводит к поочерёдному выходу из области Ω всех компонент регулируемого вектора y (Рисунок 4.5, маркер 1).

В замкнутой системе в этом случае после завершения переходного процесса наблюдается стабилизация положения равновесия системы в заданных областях $\Omega = [-5; 5]$ и $\omega = [-3; 3]$ (Рисунок 4.5, маркер 2).

При изменении собственных значений характеристической матрицы A объекта в несколько раз система сохраняет свои стабилизирующие свойства, что подтверждает гомеостатические свойства иерархического управления.

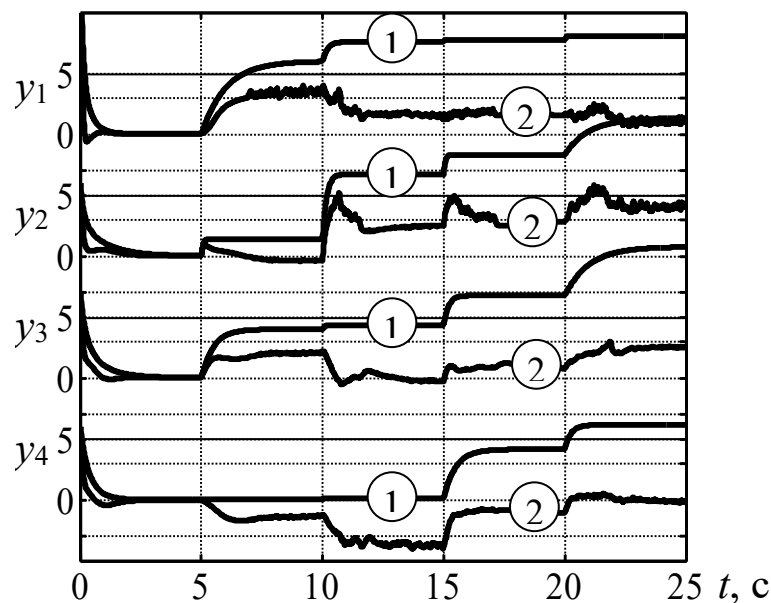


Рисунок 4.5 – Иллюстрация стабилизирующих свойств системы

Работоспособность системы и реализация в ней гомеостатических свойств были обеспечены в наиболее неблагоприятных с кибернетической точки зрения условиях равновероятного выбора альтернативного варианта управления, отсутствия долговременного запоминания найденного варианта и полной неопределённости динамического порядка объекта, его параметров и

внутриструктурных связей. Это обстоятельство подтверждает возникновение робастно-адаптивного поведения систем многоальтернативного управления как их принципиального свойства.

4.2 Стохастические системы замкнутого цикла

К системам замкнутого цикла относятся системы любой природы, в которых обеспечивается непрерывный круговорот вещества и энергии. Каноническим примером такой системы является любая экологическая система [342,442]. В главе 2 было показано, что наличие в экосистеме внутренних замкнутых циклов преобразования материальных ресурсов является одним из альтернативных механизмов, обеспечивающих восстановление равновесия в системе в кризисные периоды её существования. В промышленности можно найти примеры замкнутых систем в крупных технологических процессах атомной энергетики, химии и металлургии [189,127].

С целью воспроизведения указанного многоальтернативного свойства живых систем в сложных технических объектах составим математическую модель, раскрывающую системообразующее свойство замкнутого цикла обращения вещества и роль этого свойства в обеспечении устойчивого функционирования сложной системы. Будет рассмотрен важный для практики случай существования в системе внутренних резервов (запасов), накапливаемых ею в периоды благоприятного развития, и расходуемых в экстремальных ситуациях [159].

Представим систему замкнутого цикла в виде достаточно общей функциональной схемы, представленной на Рисунке 4.6.



Рисунок 4.6 – Схема распределения материальных ресурсов
в системе замкнутого цикла

Введём величины (параметры), характеризующие процесс использования и восстановления ресурсов в замкнутом цикле функционирования системы:

N – максимально возможное количество активных ресурсов, которое может использоваться (потребляться) системой для выполнения своих основных функций. Т.е. принимается, что текущее количество активных ресурсов может принимать любое значение от 0 до N ;

λ – интенсивность расходования ресурсов, т.е. среднее количество активных ресурсов в единицу времени, переходящих в неработоспособное состояние;

n – количество устройств или процессов, занимающихся восстановлением неработоспособных ресурсов (далее такие устройства будем называть каналами восстановления);

μ – интенсивность восстановления ресурсов одним каналом, т.е. среднее количество ресурсов в единицу времени, переходящих в одном канале восстановления из неработоспособного состояния в работоспособное;

r – максимальное количество ресурсов, составляющих внутренний резерв системы. В результате общее и неизменяемое количество внутренних ресурсов в системе определяется суммой $N+r$.

В качестве показателя качества системы примем вероятность её нахождения в состоянии полной работоспособности, т.е. в состоянии с максимальным количеством используемых системой активных ресурсов [238].

Случайный характер процессов расходования активных ресурсов во времени и их восстановления [179] указывает на необходимость описания

рассматриваемой системы в классе стохастических моделей с непрерывным временем [41,44]. Указанный класс моделей представляет процесс функционирования системы в виде дискретного однородного марковского процесса без последствия, т.е. с пуассоновскими потоками событий в системе. Такой процесс обладает множеством дискретных состояний $S_0, S_1, \dots, S_r, \dots, S_n, \dots, S_{N+r}$ имеющих, например, следующий содержательный смысл:

S_0 – состояние системы, в котором все ресурсы находятся в рабочем состоянии (N единиц ресурсов активны, r единиц ресурсов находятся в резерве;

S_1 – состояние системы, в котором одна единица ресурсов неработоспособна и находится в процессе восстановления (см. Рисунок 4.6);

S_r – в системе неработоспособны r единиц ресурсов, т.е. все внутренние резервы системы исчерпаны, и такое же количество r единиц находится в процессе восстановления ($r \leq n - 1$). Активных ресурсов по-прежнему N ;

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 $N-1$. Иными словами, система уже не в состоянии выполнять свои функции в полной мере;

S_n – в системе неработоспособно n единиц ресурсов, и количество активных ресурсов составляет $N-(n-r)$;

S_{N+r} – в систем не осталось активных ресурсов, при этом n единиц ресурсов находятся в процессе восстановления, а $N-(n-r)$ единиц ожидают восстановления.

Описанный марковский процесс для случая $0 < r \leq n - 1$ ($r < n$) представлен в виде графа на Рисунке 4.7.

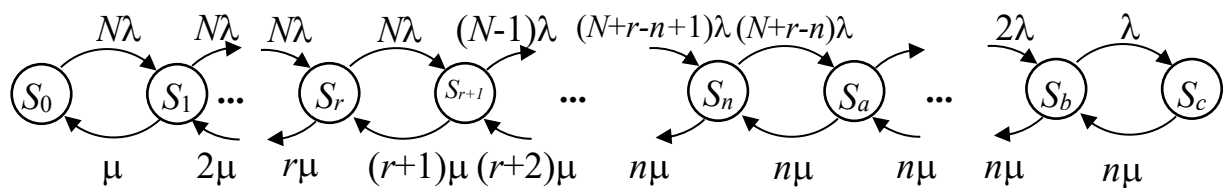


Рисунок 4.7 – Граф состояний замкнутой системы для случая $r < n$, ($a = n + 1$;
 $b = N + r - 1$; $c = N + r$)

На Рисунке 4.7 рёбрам графа, направленным слева направо, соответствуют суммарные интенсивности использования текущего количества активных ресурсов, справа налево – суммарные интенсивности восстановления ресурсов.

На основе системы уравнений стохастического равновесия для состояний полученного графа найдены аналитические выражения для финальных вероятностей $p_0, p_1, \dots, p_r, \dots, p_n, \dots, p_{N+r}$ нахождения системы в каждом из этих состояний:

$$p_k = p_0 \left(N \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{1}{k!} \quad \text{для } 0 \leq k \leq r+1; \quad (4.5)$$

$$p_k = p_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{N^{r+1}}{k!} \cdot \prod_{m=1}^{k-1-r} (N-m); \quad (4.6)$$

для $r+2 \leq k \leq n$.

$$p_k = p_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{N^{r+1}}{n! n^{k-n}} \cdot \prod_{m=1}^{k-1-r} (N-m) \quad (4.7)$$

для $n+1 \leq k \leq N+r$.

Если $r = n - 1$, то вероятности, определяемые выражением (4.6), равны нулю.

Перепишав полученные выражения (4.5)-(4.7) с обозначениями:

$$p_k = p_0 F_{1,k} \quad \text{для } 0 \leq k \leq r+1; \quad (4.8)$$

$$p_k = p_0 R_{1,k} \quad \text{для } r+2 \leq k \leq n; \quad (4.9)$$

$$p_k = p_0 D_{1,k} \quad \text{для } n+1 \leq k \leq N+r, \quad (4.10)$$

получим финальную вероятность p_0 в замкнутой форме:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{r+1} F_{1,k} + \sum_{k=r+2}^n R_{1,k} + \sum_{k=n+1}^{N+r} D_{1,k}}. \quad (4.11)$$

Вероятность P_C полного выполнения системой своих функций будет складываться из вероятностей состояний, в которых система использует максимальный объём N активных ресурсов. Из графа на Рисунке 4.7 следует:

$$P_C(r) = \sum_{k=0}^r p_k. \quad (4.12)$$

Соответственно, величина $P_L(r)$:

$$P_L(r) = 1 - \sum_{k=0}^r p_k = 1 - P_C(r) \quad (4.13)$$

представляет собою вероятность ограниченного функционирования системы.

Для системы без резервирования $r = 0$, и состояние S_0 полного функционирования единственное. В этом случае в графе на Рисунке 4.7 состояние S_r совпадёт с S_0 , и мы придём к частному случаю выражений (4.5)-(4.11) с $r = 0$. Этот случай соответствует типовой модели системы массового обслуживания [68]. Вероятность $P_C(0)$ состояния S_0 получит вид:

$$P_C(0) = \left(\begin{aligned} & \sum_{k=0}^1 \left(N \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{1}{k!} + \\ & + \sum_{k=2}^n \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{N}{k!} \cdot \prod_{m=1}^{k-1} (N-m) + \\ & + \sum_{k=n+1}^N \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{N}{n! n^{k-n}} \cdot \prod_{m=1}^{k-1} (N-m) \end{aligned} \right)^{-1}. \quad (4.14)$$

Выражения (4.12), (4.14) далее будут использованы при исследовании характеристик качества системы.

Перейдём к рассмотрению более важного для практики случая, когда $r > n - 1$ ($r \geq n$).

В этом случае в системе имеется возможность накопления значительного количества резервов, не ограниченного какими-либо другими её внутренними параметрами.

Граф состояний системы для этого случая показан на Рисунке 4.8 и качественно отличается от графа на Рисунке 4.7 теоретически неограниченным количеством состояний с полным функционированием.

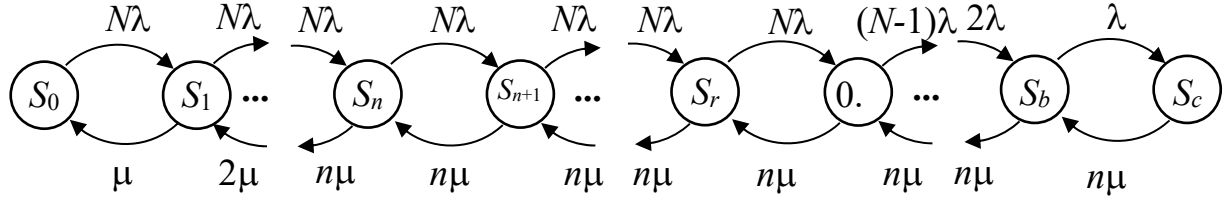


Рисунок 4.8 – Граф состояний замкнутой системы для случая $r \geq n$, ($a = r + 1$;

$$b = N + r - 1; c = N + r)$$

Для рассматриваемого случая финальные вероятности состояний имеют вид:

$$p_k = p_0 \left(N \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{1}{k!} \quad \text{для } 0 \leq k \leq n; \quad (4.15)$$

$$p_k = p_0 \left(N \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{1}{n! n^{k-n}} \quad \text{для } n + 1 \leq k \leq r + 1; \quad (4.16)$$

$$p_k = p_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{N^{r+1}}{n! n^{k-n}} \cdot \prod_{m=1}^{k-1-r} (N - m) \quad \text{для } r + 2 \leq k \leq N + r. \quad (4.17)$$

Введя в выражения (4.15)-(4.17) обозначения:

$$p_k = p_0 F_{2,k} \quad \text{для } 0 \leq k \leq n; \quad (4.18)$$

$$p_k = p_0 R_{2,k} \quad \text{для } n + 1 \leq k \leq r + 1; \quad (4.19)$$

$$p_k = p_0 D_{2,k} \quad \text{для } r + 2 \leq k \leq N + r, \quad (4.20)$$

получим финальную вероятность p_0 для случая $r \geq n$:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^n F_{2,k} + \sum_{k=n+1}^{r+1} R_{2,k} + \sum_{k=r+2}^{N+r} D_{2,k}}. \quad (4.21)$$

Выражения (4.5)-(4.11), (4.14), (4.15)-(4.21) представляют собою математическую модель замкнутой системы и охватывают все случаи взаимного соотношения её параметров, а также частный случай работы системы без резервов.

В качестве показателя качества системы с замкнутым циклом будем использовать вероятность P_C полного выполнения системой своих функций (4.12). В содержательном плане этот показатель соответствует вероятности восстановления полной работоспособности системы при случайном выводе из использования (выходе из строя) части активных ресурсов.

Управление этим показателем в системе возможно изменением трёх её параметров:

- количеством n каналов восстановления;
- интенсивностью μ восстановления ресурсов каждым каналом;
- объёмом внутренних резервов r , накопленных в системе.

Для количественного анализа использовался пример системы замкнутого цикла с параметрами: $N = 10$; $\lambda = 2$; $n = \text{varia}$; $\mu = \text{varia}$; $r = \text{varia}$.

Зависимости $P_C(n)$, $P_C(\mu)$, $P_C(r)$ вычислялись по аналитическим моделям (4.5)-(4.11), (4.14), (4.15)-(4.21), Рисунки 4.9-4.11.

На Рисунке 4.9 показана зависимость вероятности P_C полного функционирования системы от числа n каналов восстановления при разном объёме r резервов.

Анализ Рисунка 4.9 очевидно показывает, что при отсутствии или недостаточном количестве r резервов (в данном случае при $r \leq 5$) в системе не может быть обеспечен высокий уровень P_C , например, $P_C \geq 0,95$, ни при каком, в т.ч. максимальном количестве $n_{\max} = N + r$ каналов восстановления.

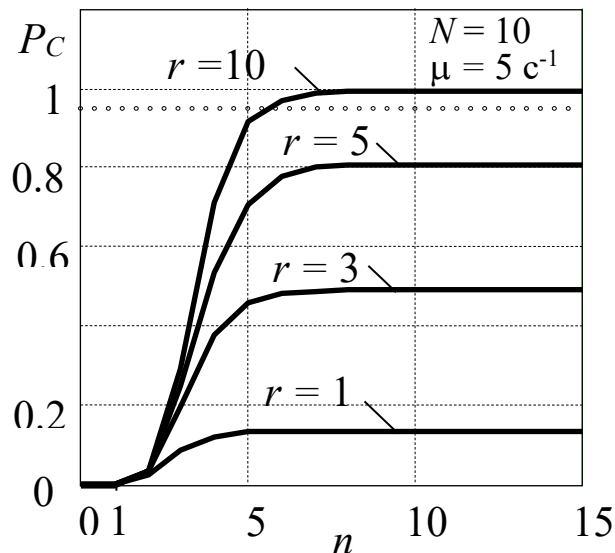


Рисунок 4.9 – Зависимость вероятности P_C полного функционирования системы от числа n каналов восстановления по параметру объема r резервов

В то же время введение в систему резерва позволяет обеспечить требуемое значение вероятности $P_C = 0,95$ полного функционирования системы уже при небольшом количестве n каналов восстановления: по Рисунку 4.9 – при $n \geq 6$. При этом дальнейшее увеличение числа каналов не требуется.

Эти обстоятельства указывают на целесообразность создания резерва для повышения качеством функционирования системы с замкнутым циклом.

Зависимость вероятности P_C полного функционирования системы от интенсивности μ восстановления при разном количестве r резервов представлена на Рисунке 4.10.

Графики на Рисунке 4.10 подтверждают высокую результативность введения резерва для обеспечения заданного значения P_C . Кроме того, наличие резерва одновременно позволяет существенно снизить требования к уровню интенсивности μ восстановления при неизменном количестве n каналов.

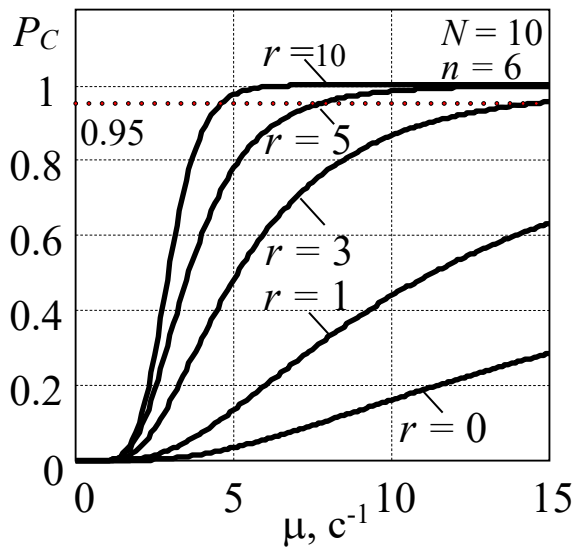


Рисунок 4.10 – Зависимость вероятности P_C полного функционирования системы от интенсивности μ восстановления по параметру объёма r резервов

На Рисунке 4.11 приведена зависимость вероятности P_C полного функционирования системы от объёма r резервов при разном количестве n каналов восстановления.

Рисунок 4.11 показывает, что в результате создания резерва в системе может быть достигнуто высокое значение вероятности P_C полного функционирования системы даже при сравнительно небольшом числе каналов восстановления: $n = 4$ и $n = 5$ (см. также Рисунок 4.9).

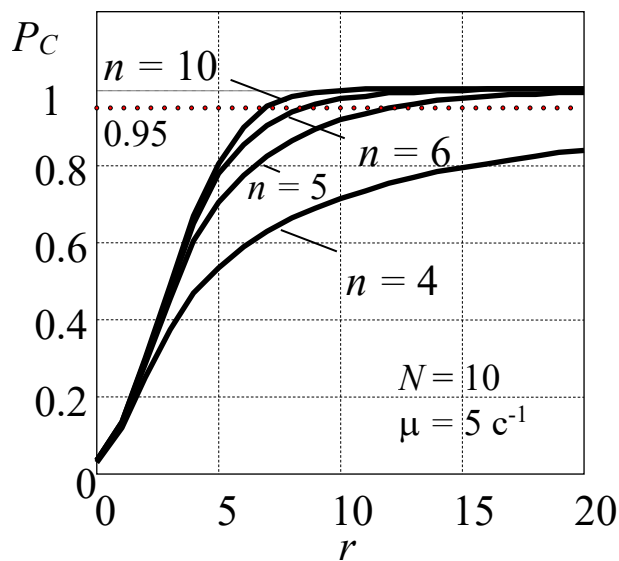


Рисунок 4.11 – Зависимость вероятности P_C полного функционирования системы от объёма r резервов по параметру числа n каналов восстановления

Таким образом, одним из альтернативных способов формирования в сложных системах свойства устойчивого функционирования и самовосстановления является организация в них замкнутого цикла преобразования и переноса вещества и энергии.

Указанный цикл реализуется двумя взаимосвязанными механизмами:

- процессом восстановления ресурсов, завершивших период своего активного использования системой;
- процессом создания внутреннего резерва ресурсов, готовых при необходимости к включению в процесс функционирования системы, т.е. к возобновлению её полной работоспособности.

4.3 Системы с хаотическими режимами

4.3.1 Идентификация критических режимов в хаотических системах

В хаотических системах траектории движения занимают ограниченную область фазового пространства, но обнаруживают настолько сильную зависимость от начальных условий этого движение, что при конечной точности задания и измерения этих условий делает предсказание поведения таких систем невозможным [87,135,309,368].

Обобщение свойств хаотических режимов в теории диссипативных систем [26,248,314,385] выявило наличие геометрической упорядоченности в любом хаотическом движении – фрактальной (самоподобной) структуры [150,157,158,290], наличие которой стало одним из признаков хаотического движения в объектах и открыло возможность выявления этих режимов на практике.

Обсудим вопросы идентификации критических режимов хаотических систем и многоальтернативного управления этими системами – перехода от одного режима к другому со стабилизацией каждого из них [56,58].

Рассмотрим последовательность случайных чисел ε с гауссовым распределением вероятностей их появления с центром $\bar{\varepsilon}$ и дисперсией σ^2 :

$$\varphi(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon-\bar{\varepsilon}}{\sigma}\right)^2}. \quad (4.22)$$

Приписывая каждому элементу этой последовательности значение приращения какой-либо физической величины, например, координаты $x(t)$ состояния системы управления, можно вычислить текущую координату в момент t :

$$x(t) = \sum_{\tau=1}^t \varepsilon(\tau). \quad (4.23)$$

В работе [290] показано, что полученное указанным образом движение $x(t)$ обладает свойствами самоподобия, т.е. фрактальными свойствами. Наиболее важной характеристикой этого движения является показатель персистентности H , отражающий тенденцию долговременных изменений в характере движений системы. В частности, независимым случайным приращениям $\varepsilon(\tau)$ соответствует $x(t)$ со значением $H = 0,5$ и корреляционной функцией [290]:

$$C(t) = 2^{2H-1} - 1 = 0. \quad (4.24)$$

Описанное движение получило название броуновского, и было обобщено Б. Мандельбротом [384] для случаев с $0 < H < 1$ в виде:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{\Gamma(H + 0.5)} \cdot \sum_{i=nt-nM}^{nt} K\left(t - \frac{i}{n}\right) \cdot n^{-0.5} \xi_i, \quad (4.25)$$

где Γ – гамма функция; nM – отрезок временного численного интегрирования (скользящее окно), $M > t$; ξ_i – гауссова последовательность с нулевым средним значением и единичной дисперсией; n – число интервалов суммирования на отрезке $[t-1; t]$;

$$K\left(t - \frac{i}{n}\right) = \begin{cases} \left(t - \frac{i}{n}\right)^{H-0.5}, & \text{при } t-1 \leq \frac{i}{n} \leq t; \\ \left(t - \frac{i}{n}\right)^{H-0.5} - \left(-\frac{i}{n}\right)^{H-0.5}, & \text{при } \frac{i}{n} < t-1. \end{cases} \quad (4.26)$$

Изменив порядок суммирования с $I = [n(t-1); nt]$ на $I = [1; n]$ и с $I = [nt-nM; n(t-1)]$ на $I = [1; nM-n]$ получим:

$$\varepsilon(t) = \frac{n^{-H}}{\Gamma(H+0.5)} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n i^{H-0.5} \xi_{nt+nM+1-i} + \\ + \sum_{i=1}^{nM-n} \left[(n+i)^{H-0.5} - i^{H-0.5} \right] \times \\ \times \xi_{nt+nM+1-n-i} \end{array} \right\}, \quad (4.27)$$

и далее:

$$x(t) = \sum_{i=1}^t \varepsilon(i). \quad (4.28)$$

Соотношение (4.25) открывает практическую возможность формирования хаотических последовательностей $\varepsilon(t)$ и $x(t)$ с заданными качественно разными тенденциями долговременных изменений, иными словами – открывает возможность идентификации и управления критическими режимами хаотической системы. Примеры указанных временных последовательностей, полученные с помощью алгоритма (4.25) с параметрами $n = 10$, $M = 1000$, $t = 500$ для одной и той же базовой последовательности ξ_i представлены на Рисунке 4.12:

1) $H > 0,5$ – режим накопления приращений – персистентный режим: если при заданном показателе $H > 0,5$ некоторое время τ наблюдалось в среднем увеличение значений $x(t)$, то и впредь в среднем сохранится тенденция к их увеличению. Аналогично будет сохраняться и тенденция к уменьшению (Рисунок 4.12а,б);

2) $H = 0,5$ – режим независимых приращений: будет получен случайный процесс $\varepsilon(t)$ без автокорреляции отклонений (белый шум), т.е. тенденция в накоплении $x(t)$ будет отсутствовать (Рисунок 4.12в,г);

3) $H < 0,5$ – антиперсистентный режим, характеризующийся тем, что рост значений $x(t)$ в прошлом предполагает их уменьшение в будущем, а тенденция к уменьшению значений $x(t)$ сменяется их очередным увеличением (Рисунок 4.12д,е).

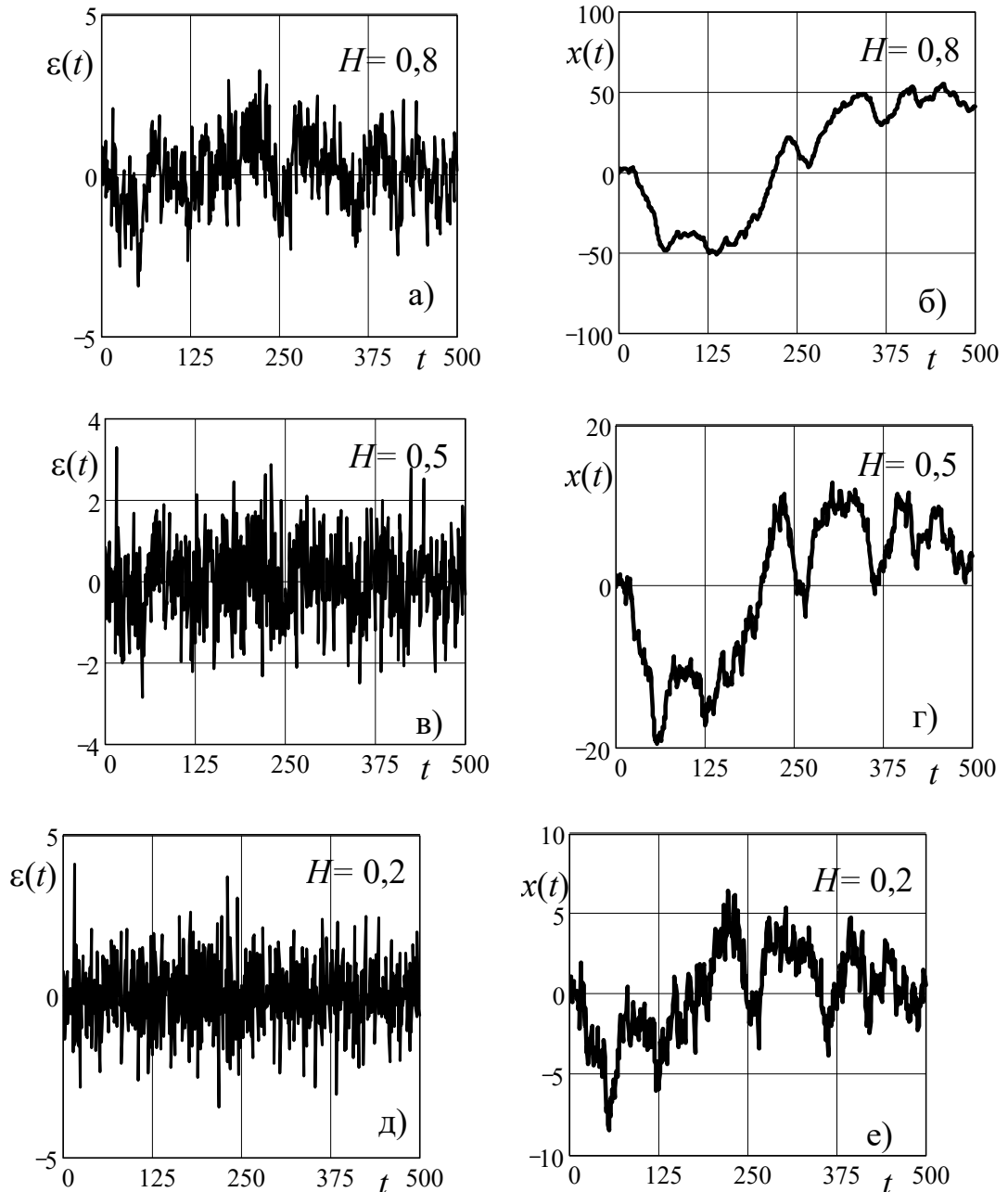


Рисунок 4.12 – Последовательности приращений $\varepsilon(t)$ и накоплений $x(t)$ в различных критических режимах

В практических приложениях может возникнуть необходимость поддержания заданного критического режима и требуемого значения $H_{\text{тр}}$ в ситуациях, когда плотность распределения базовой последовательности ξ_i не будет соответствовать нормальному виду, либо ξ_i утратит марковские свойства. Стабилизация H в этом случае возможна по традиционной структуре регулирования по отклонению $\Delta H = H_{\text{тр}} - H$ (Рисунок 4.13).

На этой структуре вычисление приращений $\varepsilon(t)$ производится по алгоритму (4.25). Для определения значения персистентности H (см. Рисунок 4.13) удобно воспользоваться показателем нормированного размаха R/S , предложенным Хёрстом [290]:

$$\frac{R(t)}{S(t)} = (a \cdot t)^H, \quad (4.29)$$

где $R(t) = \max_{1 \leq \tau \leq t} x(\tau) - \min_{1 \leq \tau \leq t} x(\tau)$ – разность максимального и минимального значений (размах) величины $x(t)$ на интервале времени t ; τ – дискретное время, принимающее целочисленные значения; $S(t)$ – среднее квадратическое отклонение приращений случайного процесса на интервале t :

$$S(t) = \sqrt{\frac{1}{t} \sum_{\tau=1}^t [\varepsilon(\tau) - \bar{\varepsilon}(t)]^2}; \quad (4.30)$$

$\bar{\varepsilon}(t)$ – математическое ожидание величины $\varepsilon(t)$ на интервале t ; a – коэффициент пропорциональности.

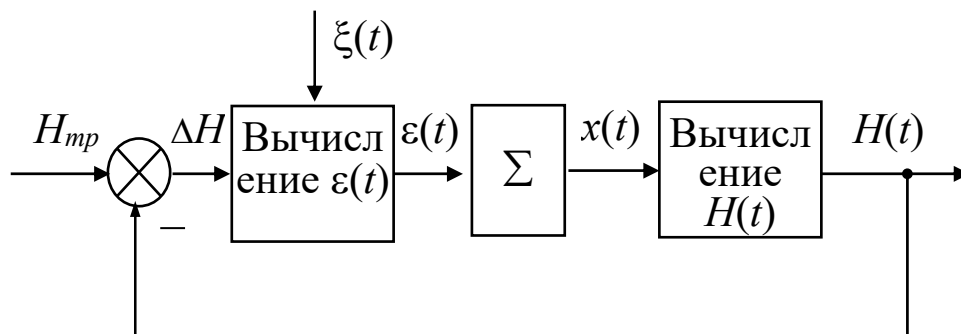


Рисунок 4.13 – Структурная схема стабилизации заданного критического режима

Для эталонного случайного процесса с нормальным распределением случайной величины $\xi(t)$ и единичной дисперсией $\sigma^2(t) = 1$ характер изменения $x(t)$ и $R(t)$ представлен на Рисунке 4.14а,б, где $R(t)/S(t)$ аппроксимирован функцией $\hat{R}(t)$ вида:

$$\hat{R}(t) = \left(\frac{\pi t}{2} \right)^{0,5}. \quad (4.31)$$

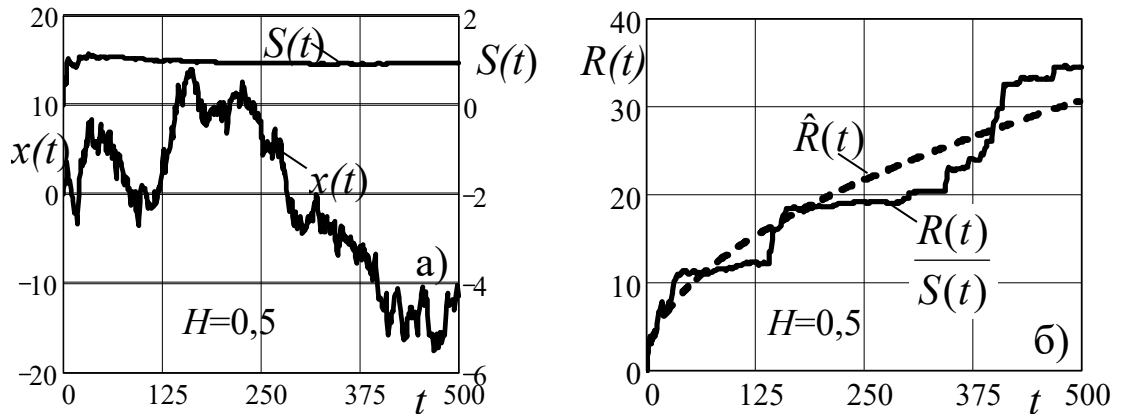


Рисунок 4.14 – Показатель нормированного размаха для режима с $H=0,5$

Логарифмирование выражения (4.29) даёт возможность вычислять значение H как тангенс угла наклона прямой $H \cdot \lg at$, аппроксимирующей функцию $\lg(R(t)/S(t))$ (Рисунок 4.15).

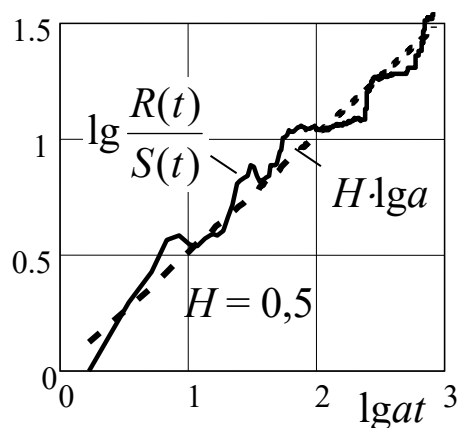


Рисунок 4.15 – Результат аппроксимации показателя нормированного размаха

Стабилизация режима с $H=0,5$ при замене нормального закона $\varphi(\xi)$ на смещённое гамма-распределение $\gamma(\xi)$ (Рисунок 4.16):

$$\gamma(\xi) = \frac{(\xi + 3.5)^3}{\Gamma(4)} e^{-(\xi + 3.5)}, \quad (4.32)$$

иллюстрируется на Рисунке 4.17, из которого следует, что при переходе плотности нормального распределения $\varphi(\xi)$ к несимметричному виду $\gamma(\xi)$ показатель H без системы автоматического регулирования (САР) изменяется от исходного значения $H_\varphi = 0,5$ до значения $H_{\gamma, \text{без САР}} = 0,97$.

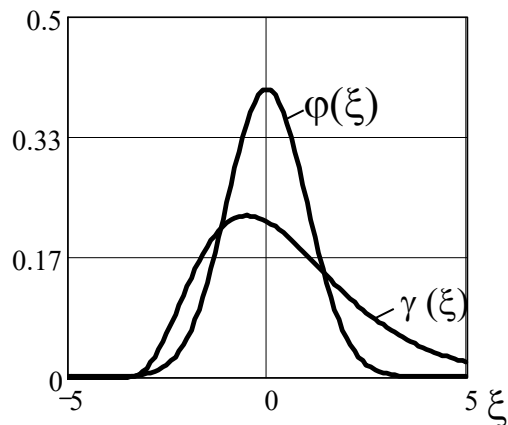


Рисунок 4.16 – Пример изменения вида плотности распределения базовой последовательности $\xi(t)$

Реализация автоматического управления по структуре Рисунка 4.13 позволяет поддерживать заданный критический режим $H_{\gamma, \text{с САР}} = 0,51$.

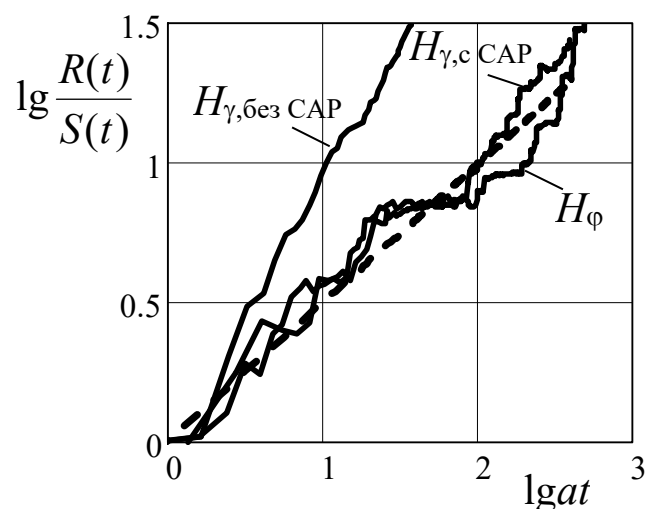


Рисунок 4.17 – Стабилизация критического режима с $H=0,5$ при изменении функции плотности распределения

В качестве признака критического режима фрактальной временной последовательности $\varepsilon(t)$ может быть рассмотрен не только показатель персистентности H , но и значение относительного размаха $R(t)/S(t)$ накопленной величины $x(t)$, который имеет очевидное физическое содержание – допустимое относительное отклонение текущего значения параметра технологического процесса.

Математическое ожидание интервала времени \bar{t} , в течение которого размах $R(t)/S(t)$ достигнет некоторого граничного – критического значения $[R(t)/S(t)]_{\text{кр}}$, определится из выражения (4.29):

$$\bar{t} = \frac{1}{a} \left[\frac{R(t)}{S(t)} \right]_{\text{кр}}^{\frac{1}{H}}. \quad (4.33)$$

Действительно, для примера, представленного на Рисунке 4.14б, задавшись размахом $[R(t)/S(t)]_{\text{кр}} = 25$, можно вычислить:

$$\bar{t} = \frac{1}{\pi/2} 25^{\frac{1}{0,5}} = 398,$$

что хорошо соответствует Рисунку 4.14а,б, (t – номер такта (интервала) времени; физическая длительность интервала $[t-1; t]$ определяется конкретным процессом).

Приведём теперь примеры объектов, в которых будут использоваться несколько других признаков критических режимов – бифуркационные диаграммы, отображение Пуанкаре.

Рассмотрим процесс химической реакции, протекающей в некоторой емкости с перемешиванием (модель Рёсслера) [160]:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= -y(t) - z(t); \\ \dot{y}(t) &= x(t) + a \cdot y(t); \\ \dot{z}(t) &= b \cdot x(t) - u(t)z(t) + x(t)z(t). \end{aligned} \quad (4.34)$$

где $x(t), y(t), z(t)$ – координаты пространства состояний; a, b – параметры системы; $u(t)$ – управляющее воздействие.

При некоторых значениях параметров и управления в системе могут возникать режимы хаотических колебаний или колебаний с предельными

циклами. Для целей управления указанными режимами работы системы и стабилизации того или иного предельного цикла, необходимо определить принципиальную возможность такого управления с помощью $u(t)$, а также требуемый диапазон изменения $u(t)$ для обеспечения тех или иных режимов.

Исследования проводились для значения параметров: $a = 0,38$; $b = 0,3$; начальные условия: $x(0) = 1$; $y(0) = 0$; $z(0) = 0$.

Линеаризовав (4.34) в окрестностях точки начальных условий, придём к системе:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= -y(t) - z(t); \\ \dot{y}(t) &= x(t) + a \cdot y(t); \\ \dot{z}(t) &= b \cdot x(t) - u(t)z(t) + z(t),\end{aligned}\tag{4.35}$$

с матрицей коэффициентов:

$$K = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 1 & a & 0 \\ b & 0 & -u(t) + 1 \end{bmatrix}\tag{4.36}$$

и характеристическим уравнением $|sE - K| = 0$:

$$s^3 + (-a + u(t) - 1)s^2 + (a - a \cdot u(t) + b + 1)s - 1 - a \cdot b + u(t) = 0.\tag{4.37}$$

В соответствии с критерием Гурвица, примененным к этому уравнению, на Рисунке 4.18 построено D-разбиение областей устойчивости по параметрам a и $u(t)$, где функции $a = f_i(u(t))$, $i = 1, \dots, 4$ получены соответственно из условий:

$$\begin{aligned}(-a + u(t) - 1) \cdot (a - a \cdot u(t) + b + 1) - (-1 - a \cdot b + u(t)) &> 0; \\ (a - a \cdot u(t) + b + 1) &> 0; \\ (-a + u(t) - 1) &> 0; \\ (-1 - a \cdot b + u(t)) &> 0.\end{aligned}\tag{4.38}$$

Из Рисунка 4.18 следует, что при заданном значении b система не может находиться в устойчивом положении равновесия ни при каких значениях параметра a и управления $u(t)$.

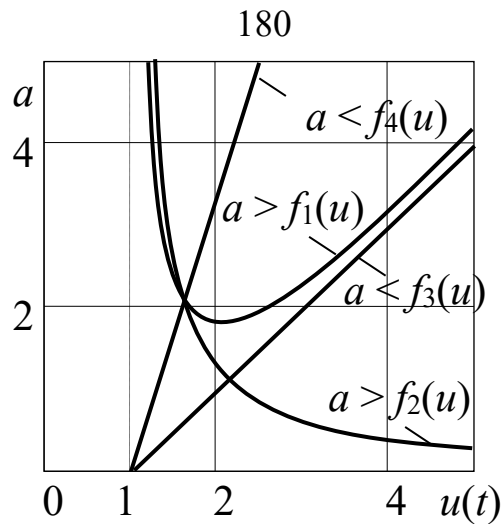


Рисунок 4.18 – D-разбиение плоскости параметров a и $u(t)$

В результате исследования полученной области неустойчивой работы на модели были выделены следующие диапазоны изменения управляющего воздействия $u(t)$ с различным поведением системы:

$0 \leq u(t) < 0,88$ – система неустойчивая (расходящиеся колебания) (Рисунок 4.19);

$0,88 \leq u(t) < 2$ – в системе существует предельный цикл первого порядка (Рисунок 4.20);

$2 \leq u(t) < 2,81$ – в системе существует предельный цикл второго порядка (Рисунок 4.21);

$2,81 \leq u(t)$ – в системе хаотические колебания (Рисунок 4.22).

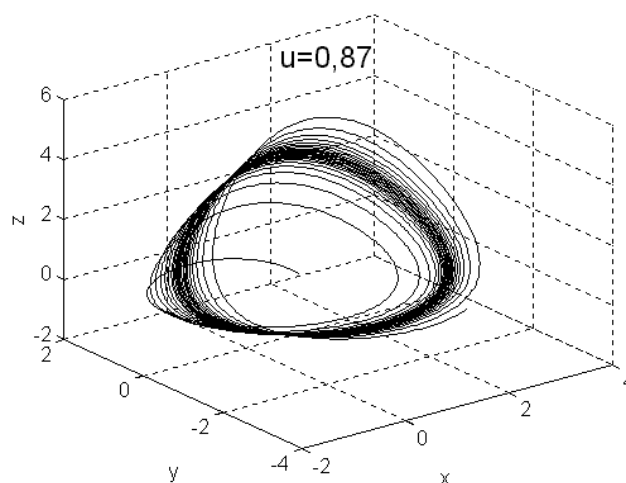


Рисунок 4.19 – Режим неустойчивой работы системы; $0 \leq u < 0,88$

Очевидно, что полученные границы выделенных диапазонов с различными режимами работы системы с изменением параметров a и b также будут изменяться, поэтому при практической реализации алгоритмов управления целесообразно применение адаптивных регуляторов, использующих оценки изменяющихся параметров.

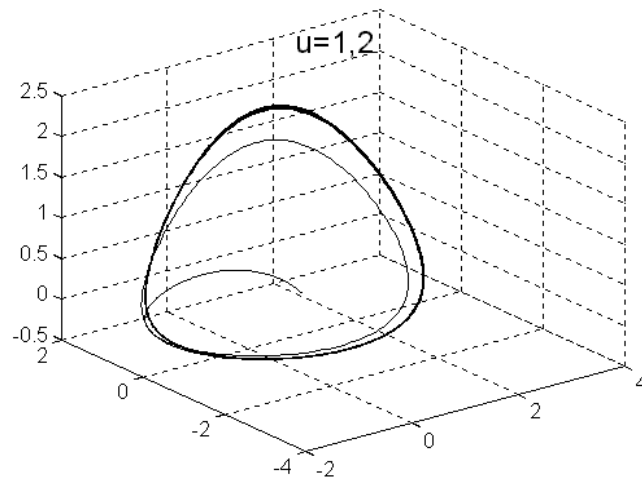


Рисунок 4.20 – Режим устойчивых колебаний системы с предельным циклом первого порядка; $0,88 \leq u < 2$

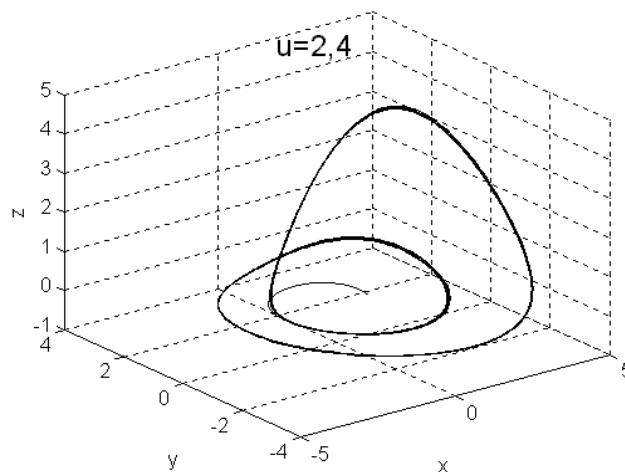


Рисунок 4.21 – Режим устойчивых колебаний системы с предельным циклом второго порядка; $2 \leq u < 2,81$

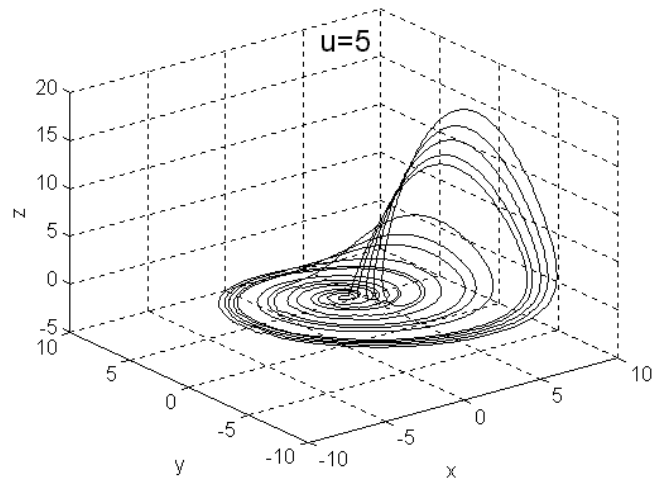


Рисунок 4.22 – Режим устойчивой работы системы с хаотическими колебаниями; $2,81 \leq u$

Проведём исследование границ, отделяющих в модели Рёсслера области с качественно различным характером колебаний – регулярным и нерегулярным.

В качестве инструмента, позволяющего выявить наличие в системе регулярных либо нерегулярных колебаний воспользуемся бифуркационным анализом процесса удвоения периода повторения амплитуды этих колебаний.

На Рисунке 4.23 представлены бифуркационные диаграммы координаты $x(t)$ для различных фиксированных значений параметра a и постоянном $b = 0,3$ при непрерывно изменяющемся во времени переменной $u(t)$.

При $a = 0,19$ (Рисунок 4.23а) наблюдается только удвоение периода повторения амплитуды колебаний, но нерегулярные колебания не возникают.

При $a = 0,31$ (Рисунок 4.23б) нерегулярные колебания занимают практически всю исследуемую область, начиная со значений $u \approx 4,5$.

При дальнейшем увеличении параметра ($a > 0,34$) возникают перемежающиеся области с регулярными и нерегулярными колебаниями (Рисунок 4.23в). Существование перемежающихся областей (Рисунок 4.24) существенно затрудняет управление реальными объектами, и пересечение границ таких областей фазовой траекторией системы должно быть исключено наложением ограничений на диапазон соответствующих управляющих воздействий.

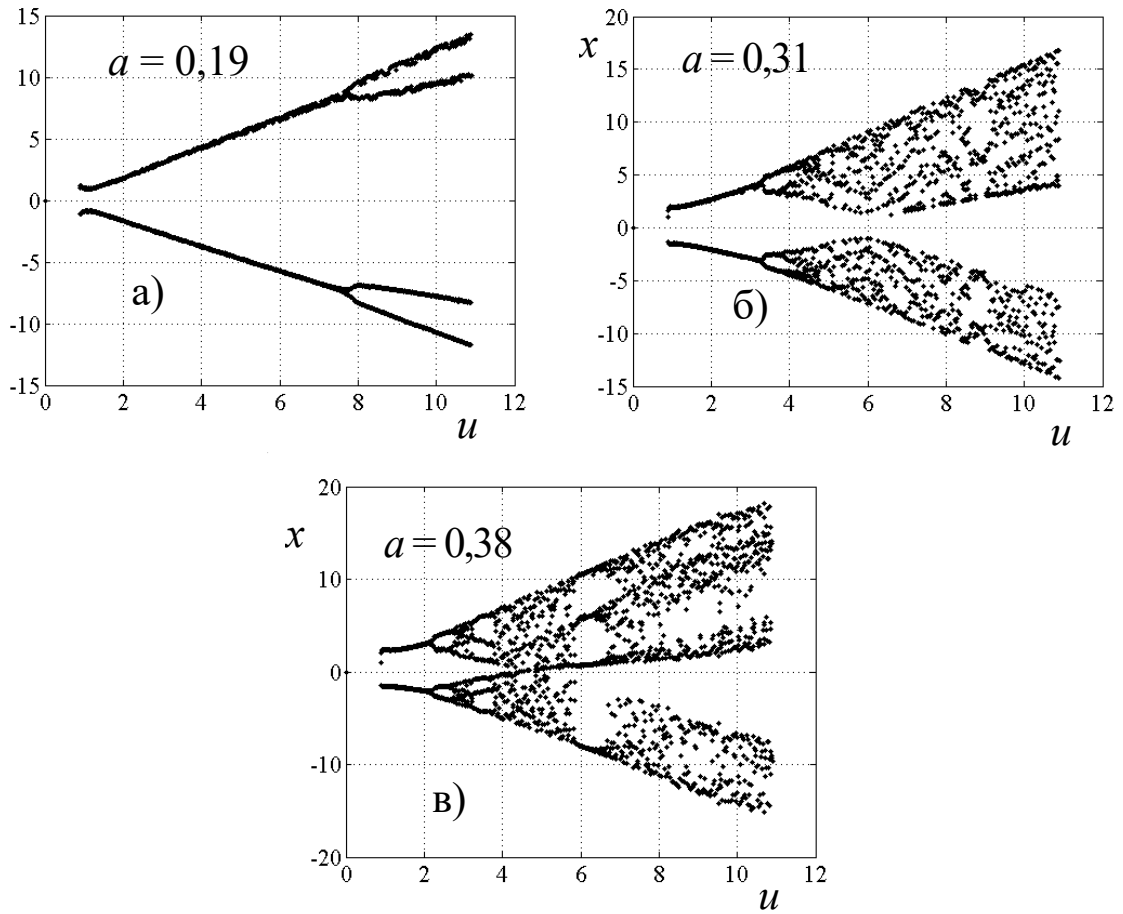


Рисунок 4.23 – Бифуркационные диаграммы для системы Рёсслера при $b = 0,3$

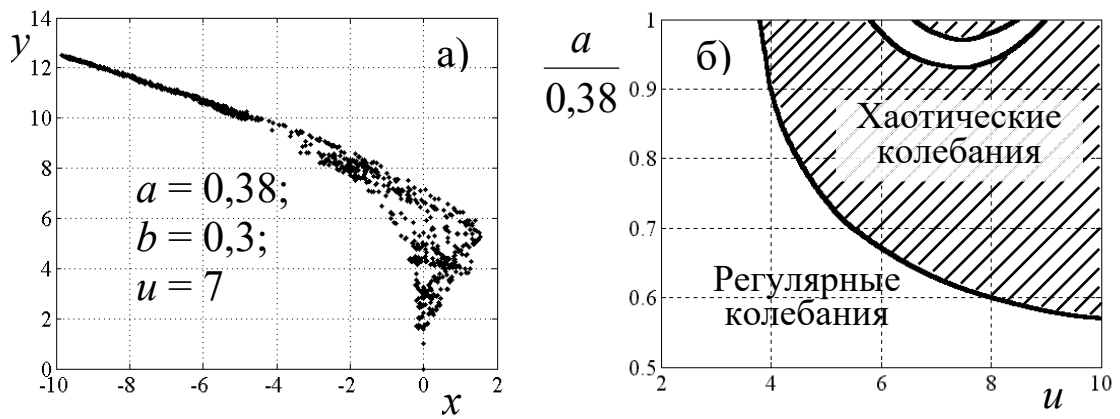


Рисунок 4.24 – Отображение Пуанкаре: а) для режима нерегулярных колебаний; б) бифуркационные границы областей с регулярными и нерегулярными колебаниями

Для проверки характера движения системы в области бифуркационной диаграммы с параметрами $a = 0,38$; $b = 0,3$; $u = 7$ было построено отображение Пуанкаре для моментов времени, соответствующих экстремальным значениям координаты $x(t)$ (Рисунок 4.24а). Фрактальный характер полученного отображения подтверждает хаотическую природу колебаний. Результирующий вид областей с границами регулярных и нерегулярных режимов представлен на Рисунке 4.24б, где заштрихованные участки соответствуют хаотическим колебаниям в системе.

4.3.2 Управление критическими режимами химического реактора

Рассмотрим задачу управления критическими режимами рассмотренного выше химического реактора (4.35).

В качестве критерия хаотичности движения будем использовать локальную неустойчивость процесса колебаний, а количественной мерой этой неустойчивости – показатель Ляпунова λ , вычисляемый по выражению:

$$\lambda = \frac{1}{t_N - t_0} \cdot \sum_{k=1}^N \log_2 \left(\frac{|x(t_k) - \bar{x}(t_k)|}{|x(t_{k-1}) - \bar{x}(t_{k-1})|} \right), \quad (4.39)$$

в котором \bar{x} – опорное решение системы (4.35) с начальным условием $\bar{x}(0) = \bar{x}_0$; x – дополнительное решение (4.35) с начальным условием $x(0) = \bar{x}_0 + \varepsilon$, где ε выбирается достаточно малой величиной по сравнению с \bar{x}_0 ; $t_k = t_{k-1} + \tau$ – моменты времени, отстоящие на шаг τ оценки расхождения решений; $t_N - t_0 = \tau \cdot N$ – интервал усреднения показателя Ляпунова.

Выберем для системы (4.35) начальную точку $b_0 = 0,3$; $a_0 = 0,38$; $u_0 = 3$, для которой $\lambda_0 = 0,13$ и средняя амплитуда хаотических колебаний $A_0 = 3$ (Рисунок 4.25а,б).

Изменение параметра b системы приводит к изменению характера колебаний x , превращая их из хаотических в регулярные, что отражается в

соответствующем перемещении показателя Ляпунова из области положительных значений (+0,13) в отрицательную область (-0,02), как это показано на Рисунке 4.25а.

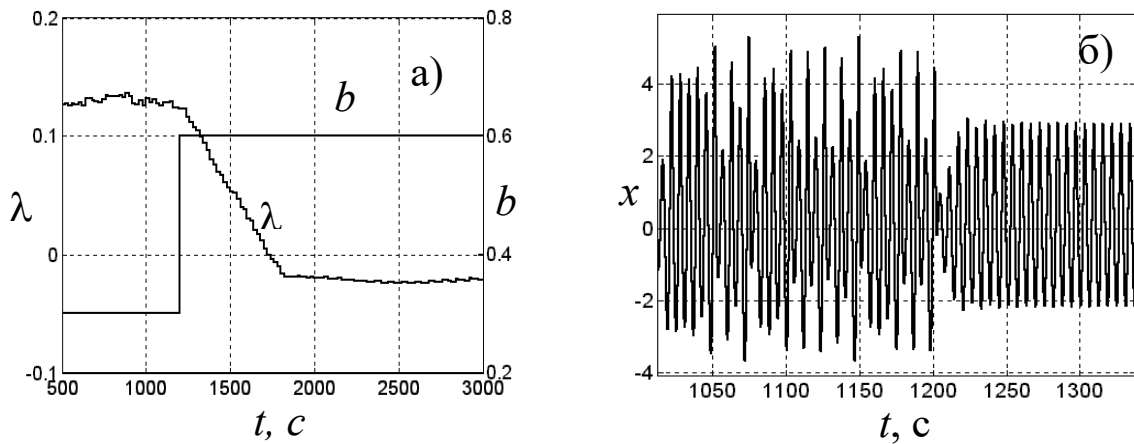


Рисунок 4.25 – Реакция системы на изменение параметра b :

а) изменение λ ; б) изменение характера колебаний

Анализ Рисунка 4.25 позволяет установить, что переход системы из режима нерегулярных колебаний к упорядоченным происходит достаточно быстро – за несколько периодов колебательного процесса, тогда как изменение показателя Ляпунова происходит за время, определяемое интервалом его усреднения $\tau \cdot N = 20 \cdot 30 = 600$ с (см. Рисунок 4.25а). Отсюда следует, что использование λ в качестве регулируемой координаты приемлемо только для создания «медленного» контура регулирования, предназначенного для обеспечения точности. Для этого целесообразно использовать издромное звено, позволяющее обеспечить астатизм системы без уменьшения запаса устойчивости в контуре управления (Рисунок 4.26).

Быстродействующий канал может быть реализован на безынерционных звеньях в виде дополнительного канала путем ввода возмущающего параметра b в систему через управление a .

Поскольку изменение параметра b приводит не только к изменению характера колебаний, но влияет на их среднюю амплитуду A (см. Рисунок 4.25б),

то необходим второй контур для управления амплитудой, который может быть реализован аналогично вышеуказанному, но по другому управляющему параметру u .

В соответствии со сформированной структурой управления составлена имитационная модель системы (см. Рисунок 4.26). Результаты моделирования представлены на Рисунке 4.27 и подтверждают достижение цели управления.

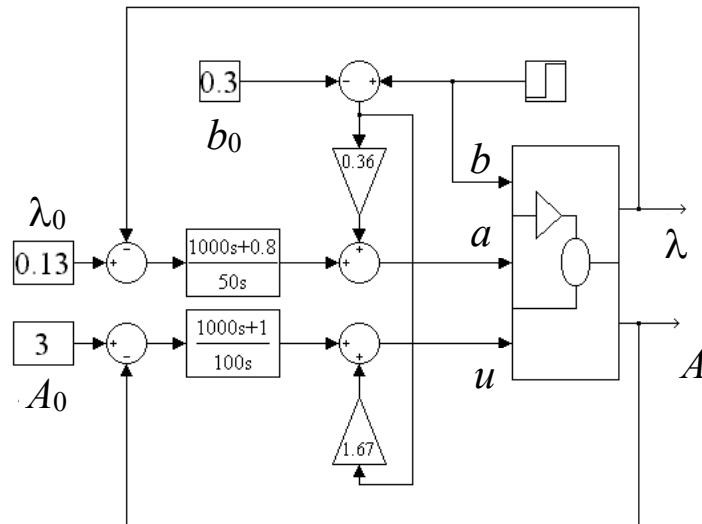


Рисунок 4.26 – Структура системы автоматической стабилизации критического режима с хаотическими колебаниями

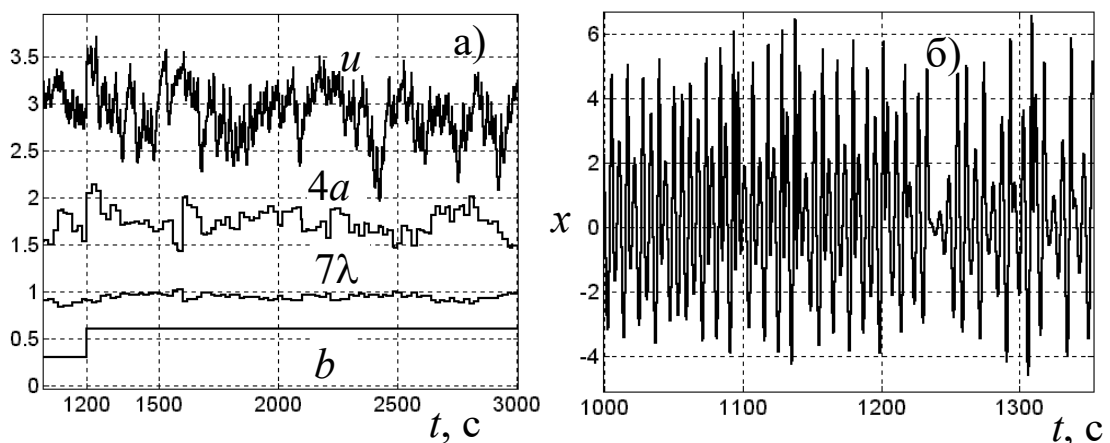


Рисунок 4.27 – Иллюстрация процесса управления:

- а) изменение параметров системы и показателя Ляпунова;
- б) сохранение характера колебаний

Скачкообразное изменение возмущения b в момент времени 1200 с практически полностью парируется, и нерегулярный характер колебаний системы сохраняется. Влияние “медленных” контуров регулирования проявляется в компенсации перекрестных связей в объекте и удержании требуемых показателей λ и A в установившемся режиме.

4.3.3 Хаотические системы связи

Использование хаотических колебаний в современных системах связи и передачи данных [271,310,434] открывает возможность существенного увеличения информационной ёмкости передаваемых сообщений не с помощью модуляции традиционных количественных характеристик периодического сигнала, таких как амплитуда или частота, но формированием качественно разных траекторий хаотического движения в системе, т.е. выбором различных аттракторов этого движения в пространстве её состояний [147].

Реализация этой возможности предполагает решение следующих задач [61]:

- управление хаотическим движением на уровне выбора качественно отличающихся, критических режимов работы системы – многоальтернативное управление;
- обеспечение синхронизации нерегулярных колебаний передатчика и приёмника [365,397];
- выделение из хаотического сигнала полезной информации, передаваемой по каналу связи – демодуляция на приёмной стороне системы.

Особенность этих задач состоит не только в нерегулярном характере колебаний, но и в проявлении их высокой чувствительности к управлению, параметрам приёмника и передатчика, к начальным условиям возникновения колебаний и наличию шумов [396].

Указанные особенности рассматриваемых систем приводят к необходимости управления хаотическими колебаниями в классе адаптивных

алгоритмов, назначение которых заключается в данном случае в самонастройке приёмника по характеристикам принимаемого сигнала.

В качестве источника нерегулярных колебаний воспользуемся генератором, реализованным по так называемой системе Чуа [92]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{1}{C_1} \cdot \left((x_2 - x_1) \cdot \frac{1}{R} - f(x_1) \right); \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{C_2} \cdot \left((x_1 - x_2) \cdot \frac{1}{R} + x_3 \right); \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{L} \cdot (e - x_2), \end{aligned} \quad (4.40)$$

соответствующей схеме электрической принципиальной, представленной на Рисунке 4.28:

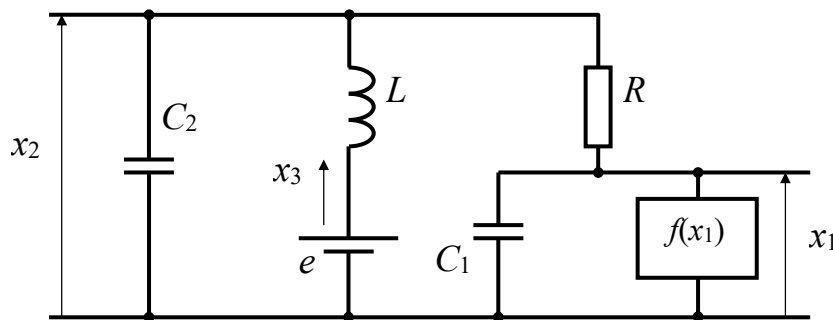


Рисунок 4.28 – Схема генератора, описываемая системой уравнений Чуа

где x_1 , x_2 – разность потенциалов между указанными на Рисунке 4.28 точками схемы; x_3 – ток в цепи с индуктивностью L ; $e(t)$ – ЭДС источника управляющего сигнала; $f(x_1)$ – нелинейная зависимость тока от напряжения x_1 в указанной цепи с отрицательным дифференциальным сопротивлением, реализованная, например, с помощью операционного усилителя; C_1 , C_2 , R – значения емкостей конденсаторов и сопротивление резистора соответственно.

Для дальнейшего анализа модели перейдем к матричной форме описания передающего узла:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Bx + F \cdot f(x_1) + Ne(t); \\ y &= Ax, \end{aligned} \quad (4.41)$$

в которой: y – передаваемая координата системы, выбор которой зависит от матрицы A ; матрицы линейной части в числовом виде:

$$B = \begin{bmatrix} -9 & 9 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & -14 & 0 \end{bmatrix}; \quad F = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad N = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 14 \end{bmatrix}; \quad A = [0 \ 0 \ 1],$$

нелинейная функция $f(x_1)$:

$$\begin{aligned} f(x_1) &= -5 \cdot 10^{-4} x_1^6 - 1 \cdot 10^{-4} x_1^5 + 1,98 \cdot 10^{-2} x_1^4 + \\ &+ 4,2 \cdot 10^{-2} x_1^3 - 0,18 x_1^2 - 1,12 x_1 + 0,56; \end{aligned}$$

изображена на Рисунке 4.29.

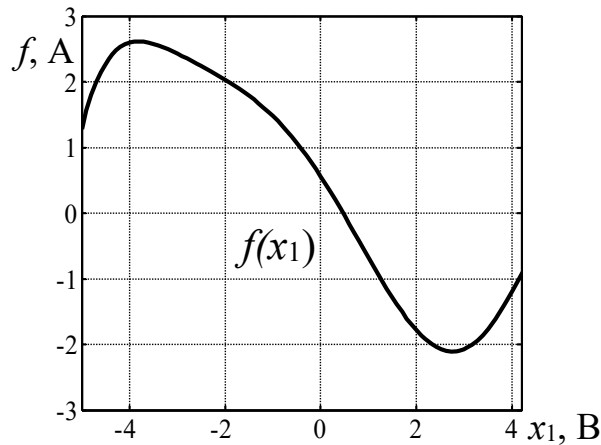


Рисунок 4.29 – Нелинейная характеристика генератора

Хаотические колебания рассматриваемого генератора иллюстрируется фазовыми траекториями, на Рисунке 4.30, полученными при разных значениях управления e .

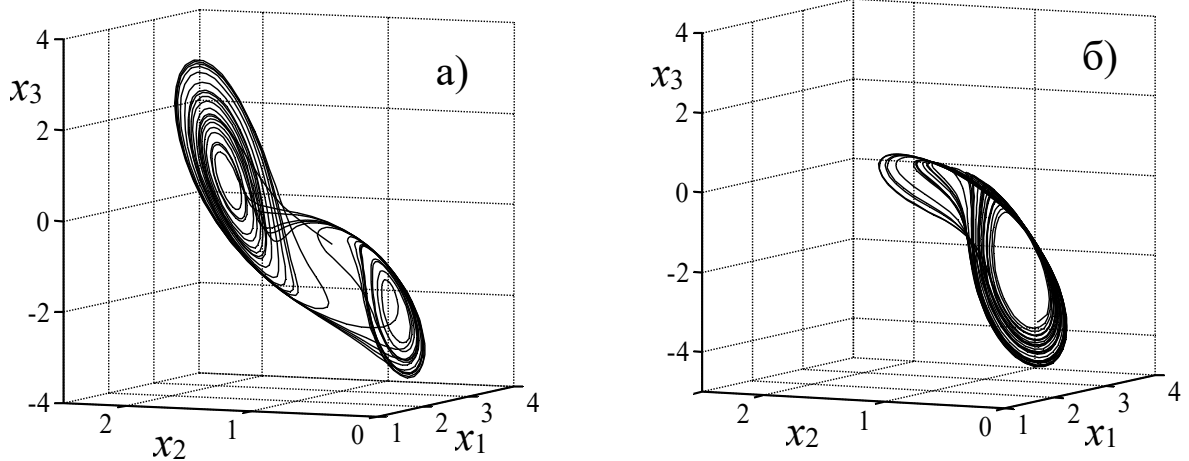


Рисунок 4.30 – Режимы хаотических колебаний
в системе при $e = 0,34$ В (а) и при $e = 0,5$ В (б)

В простейшей цифровой системе связи наличие двух видов аттрактора является достаточным для передачи двоичного кода, однако преимущество многоальтернативного управления в хаотической системе будет использовано в полной мере в том случае, если при кодировании исходной информации оперировать алфавитом из n значений управления, каждому из которых будет поставлен в соответствие единственный аттрактор, вид которого будет воспроизведён на приёмном узле.

Реализация указанных возможностей требует решения задачи синхронизации нерегулярных колебаний передатчика и приёмника.

Приёмник хаотических сигналов, работающий в автономном режиме, описывается уравнениями, соответствующими генератору, установленному на передающем узле:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= B'z + F \cdot f'(z_1) + Nu; \\ v &= Az, \end{aligned} \quad (4.42)$$

но отличающимися отсутствием управляющего сигнала $e(t)$ – вместо него подаётся некоторое постоянное значение $u = \text{const}$, а также, в общем случае, значениями постоянных параметров B' и видом нелинейной функции $f'(\cdot)$.

Определение матрицы наблюдаемости объекта $Q^T = [A \mid AB \mid AB^2]^T$ и её ранга: $\text{rank}Q = 3$, – показывает, что обеспечение равенства $v = y$ позволяет осуществить синхронизацию всех координат x_1, x_2, x_3 , т.е. полностью восстановить исходный хаотический аттрактор в приёмном узле.

Вместе с тем, замена выходных переменных приёмника и передатчика на выражения $y = A\dot{x}$ и $v = A\dot{z}$ даёт возможность не только поддерживать синхронизацию координат x , но и дополнительно включить в передаваемый сигнал y информацию об управлении $e(t)$.

Действительно, при $A = [0 \ 0 \ 1]$ условие $v = y$, или $b'_{32}z_2 + n_3u = b_{32}x_2 + n_3e(t)$, выполняемое с некоторой ошибкой $A\varepsilon$, приводит к тому, что указанная ошибка будет состоять из низкочастотной компоненты, пропорциональной разности $(e(t)-u)$, и высокочастотной части, определяемой различием координат z_2 и x_2 . Из этого следует возможность восстановления $e(t)$ в приёмнике с точностью до постоянной составляющей в виде $e'(t)$ путём низкочастотной фильтрации сигнала ε .

Для выполнения необходимого условия синхронизации $v = y$ воспользуемся сигнальной адаптацией приёмника по величине ошибки $A\varepsilon(t) = y(t) - v(t)$, введенной в каждое уравнение системы (4.42) с соответствующими коэффициентами K :

$$\begin{aligned} \dot{z} &= B'z + F \cdot f'(z_1) + Nu + K(y - v); \\ v &= A\dot{z}, \end{aligned} \quad (4.43)$$

где $K = [k_1 \ k_2 \ k_3]^T$.

Из последней системы, подставляя нижнее уравнение в верхнее, приходим к выражению:

$$\dot{z} = (E + KA)^{-1}[B'z + F \cdot f'(z_1) + Nu + Ky], \quad (4.44)$$

представляющему собою наблюдатель координат x полного порядка.

Построение асимптотически устойчивого наблюдателя сводится теперь к выбору матрицы K таким образом, чтобы характеристический полином линейной части системы (4.44) имел желаемый вид, например, биномиальный:

$$|sE - (E + KA)^{-1}B'| = (s + \Omega)^3, \quad (4.45)$$

где s – комплексная переменная в изображениях по Лапласу; E – единичная матрица; $(-\Omega)$ – вещественный корень желаемого характеристического уравнения.

Полученная общая структура системы связи представлена на Рисунке 4.31.

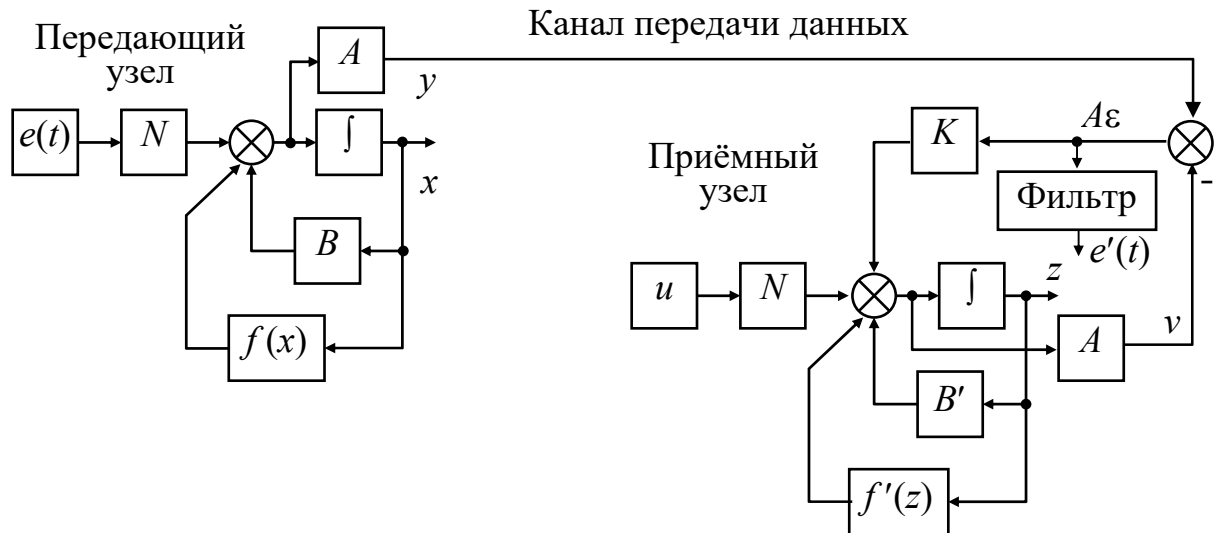


Рисунок 4.31 – Структурная схема системы управления передающим и приёмным узлами

Для получения полного выражения $\varepsilon = \dot{x} - \dot{z}$ для ошибки наблюдения передаваемого вектора \dot{x} , воспользуемся уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Bx + F \cdot f(x_1) + Ne(t); \\ \dot{z} &= B'z + F \cdot f'(z_1) + Nu + KA\varepsilon, \end{aligned} \quad (4.46)$$

откуда:

$$\varepsilon = (E + KA)^{-1}[Bx + F \cdot f(x_1) + Ne(t) - B'z - F \cdot f'(z_1) - Nu]. \quad (4.47)$$

Анализ (4.47) указывает на возможность уменьшения ε выбором матрицы K , соответствующей большему значению среднегеометрического корня Ω характеристического уравнения наблюдателя $|sE - (E + KA)^{-1}B'| = 0$. Этот вывод остаётся справедливым и при использовании в структуре системы связи сигналов u и v , определяемых из традиционных моделей (4.41) и (4.42).

Имитационное моделирование системы, представленной Рисунком 4.31, осуществлялось для несовпадающих параметров B и B' передающего и приёмного узлов:

$$B' = \begin{bmatrix} -8,9 & 8,9 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & -14,1 & 0 \end{bmatrix},$$

и $e(t)$ в виде прямоугольных импульсов, характерных для цифровых каналов передачи данных.

Выбрано значение $\Omega = 5 \text{ с}^{-1}$, для которого из уравнения (4.45) найдена матрица K коэффициентов обратной связи: $K = [-1,11 \quad -0,36 \quad -0,0039]^T$.

На Рисунке 4.32 иллюстрируется вхождение системы передачи данных в режим синхронизированных хаотических колебаний при $e(t) = \text{const} = 0,34$: Рисунок 4.32а – сигнал передатчика; 3.32б – колебания приёмника в системе после замыкания контура адаптации в момент $t = 20 \text{ с}$ становятся идентичными колебаниям передающего узла; 3.32в – колебания приёмника без использования системы адаптации не совпадают с колебаниями на передающем узле. Соответствующий этому стационарному режиму вид аттрактора показан на Рисунке 4.30а.

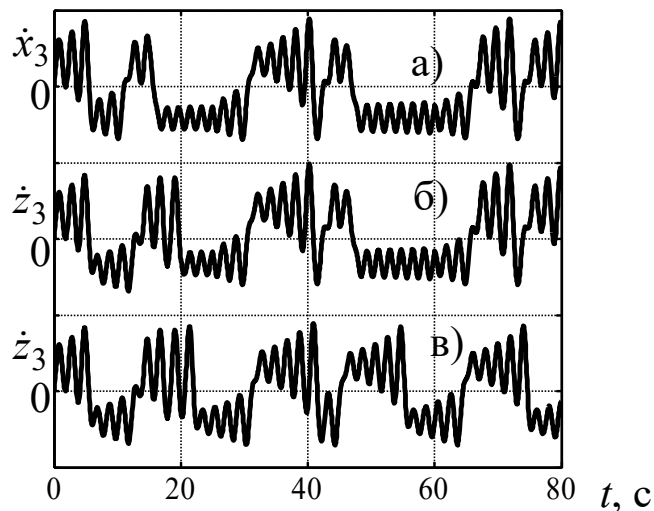


Рисунок 4.32 – Синхронизация приёмника с момента $t = 20 \text{ с}$:

- а) хаотический сигнал передатчика; б) хаотический сигнал приёмника, синхронизированный с сигналом передатчика начиная с $t = 20 \text{ с}$;
- в) хаотический сигнал приёмника без адаптации

Для проверки работоспособности системы в режиме многоальтернативного управления использовался управляющий сигнал $e(t)$, представленный на Рисунке 4.33 и принимающий два значения 0,34 и 0,5 В (см. Рисунки 4.30а, 4.30б).

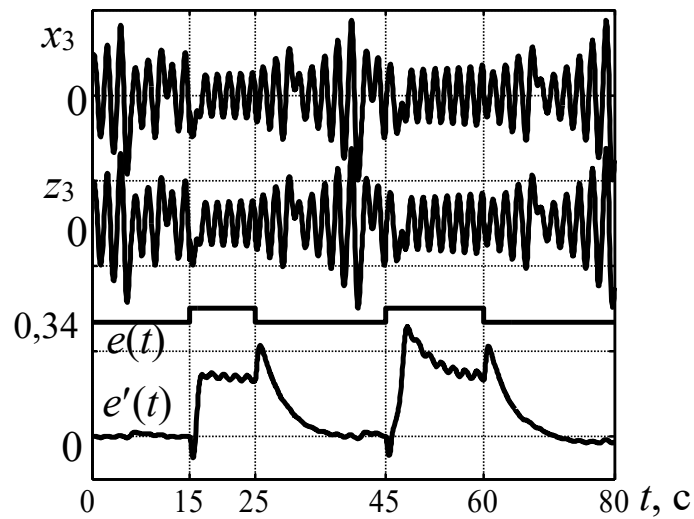


Рисунок 4.33 – Восстановление координаты x_3 и управляющего сигнала $e(t)$ в приёмном узле

На Рисунке 4.33 иллюстрируется совпадение координат x_3 и z_3 на передающем и приёмном узлах системы, а также результат $e'(t)$ восстановления управляющего двоичного сигнала $e(t)$.

Наглядное представление о сходстве аттракторов в приёмном и передающем узлах при многоальтернативном управлении системы связи дают Рисунки 4.34а, 4.34б.

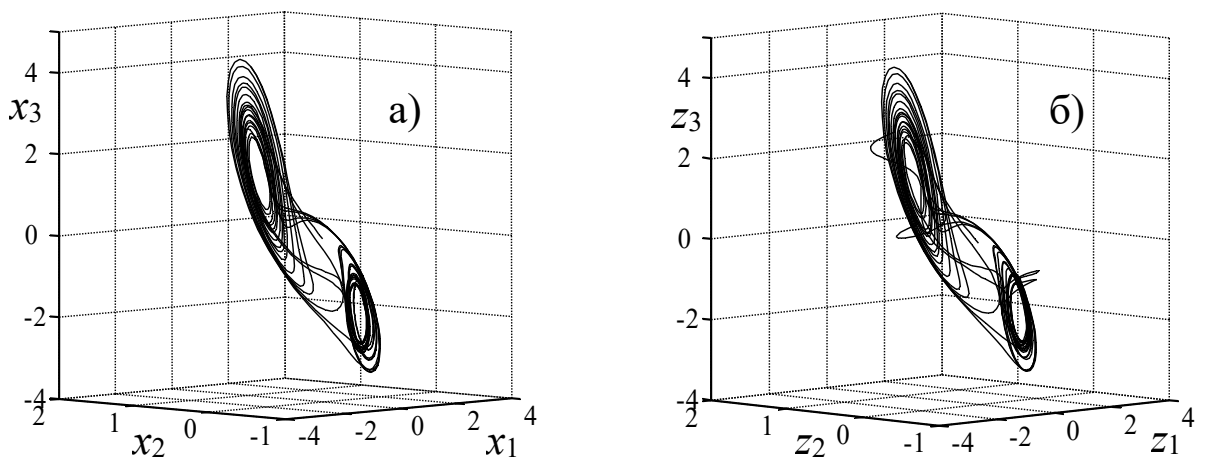


Рисунок 4.34 – Аттракторы передающего (а) и приёмного (б) узлов системы при многоальтернативном управлении $e(t)$

Применение нескольких альтернативных режимов работы хаотической системы, наряду с традиционной модуляцией и демодуляцией сигнала управления, даёт возможность использовать многообразие типов аттракторов в качестве дополнительного алфавита кодирования исходной информации.

4.3.4 Хаотические системы теплообмена

Результаты исследований, накопленные в настоящее время в гидромеханике, указывают на возможность повышения качества теплообмена за счет внутренней турбулизации, возникающей в слое жидкости при определенных условиях. Установлено, что таким условием является рост температурного градиента [142,379]: при малых градиентах температуры теплообмен осуществляется за счет движения частиц жидкости на молекулярном уровне – диффузии. При увеличении градиента возникают конвективные тепловые валы, движение которых охватывает значительные объемы жидкости. При дальнейшем росте градиента температуры конвективные валы разрушаются, и возникает неупорядоченное, хаотическое движение жидкости – турбулентность.

Таким образом, процесс теплообмена характеризуется возможностью возникновения в нём качественно отличающихся режимов функционирования, и может быть поставлена задача многоальтернативного управления этими режимами [62,417,418].

В качестве конкретной физической схемы теплообмена будем рассматривать горизонтальный слой жидкости высотой $h = 5 \cdot 10^{-2}$ м, подогреваемый снизу источником тепла с плотностью теплового потока q . Отвод тепла осуществляется через твердую стенку толщиной $\delta_{ст} = 3 \cdot 10^{-3}$ м и коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 500$ Вт/(м²·К) во внешнюю среду с постоянной температурой $T_{вн} = 20$ °С, Рисунок 4.35. Коэффициент теплопроводности стенки $\lambda_{ст} = 100$ Вт/(м·К). Такая модель наиболее близка к теплообменникам с внутренним источником энергии (реакторы, электронагреватели).

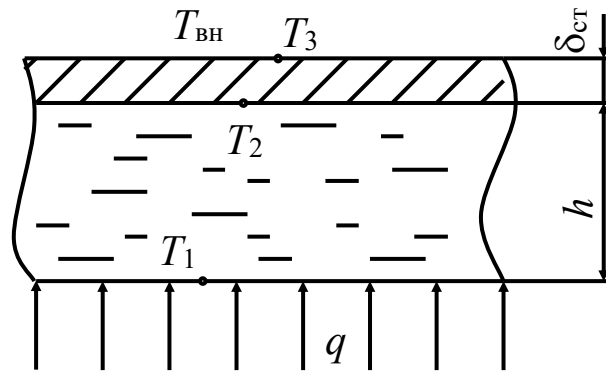


Рисунок 4.35 – Физическая модель процесса теплообмена

Для математического описания движения жидкости и теплообмена в этой физической модели использовалось уравнение Навье-Стокса [435,455]:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{v} + \mathbf{g}; \quad (4.48)$$

уравнение непрерывности потока жидкости:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{v}) = 0; \quad (4.49)$$

и уравнение переноса тепла:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(T\mathbf{v}) = k\nabla^2 T, \quad (4.50)$$

в которых $\mathbf{v}(x,y,z,t)$, $p(x,y,z,t)$, $\rho(x,y,z,t)$, $T(x,y,z,t)$ – изменяющиеся в пространстве x,y,z и времени t поля скорости, давления, плотности и температуры в слое жидкости; \mathbf{g} – ускорение свободного падения в поле тяготения, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; k – коэффициент теплопроводности жидкости, $k = 5,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$; ν – кинематическая вязкость, $\nu = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

В модели принята линейная зависимость плотности жидкости от температуры:

$$\rho = \rho_0 - \rho_0\gamma(T - T_0), \quad (4.51)$$

где γ – температурный коэффициент объёмного расширения, $\gamma = 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/К}$; T_0 – температура, для которой определялось опорное значение плотности ρ_0 : для $T_0 = 100^\circ \text{ С}$ выбрано $\rho_0 = 832 \text{ кг/м}^3$.

Граничные условия соответствуют горизонтальному слою жидкости, заключенному между боковыми стенками: термоизолированными – при моделировании режима диффузии; изотермическими – при моделировании теплообмена в подвижной жидкости.

На смачиваемых поверхностях боковых стенок все составляющие скорости равны нулю.

Модель принята двумерной: горизонтальная координата $x = [0; 0,3]$ м, вертикальная $y = [0; 0,05]$ м; изменения скорости, давления, плотности и температуры вдоль координаты z отсутствуют.

Полученное математическое описание процесса теплообмена было использовано для построения его имитационной модели в пакете Comsol Multiphysics.

Результаты моделирования позволили установить, что в рассматриваемой системе возникают три возможных режима теплообмена – диффузионный, конвективный и турбулентный.

На Рисунке 4.36 показано распределение температурного поля в режиме диффузии.

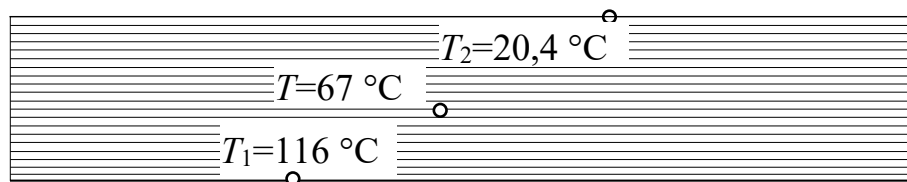


Рисунок 4.36 – Температурное поле в режиме диффузии

Этот режим возникает при очень малых градиентах температуры и его практическое значение невелико, однако рассматривается здесь с целью сопоставления показателей качества теплообмена во всех трёх режимах.

В конвективном режиме наряду с диффузионным процессом теплопередачи наблюдается возникновение чередующихся восходящих и нисходящих потоков жидкости. Эти потоки образуют устойчивые конвективные валы, Рисунок 4.37,

обеспечивающие, по сравнению с режимом диффузии, значительное увеличение интенсивности массо- и теплопереноса.

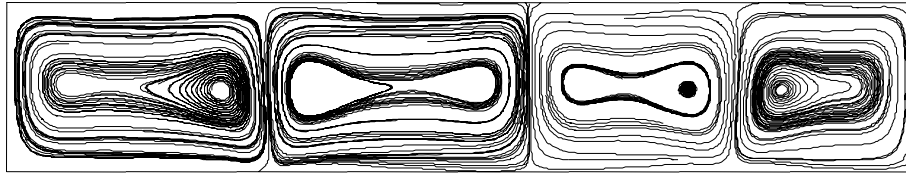


Рисунок 4.37 – Линии тока жидкости в установившемся режиме конвективного теплообмена

Наличие в режиме конвекции зон с чередующимся направлением циркуляции жидкости приводит к соответствующей периодичности температурного поля с повторяющимся повышением и понижением температуры относительно её среднего значения вдоль осей координат.

На Рисунке 4.38 участкам с более высокой температурой соответствуют затемнённые области с близко расположенными изотермами.

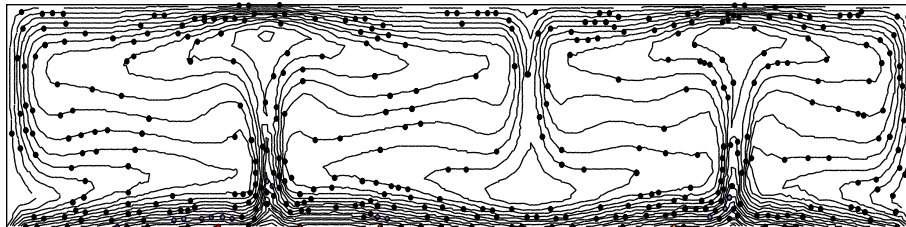


Рисунок 4.38 – Температурное поле в режиме конвекции

На Рисунке 4.39 показано изменение скорости в течение переходного процесса (около 4000 с) и после его завершения в точке плоскости xOy с координатой $x = 0,04$ м и $y = 0,005$ м. В установившемся режиме конвекция характеризуется стационарным значением скорости частиц жидкости в каждой точке.

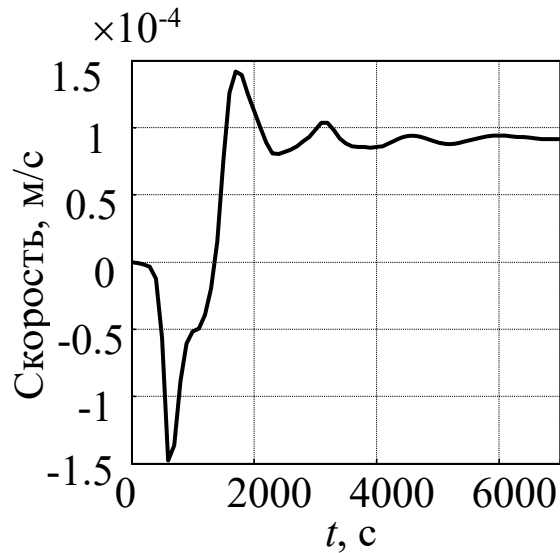


Рисунок 4.39 – Изменение скорости частиц жидкости при конвективном теплообмене

С ростом плотности теплового потока q увеличивается температура нижней стенки, возрастает неравномерность температурного поля, и конвективные валы постепенно разрушаются. Характер течения жидкости становится турбулентным, Рисунок 4.40.

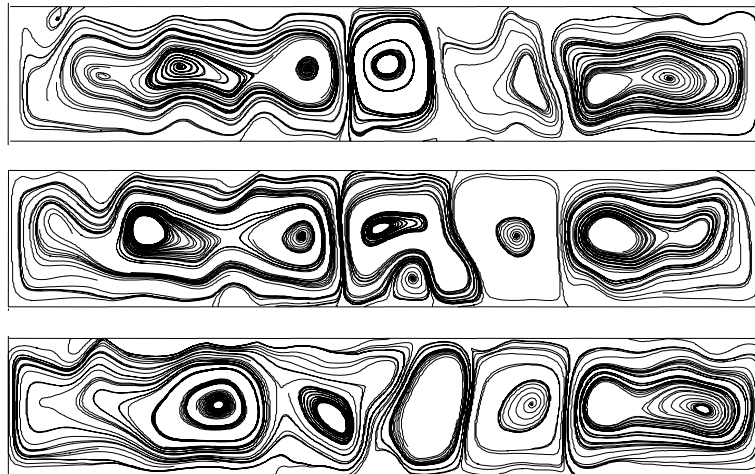


Рисунок 4.40 – Линии тока жидкости в нестационарном режиме турбулентного теплообмена в последовательные моменты времени с интервалом 40 с

Неравномерность температурного поля в турбулентном режиме становится хаотической [373,392,454,457] и нестационарной, что приводит, по сравнению с

режимом конвекции, к пространственному выравниванию средних по времени значений температур (Рисунок 4.41), и способствует повышению эксплуатационной надёжности аппаратов теплообмена.



Рисунок 4.41 – Распределение температурного поля в режиме турбулентности

Турбулентный поток характеризуется хаотическими пульсациями скорости движения частиц, способными обеспечивать быстрый перенос импульса и тепла (Рисунок 4.42).

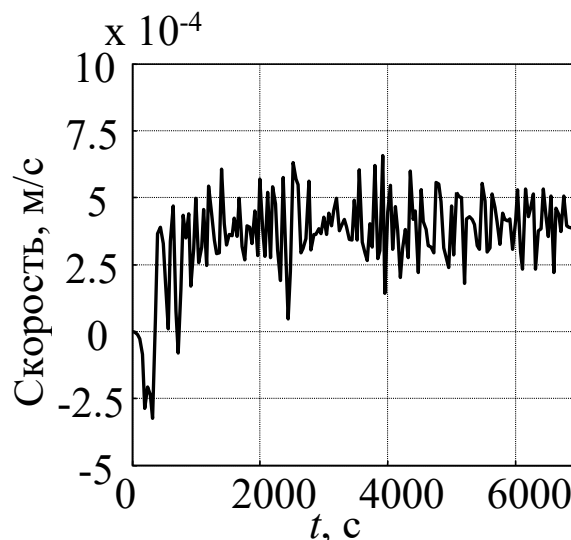


Рисунок 4.42 – Изменение скорости частиц жидкости в режиме турбулентного теплообмена

Средняя скорость при турбулентном теплообмене в несколько раз превышает значение скорости конвективного переноса, и амплитуда пульсаций скорости значительно превосходит масштабы молекулярных движений (см. Рисунки 4.39 и 4.42 для одной и той же точки). Поэтому следует ожидать повышения качества турбулентного теплообмена по сравнению с конвективным.

Для количественного сравнения показателей качества теплообмена в указанных режимах был определён коэффициент теплопередачи для каждого из них. В силу непрерывности теплового потока можно записать:

$$q = r(T_1 - T_2) - \text{для слоя жидкости};$$

$$q = \frac{\lambda_{\text{ст}}}{\delta_{\text{ст}}}(T_2 - T_3) - \text{для верхней стенки};$$

$$q = \alpha(T_3 - T_{\text{вн}}) - \text{для границы с внешней средой}.$$

В этих выражениях T_1 , T_2 и T_3 – средние по координате x температуры поверхности, подогреваемой снизу, а также нижней и верхней поверхностей стенки в соответствии с Рисунком 4.35; r – коэффициент теплопередачи слоя жидкости.

С использованием этих условий для рассматриваемых режимов теплообмена было получено выражение:

$$r = \frac{T_2 - T_{\text{вн}}}{T_1 - T_2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha} \right)}, \quad (4.52)$$

и вычислены значения коэффициента теплопередачи, представленные в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сравнительные характеристики критических режимов теплообмена

Режим теплообмена	T_1 , °С	T_2 , °С	q , Вт/м ²	r , Вт/(м ² ·К)
Диффузия	116	20,4	200	2.06
Конвекция	35	20,4	200	13.49
Турбулентность	150	24,0	2000	15.73

Результаты моделирования хорошо отражают физические особенности рассмотренных режимов и подтверждают ожидаемое повышение качества теплообмена в хаотическом режиме.

Проведённый анализ критических режимов процесса теплообмена позволяет сделать следующие выводы относительно возможной структуры системы его управления:

- цель управления содержит две практически значимые альтернативы – поддержание в системе конвективного или турбулентного характера теплообмена, т.е. одного из двух производственных режимов;

- управляющим воздействием целесообразно выбрать плотность теплового потока q ;

- отличительным признаком, по которому можно судить о конвективном или турбулентном режиме передачи тепла является амплитуда пульсаций скорости частиц жидкости. Следовательно, дисперсию $\sigma^2(t)$ этой скорости можно принять в качестве управляемой величины;

- наиболее существенными возмущающими воздействиями являются температура внешней среды $T_{вн}$ и коэффициент теплоотдачи α стенок аппарата, которые неизбежно изменяются в течение его эксплуатации.

Таким образом, для реализации многоальтернативного управления следует синтезировать систему регулирования с переменной структурой, которая содержит два замкнутых контура по отклонению регулируемой величины и предусматривает их переключение для выбора режима теплообмена.

На Рисунке 4.43 представлен вариант предлагаемой структуры системы управления, в котором на вход системы подаётся тепловой поток с некоторым расчётным номинальным значением плотности q_n , а текущее вычисленное значение дисперсии $\sigma^2(t)$ скорости $w(t)$ поступает на входы нелинейных регуляторов (в качестве $w(t)$ может быть выбрана любая компонента $v(x,y,z,t)$ или её модуль).

Статическая характеристика верхнего по Рисунку 4.43 регулятора R_T предусматривает увеличение плотности теплового потока при малых значениях $\sigma^2(t)$, т.е. этот регулятор предназначен для поддержания турбулентного режима теплообмена. Регулятор R_K уменьшает номинальное значение плотности q_n при больших $\sigma^2(t)$, т.е. обеспечивает поддержание конвективного режима.

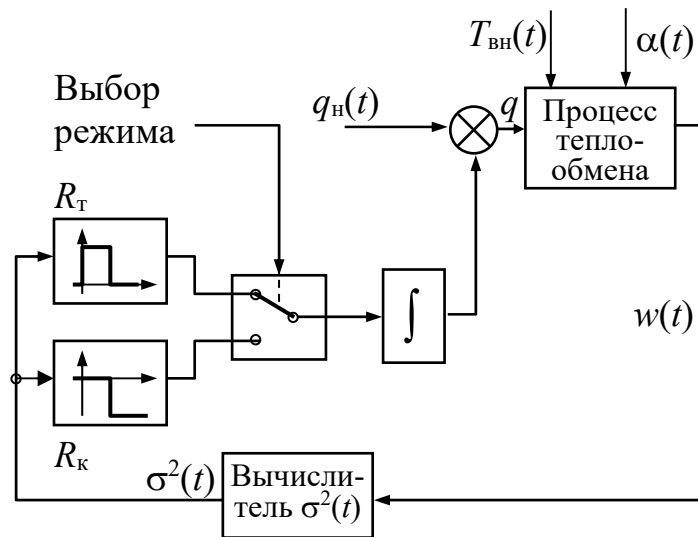


Рисунок 4.43 – Структурная схема системы управления теплообменом

Линейная часть регуляторов является общей, и представляет собою интегрирующее звено, обеспечивающее в системе свойство астатизма относительно возмущений $T_{вн}(t)$ и $\alpha(t)$.

Способность системы управлять режимами теплообмена иллюстрируется на Рисунке 4.44, где показано изменение скорости частиц жидкости в выбранной точке установки датчика ($x = 0,06$ м, $y = 0,005$ м) в интервалах времени с различными режимами, описанными в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Описание ситуаций, в которых проверялась работоспособность системы

Интервал времени, с	$T_{вн},$ °С	$\alpha,$ Вт/м ² ·К	$q,$ Вт/м ²	Состояние системы	Режим теплообмена
0 - 4000	20	500	1000	разомкнута	турбулентный
4000-17000	50	250	1000	разомкнута	конвективный
17000-20000	50	250	2000	замкнута	турбулентный

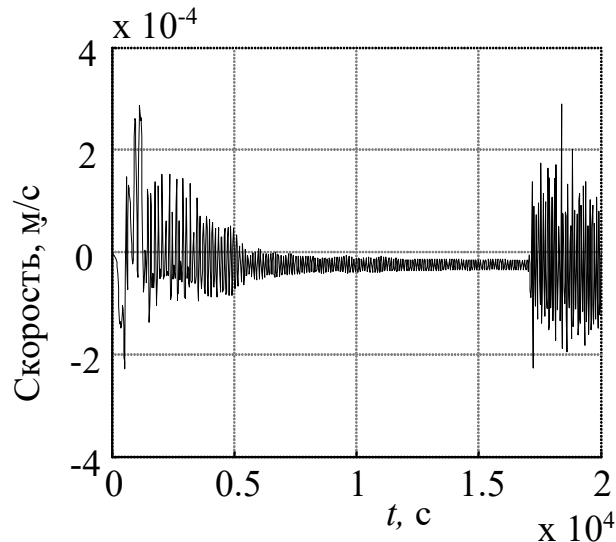


Рисунок 4.44 – Проверка работоспособности системы в режиме стабилизации турбулентного теплообмена

Изложенные выше способы контролируемого поддержания требуемого режима теплообмена построены на основе принципов многоальтернативного управления. В рассмотренной задаче такое управление реализовано в виде системы с переменной структурой.

Выводы по главе 4

1. Представленные в главе модель и результаты исследования многомерной системы высокого динамического порядка с многоуровневым случайным управлением продемонстрировали возникновение в таких системах свойства ультрастабильности как аналога гомеостаза живых систем, удерживающего систему в пределах области допустимых состояний. Указанное свойство реализуется путём иерархически поочерёдного использования альтернативных ресурсов системы по мере приближения объекта к критическому состоянию. Это обстоятельство подтверждает существование робастно-адаптивного поведения систем многоальтернативного управления как их принципиального свойства.

2. 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 нормального функционирования системы значительно превосходит возможности её параметрических изменений – интенсивности восстановления ресурсов и числа каналов этого восстановления.

3. Рассмотрен алгоритм формирования хаотических последовательностей, который открывает возможность практической реализации многоальтернативного управления критическими режимами хаотических систем с заданными и качественно разными тенденциями долговременных изменений, оцениваемых значением персистентности, либо разной мерой локальной неустойчивости, определяемой показателем Ляпунова. Составлена модель такой системы управления и показано, что использование указанных оценок качества хаотических режимов предполагает введение в систему отдельных каналов управления, отличающихся по своему быстродействию.

4. Представлен пример многоальтернативного управления в хаотической системе связи. С помощью соответствующей модели показано, что использование многоальтернативного управления в этих системах позволяет формировать качественно разные 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. Синхронизацию аттракторов на передающем и приёмном узлах целесообразно осуществлять на основе наблюдателя хаотических колебаний в приёмнике с выделением полезной составляющей сигнала с помощью фильтра.

5. Проведён анализ критических режимов процессов теплообмена с внутренним источником энергии, и сделаны выводы относительно структуры системы управления этими процессами:

– цель управления содержит две практически значимые альтернативы – поддержание в системе конвективного или турбулентного характера теплообмена, т.е. одного из двух производственных режимов;

– управляющим воздействием следует выбрать плотность теплового потока;

– наиболее существенными возмущающими воздействиями являются температура внешней среды и коэффициент теплоотдачи стенок аппарата;

– отличительным признаком, по которому можно судить о конвективном или турбулентном режиме передачи тепла является амплитуда пульсаций скорости частиц жидкости, т.е. дисперсию этой скорости можно принять в качестве управляемой величины замкнутой системы.

В соответствии с этими выводами синтезирована система многоальтернативного управления с переменной структурой, которая содержит два замкнутых контура по отклонению регулируемой величины и предусматривает их переключение для выбора режима теплообмена. Результаты численного моделирования предложенной системы продемонстрировали её работоспособность, и подтверждают ожидаемое увеличение коэффициента теплопередачи в хаотическом режиме теплообмена.

Основные материалы данной главы изложены в работах [41,44,56,57,58,60,61,62,204,209,211,238,243,417,418,427,243].

ГЛАВА 5. МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ С СУЩЕСТВЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЬЮ

К классу систем с существенной неопределённостью отнесём 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 главе будут рассмотрены системы многоальтернативного управления критическими режимами таких объектов на базе моделей нечёткого управления и игровых моделей.

5.1 Модели нечёткого управления

5.1.1 Управление структурно неустойчивыми объектами

Практическое применение принципов многоальтернативности предусматривает достижение цели управления на основе некоторого множества алгоритмов, используемых в соответствии с текущим состоянием объекта. Порождаемое указанным подходом разнообразие режимов функционирования многоальтернативной системы управления приводит к задаче анализа её устойчивости в следующей постановке [5,108,66,128,213]:

– будет ли система, устойчивая отдельно с каждым из используемых алгоритмов управления, устойчивой при произвольном переключении этих алгоритмов в процессе работы;

– каким должен быть класс допустимых управлений, гарантирующих устойчивость таких систем, в том числе и в случае, когда объект управления является структурно неустойчивым, то есть остаётся таковым при любых значениях своих параметров.

Поставленные задачи могут быть решены на основе теории гибридных систем, в рамках которой рассмотрим решение второй из сформулированных выше задач: нахождение класса законов стабилизирующего многоальтернативного управления структурно неустойчивым объектом. Примерами таких объектов являются летательные аппараты вертикального взлёта и посадки, подводные корабли, атомные и химические реакторы без самовыравнивания.

При всём разнообразии процессов, происходящих в перечисленных устройствах, для них характерна общая необходимость выполнения своих функций в критическом режиме – состоянии неустойчивого равновесия, задача поддержания которого должна решаться средствами автоматического управления.

В качестве типового представителя структурно неустойчивых объектов рассмотрим обратный маятник, установленный на опоре, горизонтально перемещаемой с некоторым трением под действием внешней управляющей силы [162]. Расчётная схема маятника представлена на Рисунке 5.1 [214]:

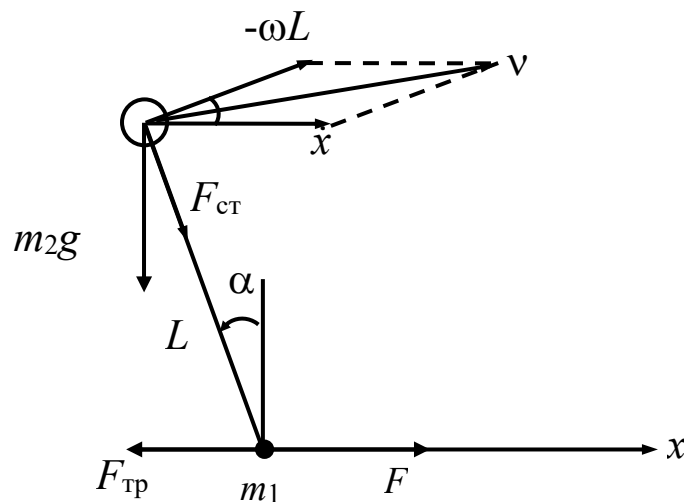


Рисунок 5.1 – Расчётная схема неустойчивого объекта управления

На Рисунке 5.1 обозначены: m_1 , m_2 – массы опоры и сосредоточенная масса маятника соответственно; L – длина маятника; x – координата, характеризующая горизонтальное положение опоры маятника; α – угол отклонения маятника от

вертикали; g – ускорение свободного падения; ω – угловая скорость; μ – коэффициент сухого трения опоры; $F_{\text{тр}}$ – сила сухого трения; F – внешняя сила, приложенная к подвижной опоре; $F_{\text{ст}}$ – сила, действующая вдоль стержня маятника.

Движение рассматриваемого объекта описывается системой уравнений [213,405]:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2)\ddot{x} - m_2L(\ddot{\alpha} \cos \alpha - \dot{\alpha}^2 \sin \alpha) = F - F_{\text{тр}}; \\ F_{\text{тр}} = \mu [m_1g + m_2 \cos \alpha (g \cdot \cos \alpha - \ddot{x} \sin \alpha - \dot{\alpha}^2 L) \text{sign}(\dot{x})]; \\ -\ddot{x} \cos \alpha + L\ddot{\alpha} - g \sin \alpha = 0, \end{cases} \quad (5.1)$$

определяющей в качестве регулируемых величин угловое положение $\alpha(t)$ маятника и координату $x(t)$ его подвижной опоры, а также общий порядок объекта, равный четырём.

Примем за положение равновесия координаты $x = \dot{x} = 0$ и $\alpha = \dot{\alpha} = 0$ (перевёрнутое вертикальное положение маятника) и перепишем систему (5.1) для малых отклонений около этого положения в автономном режиме:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2)\ddot{x} - m_2L\ddot{\alpha} = 0; \\ -m_2L\ddot{x} + m_2L^2\ddot{\alpha} - m_2Lg\alpha = 0. \end{cases} \quad (5.2)$$

Представим (5.2) в виде:

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = 0, \quad (5.3)$$

в котором $q = [x \ \alpha]^T$ – вектор координат состояния;

$$A = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 & -m_2L \\ -m_2L & m_2L^2 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -m_2Lg \end{bmatrix}. \quad (5.4)$$

Формальный анализ асимптотической устойчивости положения равновесия объекта (5.2) проведём с помощью характеристической матрицы

$$f(\lambda) = A\lambda^2 + B\lambda + Cq, \quad (5.5)$$

одно из собственных значений которой:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\sqrt{m_1 L g(m_1 + m_2)}}{m_1 L} & -\frac{\sqrt{m_1 L g(m_1 + m_2)}}{m_1 L} \end{bmatrix}^T \quad (5.6)$$

остаётся положительным при любых значениях параметров m_1 , m_2 и L , т.е. объект структурно неустойчив.

Введём в (5.3) возможность многоальтернативного позиционного управления $C_{\sigma(t)}q$, $C_{\sigma(t)} = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ с некоторым неизвестным законом $\sigma(t)$ переключения N альтернатив:

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + C_{\sigma(t)}q = 0. \quad (5.7)$$

Для определения условий многоальтернативной стабилизации системы (5.7) выделим из неё две изолированные подсистемы, т.е. осуществим декомпозицию [108,5,251]:

$$A\dot{z} + Bz = 0; \quad (5.8)$$

$$B\dot{v} + C_{\sigma(t)}v = 0, \quad (5.9)$$

и воспользуемся теоремой [5]:

если подсистема (5.8) асимптотически устойчива;

и все подсистемы (5.9) асимптотически устойчивы и для них существует непрерывно дифференцируемая общая однородная второго порядка функция Ляпунова, удовлетворяющая условиям теоремы Ляпунова об асимптотической устойчивости;

то при достаточно значительном доминировании скоростных компонент $B\dot{q}$ положение равновесия $q = \dot{q} = 0$ системы (5.7) экспоненциально устойчиво при произвольном законе переключения $\sigma(t)$.

Проверим условия теоремы для рассматриваемого случая [105].

Для асимптотической устойчивости (5.8) достаточно положительной определённости квадратичной формы функции Ляпунова $V_1(z) = z^T A z$ и отрицательной определённости её производной $\dot{V}_1(z) = -2z^T B z$.

Положительная определённость $V_1(z)$ в соответствии с критерием Сильвестра подтверждается положительностью главных диагональных миноров матрицы A :

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= (m_1 + m_2) > 0; \\ \Delta_2 &= (m_1 + m_2)m_2L^2 - m_2^2L^2 = m_1m_2L^2 > 0, \end{aligned} \quad (5.10)$$

сохраняемой при любых значениях параметров объекта.

Условие отрицательной определённости $\dot{V}_1(z) = -2z^T B z$ требует положительности главных миноров матрицы B , из чего следует что в систему (5.7) должны быть введены скоростные компоненты $b_x \dot{x}$ и $b_\alpha \dot{\alpha}$, например, в виде:

$$B = \begin{bmatrix} b_x \dot{x} & 0 \\ 0 & b_\alpha \dot{\alpha} \end{bmatrix}, \quad (5.11)$$

с достаточно большими коэффициентами b_x и b_α , обеспечивающими доминирование скоростных компонент управления.

Асимптотическая устойчивость подсистемы (5.9) требует положительной определённости квадратичной формы $V_2(v) = v^T B v$ и отрицательной определённости её производной $\dot{V}_2(v) = -2v^T C_{\sigma(t)} v$.

Для матрицы B указанное требование выполняется при положительности коэффициентов $b_x > 0$ и $b_\alpha > 0$, обеспечиваемой знаком отрицательной обратной связи управления по координатам \dot{x} и $\dot{\alpha}$.

Положительность главных диагональных миноров матрицы $C_{\sigma(t)}$ предполагает введение в систему (5.7) компонент позиционного управления $c_{x,\sigma(t)} x$ и $c_{\alpha,\sigma(t)} \alpha$ в виде:

$$C_{\sigma(t)} = \begin{bmatrix} c_{x,\sigma(t)} & 0 \\ 0 & c_{\alpha,\sigma(t)} - m_2 Lg \end{bmatrix}, \quad (5.12)$$

из которого вытекает, что на позиционные компоненты стабилизирующего управления накладываются требования преобладания над потенциальными силами в объекте $c_{x,\sigma(t)} > 0$ и $c_{\alpha,\sigma(t)} > m_2 Lg$ для всех вариантов многоальтернативного управления.

Таким образом, для стабилизации рассматриваемого структурно неустойчивого объекта достаточно введения многоальтернативного управления, содержащего позиционные и скоростные компоненты, отвечающие условиям доминирования скоростных составляющих и преобладания позиционных сил управления над потенциальными силами, действующими в объекте. Стабилизация объекта в указанном классе воздействий обеспечивается при произвольном законе переключения альтернативных управлений.

В качестве примера применения полученного общего вывода рассмотрим задачу многоальтернативной стабилизации объекта (5.2) на основе нечёткого алгоритма [59].

Идеи многоальтернативности имеют ярко выраженные биологические аналогии, определённые в виде закона необходимого разнообразия У. Эшби [322], и, в частности, хорошо соответствуют содержанию предложенных Л. Заде процедур нечёткого управления, отражающих в определённой мере процедуры мышления человека [102]. Действительно, для процесса имплицитного принятия управляющего решения по правилу нечёткого вывода «если..., то...» характерны наиболее важные черты многоальтернативных систем:

– многоальтернативность выбора: для каждой значимой текущей ситуации устанавливается своё нечёткое правило вывода с соответствующим весом, т.е. способ формирования управления в системе непрерывно изменяется в соответствии с состоянием объекта;

– многокритериальность выбора: нечёткие решающие правила в состоянии одновременно оперировать несколькими критериями, характеризующими состояние объекта;

– параллельность выбора: принятие решения по каждому правилу нечёткого вывода может осуществляться независимо – параллельно во времени, с последующим объединением частных решений в результирующее управление.

Перечисленные обстоятельства позволяют ожидать от нечёткого управления полного использования принципиальных возможностей многоальтернативных систем в задачах регулирования объектами в критических режимах.

Будем использовать типовую структуру системы с регулятором, на вход которого поступает информация о состоянии объекта, а с выхода снимается сигнал, преобразуемый в управляющее воздействие на объект. Коэффициенты передачи датчиков обратной связи принимаются единичными.

Для принятой структуры синтез нечёткого регулятора включает в себя:

– построение перечня лингвистических и нечётких входных и выходных переменных регулятора;

– формирование функций принадлежности для указанных переменных;

– построение решающих правил нечёткого логического вывода, определяющих в своей совокупности управление на объект.

В качестве входных лингвистических переменных регулятора использовались полученные в модели переменные состояния объекта: z_1, z_2 – угловое положение (угол) $\alpha(t)$, и угловая скорость $\dot{\alpha}(t)$ маятника; z_3, z_4 – отклонение $\Delta x(t) = x_0 - x(t)$ координаты опоры $x(t)$ от заданного значения x_0 и скорость $\dot{x}(t)$ опоры.

Выходной лингвистической переменной регулятора принято управляющее воздействие (управление) u , характеризующее сигнал u , например, напряжение, преобразуемое в исполнительном механизме в силовое воздействие F с коэффициентом передачи $k = 150$ Н/В.

Для указанных лингвистических переменных сформированы соответствующие нечёткие значения и их функции принадлежности μ (Рисунки 5.2-5.5):

$$z_1 = \{\text{угол отрицательный; близок к нулю; положительный}\} = \{z_1^1, z_1^2, z_1^3\},$$

Рисунок 5.2;

$z_2 = \{\text{угловая скорость отрицательная; близка к нулю; положительная}\} = \{z_2^1, z_2^2, z_2^3\}$, Рисунок 5.3;

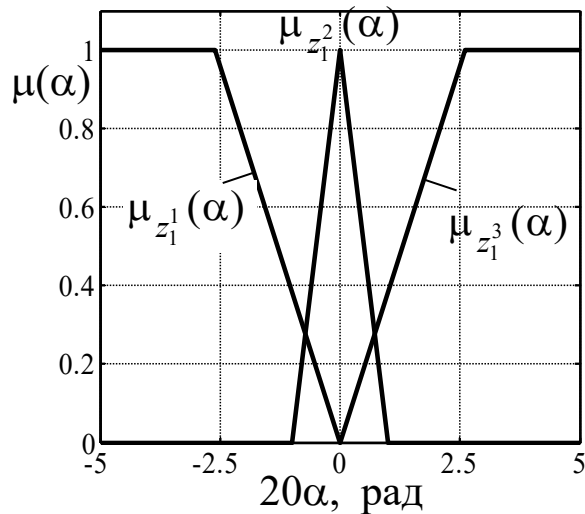


Рисунок 5.2 – Функции принадлежности углового положения маятника

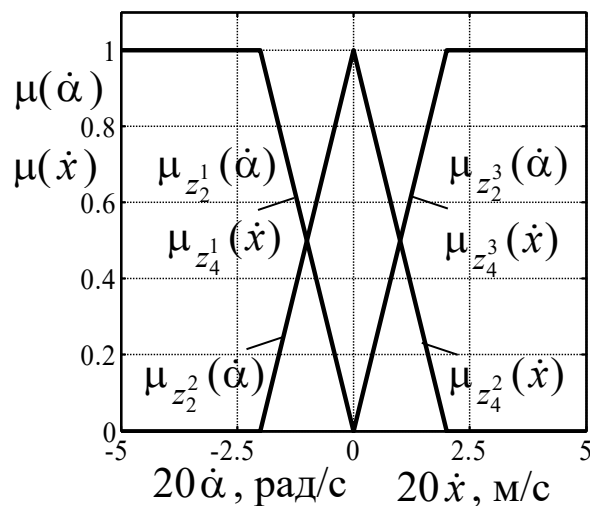


Рисунок 5.3 – Функции принадлежности угловой скорости маятника и линейной скорости его опоры

$z_3 = \{\text{опора находится слева далеко от задания; слева недалеко от задания; слева близко от задания; справа близко от задания; справа недалеко от задания; справа далеко от задания}\} = \{z_3^1, z_3^2, z_3^3, z_3^4, z_3^5, z_3^6\}$, Рисунок 5.4;

$z_4 = \{\text{скорость опоры отрицательная; близка к нулю; скорость опоры положительная}\} = \{z_4^1, z_4^2, z_4^3\}$, Рисунок 5.3;

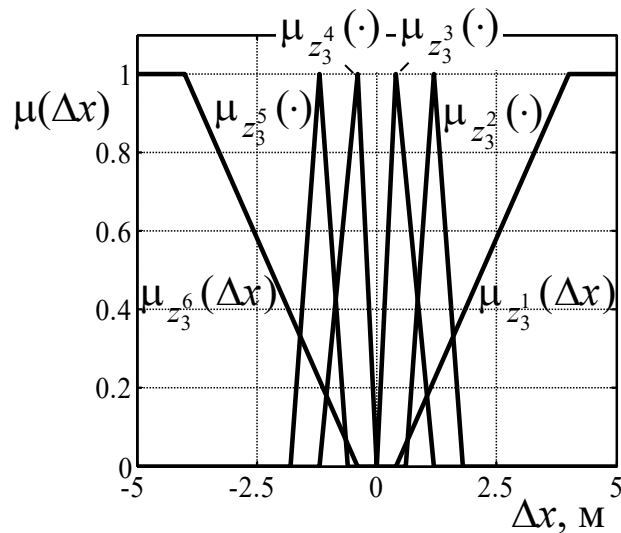


Рисунок 5.4 – Функции принадлежности отклонения координаты опоры от заданного значения

$u = \{\text{управление отрицательное; отрицательное среднее; отрицательное малое; положительное малое; положительное среднее; положительное}\} = \{u^1, u^2, u^3, u^4, u^5, u^6\}$, Рисунок 5.5.

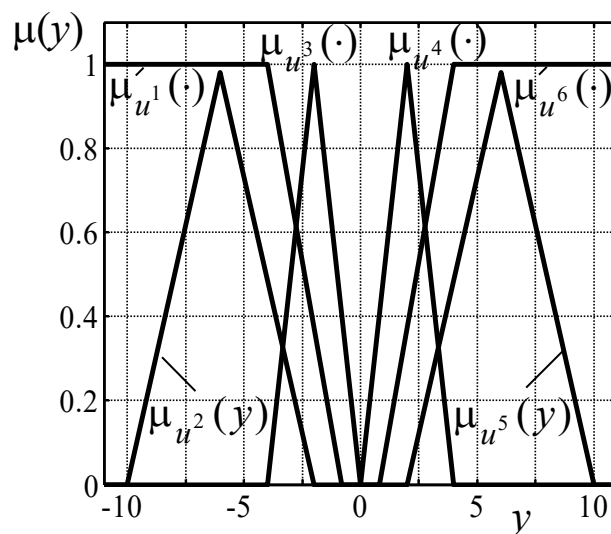


Рисунок 5.5 – Функции принадлежности выходной переменной регулятора

Для формирования решающих правил введём нечёткие высказывания, сохраняющие наименование нечётких значений лингвистических переменных: \tilde{z}_1^1 – угловое отклонение маятника отрицательное; \tilde{z}_1^2 – угловое отклонение маятника близко к нулю; и т.д.

Целью управления поставим перемещение опоры маятника из произвольной начальной координаты $x(0)$ в заданную точку x_0 при одновременной стабилизации его оси в вертикальном положении на всех этапах перемещения опоры. При этом алгоритм должен быть нечувствительным, грубым к существенным изменениям параметров объекта (подразумевается, что энергетические возможности исполнительного механизма во всех случаях достаточны для управления).

Основная особенность задачи построения алгоритма управления заключается в её многокритериальности – одним воздействием u необходимо обеспечивать управление двумя координатами объекта: угловым отклонением α маятника и положением x его опоры, т.е. возникает дефицит управляющих воздействий.

В связи с этим, в основу построения решающих правил была положена идея разделения регулирования движений: как только угол и его скорость достигают малых значений z_1^2 и z_2^2 , осуществляется переход к регулированию по состоянию опоры. Но если значение α или $\dot{\alpha}$ выходят из малого диапазона, приоритетным становится регулирование по значению угла или скорости его изменения.

В результате такого подхода к решению поставленной задачи управления маятником получено десять нечётких решающих правил:

$$\tilde{z}_1^2 \wedge \tilde{z}_2^2 \wedge \tilde{z}_3^1 \wedge \tilde{z}_4^1 \rightarrow \tilde{u}^1; \quad (5.13)$$

$$\tilde{z}_1^2 \wedge \tilde{z}_2^2 \wedge \tilde{z}_3^6 \wedge \tilde{z}_4^3 \rightarrow \tilde{u}^6; \quad (5.14)$$

$$\tilde{z}_1^2 \wedge \tilde{z}_2^2 \wedge \tilde{z}_3^2 \rightarrow \tilde{u}^5; \quad (5.15)$$

$$\tilde{z}_1^2 \wedge \tilde{z}_2^2 \wedge \tilde{z}_3^3 \rightarrow \tilde{u}^4; \quad (5.16)$$

$$\tilde{z}_1^2 \wedge \tilde{z}_2^2 \wedge \tilde{z}_3^4 \rightarrow \tilde{u}^3; \quad (5.17)$$

$$\tilde{z}_3^5 \wedge \tilde{z}_1^2 \wedge \tilde{z}_2^2 \rightarrow \tilde{u}^2; \quad (5.18)$$

$$\tilde{z}_1^1 \rightarrow \tilde{u}^6; \quad (5.19)$$

$$\tilde{z}_1^3 \rightarrow \tilde{u}^1; \quad (5.20)$$

$$\tilde{z}_2^1 \rightarrow \tilde{u}^6; \quad (5.21)$$

$$\tilde{z}_2^3 \rightarrow \tilde{u}^1, \quad (5.22)$$

с весовыми коэффициентами $\{w_1 \dots w_{10}\} = \{1; 1; 0,1; 0,1; 0,1; 0,1; 1; 1; 0,1; 0,1\}$, которые будут использованы ниже при формировании текущих компонент управляющего воздействия.

Правила (5.15)-(5.22) формируют очевидные по знаку и модулю величины управления, приводящие координаты маятника в заданное состояние. Например, по правилу (5.15) при практически установившемся угловом положении маятника, близкому к вертикальному (z_1^2 и z_2^2), и положении опоры слева недалеко от задания (z_3^2), вырабатывается положительное среднее управление \tilde{u}^5 .

По правилам (5.13), (5.14) осуществляется принудительное угловое отклонение маятника в сторону требуемого движения опоры так, что происходит передача управления к правилам (5.19)-(5.22) по угловым координатам, и далее, после попадания этих координат в диапазоны z_1^2 и z_2^2 , движение регулируется по правилам (5.15)-(5.18), приводящим опору в заданное положение x_0 .

На основе правил логического вывода (5.15)-(5.22) формируется результирующее управляющее воздействие y^* , соответствующее текущему состоянию объекта. Для этого в рассматриваемом примере была использована ситуационная модель принятия решения, не требующая формального преобразования входных переменных $[\alpha(t) \ \dot{\alpha}(t) \ \Delta x(t) \ \dot{x}(t)]^T$ в нечёткую форму [261]:

1) текущему вектору входных координат $[\alpha(t^*) \ \dot{\alpha}(t^*) \ \Delta x(t^*) \ \dot{x}^*]^T = [\alpha^* \ \dot{\alpha}^* \ \Delta x^* \ \dot{x}^*]^T$ ставятся в соответствие значения функций принадлежности

$\mu_{z_i^{k_i}}(\alpha^*, \dot{\alpha}^*, \Delta x^*, \dot{x}^*) = \mu_{z_i^{k_i}}^*$, $i = \overline{1,4}$, $k_1=k_2=k_4=3$, $k_3=6$, и степени истинности

η_j , $j = \overline{1,10}$ ситуаций-посылок в правилах (5.13)-(5.22):

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_1 = \min(\mu_{z_1^2}^*, \mu_{z_2^2}^*, \mu_{z_3^1}^*, \mu_{z_4^1}^*) \\ \eta_2 = \min(\mu_{z_1^2}^*, \mu_{z_2^2}^*, \mu_{z_3^6}^*, \mu_{z_4^3}^*) \\ \eta_3 = \min(\mu_{z_1^2}^*, \mu_{z_2^2}^*, \mu_{z_3^2}^*) \quad \eta_4 = \min(\mu_{z_1^2}^*, \mu_{z_2^2}^*, \mu_{z_3^3}^*) \\ \eta_5 = \min(\mu_{z_1^2}^*, \mu_{z_2^2}^*, \mu_{z_3^4}^*) \quad \eta_6 = \min(\mu_{z_1^2}^*, \mu_{z_2^2}^*, \mu_{z_3^5}^*) \\ \eta_7 = \mu_{z_1^1}(\alpha^*); \quad \eta_8 = \mu_{z_3^3}(\alpha^*); \\ \eta_9 = \mu_{z_2^1}(\dot{\alpha}^*); \quad \eta_{10} = \mu_{z_2^3}(\dot{\alpha}^*); \end{array} \right. \quad (5.23)$$

2) формируются текущие компоненты управления в виде нечётких множеств с функциями принадлежности:

$$\mu_{u^j}^*(y) = w_j \cdot \eta_j \cdot \mu_{u^j}(y), \quad j = \overline{1,10}. \quad (5.24)$$

Отметим, что каждое из вычислений (5.23) и (5.24) по индексу j может выполняться параллельно, т.е. одновременно;

3) найденные компоненты управления $\mu_{u^j}^*(y)$ объединяются в результирующее нечёткое множество:

$$\mu_u^*(y) = \sum_{j=1}^{10} \mu_{u^j}^*(y); \quad (5.25)$$

4) определяется значение выходной переменной регулятора с помощью первого момента функции принадлежности $\mu_u^*(y)$:

$$y^* = \frac{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} y \cdot \mu_u^*(y) dy}{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \mu_u^*(y) dy}, \quad (5.26)$$

где $[y_{\min}, y_{\max}] = [-20, 20]$ – область определения переменной y .

Проверка стабилизирующих и робастных свойств синтезированной системы проводилась на построенной выше модели обратного маятника с параметрами: $m_1 = 100$ кг; $m_2 = 20 \dots 200$ кг; $L = 5$ м; $g = 9,81$ м/с²; $\mu = 0,05$, среди которых масса m_2 изменялась в десять раз.

Во всех исследованиях начальное угловое положение маятника $\alpha(0) = 0,2$ рад и положение опоры $x(0) = 0$.

На Рисунке 5.6 показан процесс движения маятника без требования переместить опору в точку $x_0 \neq 0$, т.е. целью управления являлась только задача стабилизации маятника в вертикальном положении.

В этом опыте начальное угловое отклонение, равное 0,2 рад, при массе $m_2=20$ кг устраняется системой за 3 с и при $m_2=200$ кг – за 4 с. Стабилизация осуществляется путём соответствующих перемещений опоры. Время возвращения опоры в исходное положение после завершения процесса угловой стабилизации составляет в обоих случаях 35 с.

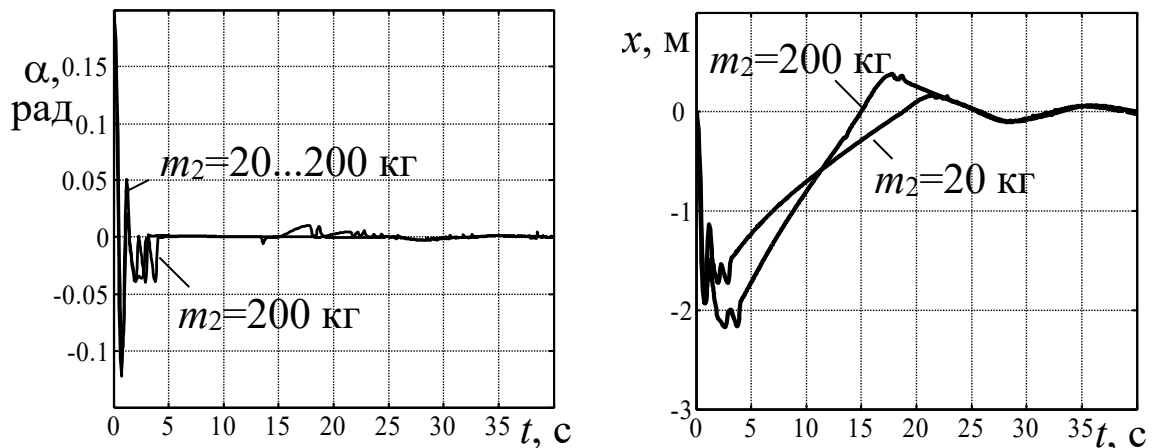


Рисунок 5.6 – Процесс стабилизации маятника

Проверка качества работы системы при совмещении задач угловой стабилизации маятника и перемещения его опоры представлена на Рисунке 5.7.

Как и упоминалось в описании алгоритма, из Рисунка 5.7 следует, что движение опоры первоначально, в течение 3...5 с, подчинено задаче компенсации

углового отклонения маятника от вертикали. После стабилизации маятника начинается перемещение опоры в заданное положение x_0 .

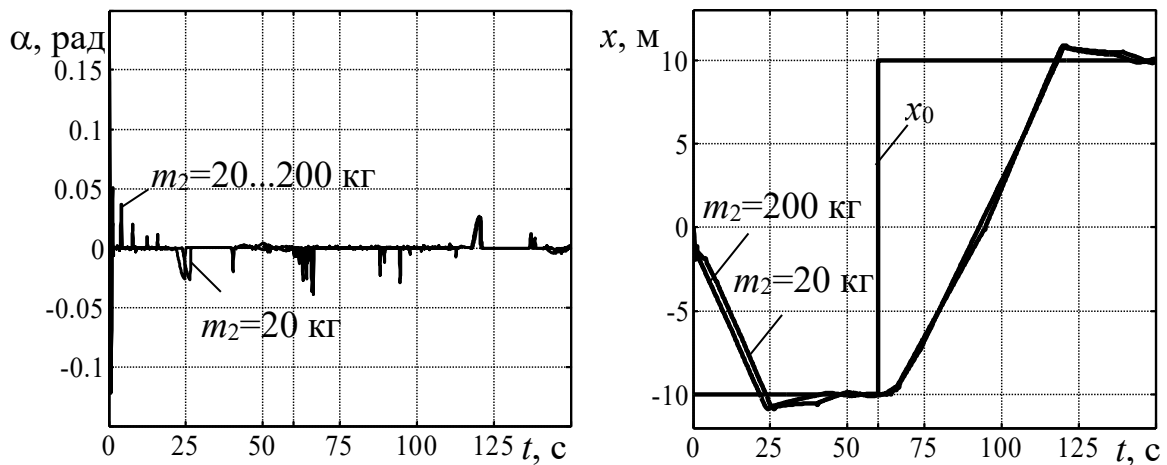


Рисунок 5.7 – Движение маятника при перемещении опоры в сторону его начального углового отклонения $\alpha_0 = 0,2$ рад

Несущественные различия в траекториях и времени регулирования маятника при десятикратном изменении его массы свидетельствуют о робастности системы.

Следует отметить, что в процессе синтеза алгоритма многоальтернативного нечёткого управления не возникает необходимость в использовании математической модели объекта (вследствие существенной неопределённости её параметров). Кроме того, на основе принципа разделения функций регулятора для рассматриваемого объекта была преодолена проблема дефицита управляющих воздействий.

5.1.2 Гомеостатическое управление процессами теплообмена

Перейдём к более сложной задаче нечёткого гомеостатического управления многомерным процессом теплообмена, параметры которого априорно не определены и являются нестационарными [65,80,175,294,412].

В качестве объекта управления выбран двухконтурный процесс противоточного теплообмена, обобщённая схема которого показана на Рисунке 5.8.

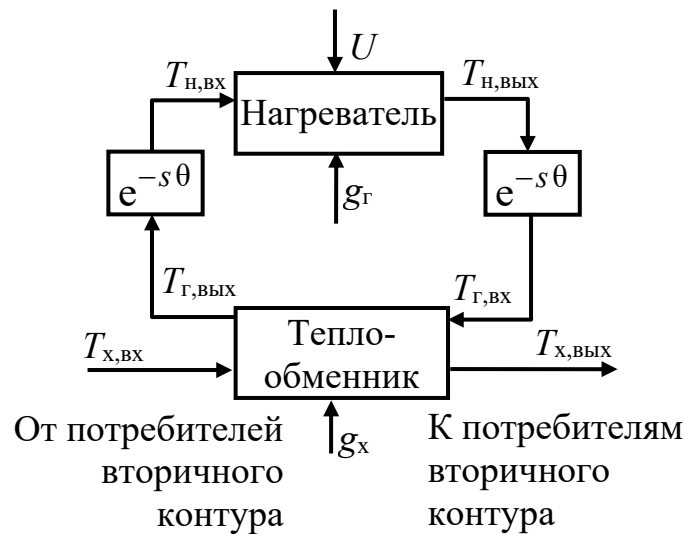


Рисунок 5.8 – Схема противоточного теплообмена

На схеме обозначены: $T_{x,вх}$, $T_{x,вых}$ – температуры «холодного» теплоносителя вторичного контура на входе и выходе теплообменника соответственно; $T_{\Gamma,вх}$, $T_{\Gamma,вых}$ – температуры «горячего» теплоносителя контура нагревателя на входе и выходе теплообменника; $T_{н,вх}$, $T_{н,вых}$ – температуры теплоносителя на входе и выходе нагревателя; θ – время, необходимое для прохождения теплоносителем расстояния между теплообменником и нагревателем; $e^{-s\theta}$ – передаточная функция звена запаздывания; g_x , g_Γ – массовые расходы теплоносителей в секунду в контуре потребителей и в контуре нагревателя; U – температура рабочей поверхности нагревателя. Отметим, что диапазон допустимых значений $T_{x,вых}$ и максимально допустимое значение $T_{н,вых}$ в реальных системах строго регламентированы, т.е. являются критическими характеристиками рассматриваемого процесса.

В объект управления дополнительно введён нагреватель, образующий совместно с теплообменником замкнутый первичный контур общего процесса теплообмена (см. Рисунок 5.8).

Нагреватель и теплообменник представляются отдельными цепочками из N последовательных ячеек, внутри каждой из которых температура теплоносителей в течение заданного малого интервала dt времени принимается постоянной. Такая пространственная и временная дискретизация рассматриваемых процессов позволяет описать их в разностной форме [264].

Для ячейки j ($j = \overline{1, N}$) нагревателя на интервале времени i :

$$\frac{dT_{\text{H},i-1}^j}{d\tau} = \frac{[ks(U - T_{\text{H},i-1}^j) - g_{\Gamma}c(T_{\text{H},i-1}^j - T_{\text{H},i-1}^{j-1})]}{m_{\Gamma}c}, \quad (5.27)$$

$$T_{\text{H},i}^j = T_{\text{H},i-1}^j + \left(\frac{dT_{\text{H},i-1}^j}{d\tau} \right) \cdot dt, \quad (5.28)$$

для ячейки j теплообменника (значение j возрастает по направлению движения «холодного» теплоносителя):

$$\frac{dT_{\text{X},i-1}^j}{d\tau} = \frac{[ks(T_{\Gamma,i-1}^j - T_{\text{X},i-1}^j) - g_{\text{X}}c(T_{\text{X},i-1}^j - T_{\text{X},i-1}^{j-1})]}{m_{\text{X}}c}, \quad (5.29)$$

$$\frac{dT_{\Gamma,i-1}^j}{d\tau} = \frac{[-ks(T_{\Gamma,i-1}^j - T_{\text{X},i-1}^j) + g_{\Gamma}c(T_{\Gamma,i-1}^{j+1} - T_{\Gamma,i-1}^j)]}{m_{\Gamma}c}, \quad (5.30)$$

$$T_{\text{X},i}^j = T_{\text{X},i-1}^j + \left(\frac{dT_{\text{X},i-1}^j}{d\tau} \right) \cdot dt; \quad (5.31)$$

$$T_{\Gamma,i}^j = T_{\Gamma,i-1}^j + \left(\frac{dT_{\Gamma,i-1}^j}{d\tau} \right) \cdot dt, \quad (5.32)$$

$$T_{\Gamma,\text{ВХ},i} = T_{\text{H},\text{ВЫХ},i-\frac{\theta}{dt}}; \quad T_{\text{H},\text{ВХ},i} = T_{\Gamma,\text{ВЫХ},i-\frac{\theta}{dt}} \quad (5.33)$$

где $\frac{dT}{d\tau}$ – градиент температуры в элементарной ячейке; c – удельная теплоёмкость теплоносителя; k – коэффициент теплопередачи через стенку между

горячим и холодным теплоносителями; s – площадь теплопередачи в пределах одной ячейки; m_g, m_x – массы теплоносителей в элементарной ячейке; $T_H^0 = T_{H,ВХ}$; $T_H^N = T_{H,ВЫХ}$; $T_X^0 = T_{X,ВХ}$; $T_X^N = T_{X,ВЫХ}$; $T_\Gamma^{N+1} = T_{\Gamma,ВХ}$; $T_\Gamma^1 = T_{\Gamma,ВЫХ}$.

Численное решение уравнений (5.27)-(5.32) реализовано в пакете MatLab на имитационной модели, общий вид которой представлен на Рисунке 5.9.

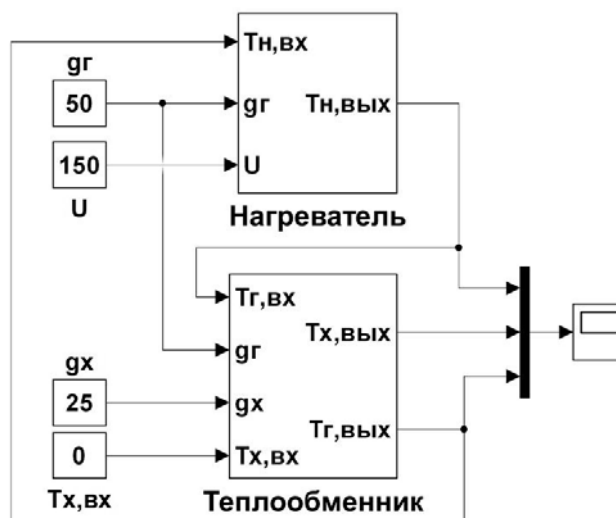


Рисунок 5.9 – Имитационная модель процесса теплообмена

Отличительной особенностью этой модели является прямая имитация функционирования каждой из N идентичных ячеек нагревателя и теплообменника с шагом решения dt , принятым при временной дискретизации процесса. Фрагмент модели нагревателя с двумя первыми ячейками ($j = 1, 2$) показан на Рисунке 5.10.

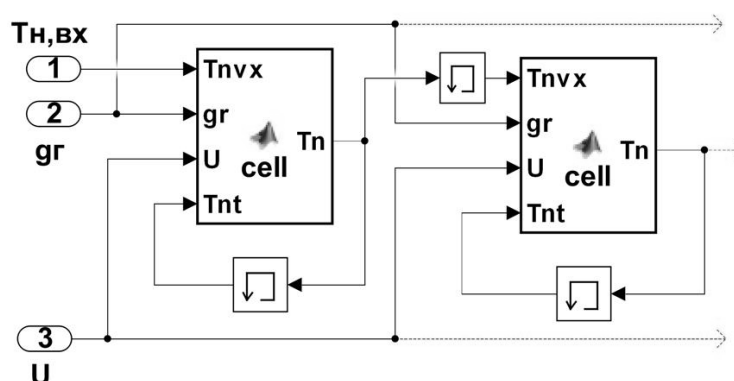


Рисунок 5.10 – Фрагмент модели нагревателя

Программируемые модули “cell” на Рисунке 5.10 содержат операторы:

$$\text{function } T_n = \text{cell}(T_{nvx}, gr, U, T_{nt})$$

$$dT_n = (k \cdot s \cdot (U - T_{nt}) - gr \cdot c \cdot (T_{nt} - T_{nvx})) / (mr \cdot c);$$

$$T_n = T_{nt} + dT_n \cdot dt;$$

соответствующие уравнениям (5.27) и (5.28). В модели теплообменника аналогичные операторы реализуют уравнения (5.29)-(5.33).

На Рисунке 5.11 показаны переходные процессы в теплообменнике, построенные с помощью модели (5.27)-(5.33).

Числовые значения параметров моделирования: $m_{\Gamma} = 25$ кг; $m_x = 30$ кг; $c = 4190$ Дж/кг·К; $k = 2500$ Вт/м²·К; $g_x = 25$ кг/с; $g_{\Gamma} = 50$ кг/с; $N = 100$; $s = 0.3$ м²; $\theta = 0$ с; $dt = 0.1$ с.

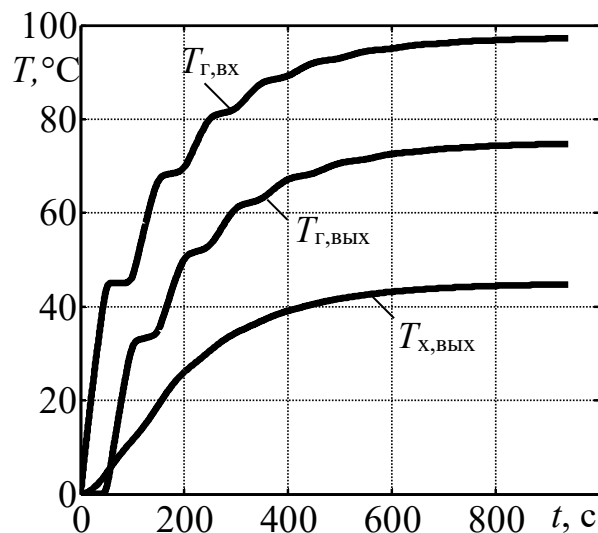


Рисунок 5.11 – Переходные процессы в теплообменнике

Начальные температуры теплоносителей в системе приняты нулевыми. Температура нагревателя $U = 150^{\circ}\text{C}$ поддерживалась постоянной. На Рисунке 5.11 хорошо видна 100-секундная периодичность $T_{\Gamma,ВХ}$ и $T_{\Gamma,ВЫХ}$, характерная для замкнутого цикла в пространственно-распределённом контуре нагревателя.

В качестве координат состояния системы будем использовать:

– регулируемые величины: $T_{x,ВЫХ}$, $T_{n,ВЫХ}$ – температуры теплоносителей на выходе теплообменника и на выходе нагревателя (см. Рисунок 5.8), значение $T_{x,ВЫХ}$ должно поддерживаться в диапазоне $T_{x,ВЫХ} = 60 \dots 70^{\circ}\text{C}$, а $T_{n,ВЫХ}$ не превышать некоторого максимального значения $T_{n,ВЫХ,МАКС}$, например, $T_{n,ВЫХ,МАКС} = 100^{\circ}\text{C}$;

– управляющие воздействия: U , g_{Γ} – температура рабочей поверхности нагревателя и массовый расход теплоносителя в секунду в контуре нагревателя;

– возмущающее воздействие: $T_{x,вх}$ – температура теплоносителя на входе теплообменника, изменяющаяся в диапазоне $30...50^{\circ}\text{C}$ со скоростью до $0,8^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Функциональная схема системы управления показана на Рисунке 5.12, где $T_{н,вых,тр}$ – требуемое среднее значение температуры теплоносителя на выходе нагревателя; $T_{x,вых,тр}$ – требуемое среднее значение температуры теплоносителя вторичного контура на выходе теплообменника.

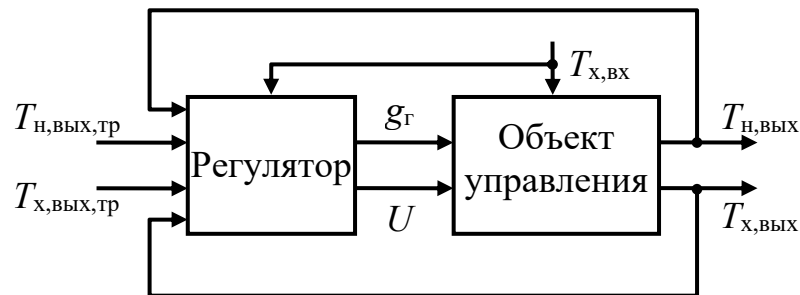


Рисунок 5.12 – Функциональная схема системы управления

Исходя из априорной неопределённости и нестационарности параметров объекта, будем синтезировать регуляторы в классе нечёткого управления.

Дополнительным аргументом в пользу этого выбора послужила отмеченная в работе [89] исключительная возможность нечёткого управления: формировать независимые индивидуальные правила регулирования для различных состояний объекта управления.

Такая возможность хорошо соответствует заявленным выше принципам многоальтернативного управления.

В соответствии с принципом многоуровневости сформируем структуру системы автоматического управления с пятью уровнями регулирования в каждом канале воздействий g_{Γ} и U .

Структурная схема канала управления по g_{Γ} показана на Рисунке 5.13.

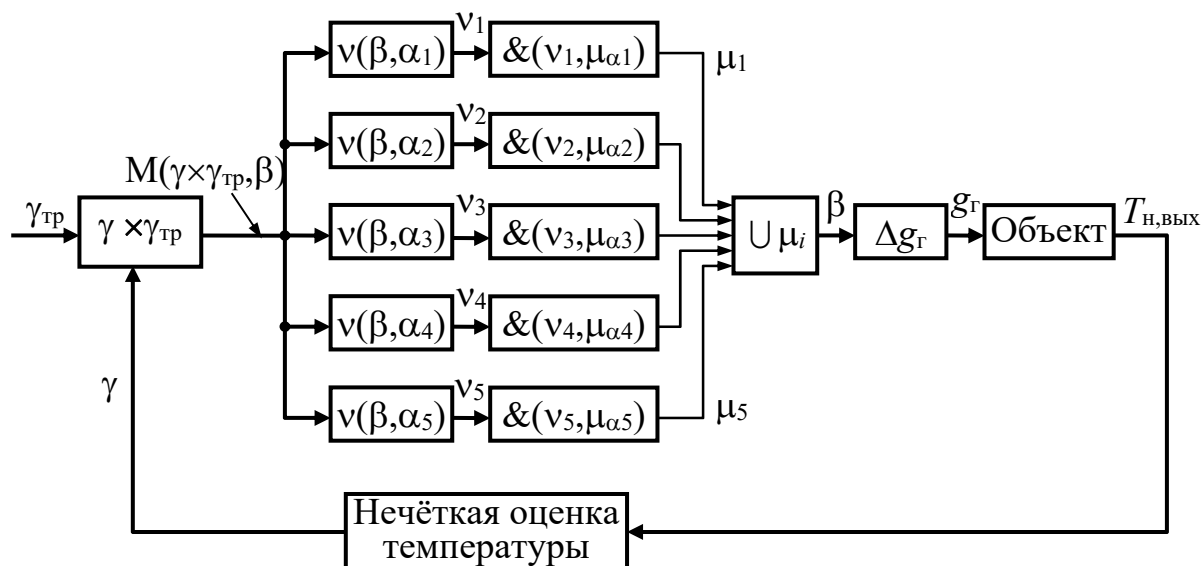


Рисунок 5.13 – Структурная схема канала управления по g_r

На основе текущего значения контролируемой температуры $T_{н,вых}$ формируется лингвистическая переменная $\tilde{T}_{н,вых} = \gamma$, где γ содержит нечёткие переменные: $\gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5\}$, например: γ_1 – температура $T_{н,вых}$ существенно ниже требуемого среднего значения $T_{н,вых,тр}$; γ_2 – температура $T_{н,вых}$ ниже требуемого среднего значения $T_{н,вых,тр}$; γ_3 – $T_{н,вых}$ примерно равна $T_{н,вых,тр}$; γ_4 – $T_{н,вых}$ выше требуемой; γ_5 – $T_{н,вых}$ существенно выше требуемой температуры $T_{н,вых,тр}$.

На Рисунке 5.14 приведены используемые в примере функции принадлежности $\mu_{\gamma_1}(T_{н,вых}), \dots, \mu_{\gamma_5}(T_{н,вых})$.

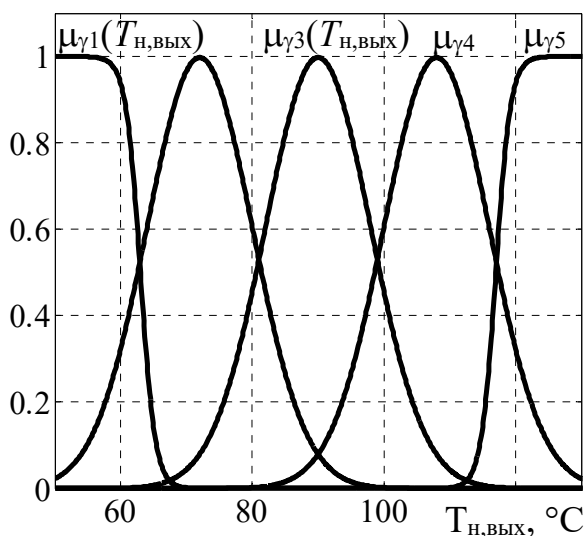


Рисунок 5.14 – Функции принадлежности нечётких переменных $\gamma_1, \dots, \gamma_5$

Приращению Δg_{Γ} массового расхода g_{Γ} поставим в соответствие лингвистическую переменную α : $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5\}$, со значениями, использующими, например, меры сравнения: α_1 – расход g_{Γ} теплоносителя следует существенно уменьшить по сравнению с его текущим значением;... α_3 – расход g_{Γ} практически не изменять;...; α_5 – расход g_{Γ} следует существенно увеличить. Используемые функции принадлежности $\mu_{\alpha_1}(\Delta g_{\Gamma}), \dots, \mu_{\alpha_5}(\Delta g_{\Gamma})$ показаны на Рисунке 5.15.

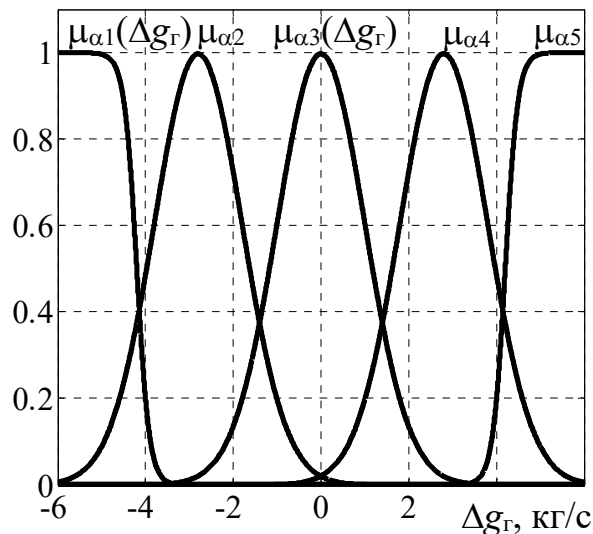


Рисунок 5.15 – Функции принадлежности нечётких переменных $\alpha_1, \dots, \alpha_5$

Для каждой нечёткой переменной $\alpha_1, \dots, \alpha_5$ в структуре системы выделен отдельный канал управления, вклад каждого из которых в результирующее нечёткое управляющее воздействие β , вырабатываемое регулятором, определяется мерой близости текущего состояния γ к требуемому состоянию $\gamma_{\text{тр}}$:

$$\gamma_{\text{тр}} = \{\mu_{\gamma 1}(T_{\text{н,вых,тр}}), \mu_{\gamma 2}(T_{\text{н,вых,тр}}), \dots, \mu_{\gamma 5}(T_{\text{н,вых,тр}})\}. \quad (5.34)$$

В общем случае $T_{\text{н,вых,тр}} = f(T_{\text{х,вх}})$, и с ростом $T_{\text{х,вх}}$ значение $T_{\text{н,вых,тр}}$ снижается.

Используя декартово произведение множеств γ и $\gamma_{\text{тр}}$, получим матрицу перехода $M(\gamma \times \gamma_{\text{тр}}, \beta)$ из текущего состояния γ объекта в требуемое $\gamma_{\text{тр}}$ под действием искомого управления β :

$$M(\gamma \times \gamma_{\text{тр}}, \beta) = \gamma \times \gamma_{\text{тр}}. \quad (5.35)$$

Для определения общего управления β для каждого из n каналов системы экспертным путём формируются матрицы перехода $M(\gamma_i \times \gamma_j, \alpha_r)$, $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, n$; $r = 1, \dots, n$; $n = 5$, значения элементов которых характеризуют возможность перехода объекта из состояния γ_i в состояние γ_j под действием нечёткого управления α_r . Примеры таких матриц для управлений α_1 и α_2 имеют вид:

$$M(\gamma_i \times \gamma_j, \alpha_1) =$$

γ_i	γ_j				
	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5
γ_1	0.50	0.80	1,00	0.80	0.50
γ_2	0.15	0.50	0.80	1,00	0.80
γ_3	0.05	0.15	0.50	0.80	1,00
γ_4	0.01	0.05	0.15	0.50	1,00
γ_5	0.005	0.01	0.05	0.15	1,00

$$M(\gamma_i \times \gamma_j, \alpha_2) =$$

γ_i	γ_j				
	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5
γ_1	0.80	1,00	0.80	0.50	0.15
γ_2	0.50	0.80	1,00	0.80	0.50
γ_3	0.15	0.50	0.80	1,00	0,80
γ_4	0.05	0.15	0.50	0.80	1,00
γ_5	0.01	0.05	0.15	0.50	1,00

В качестве меры близости искомого управления β к известным управлениям $\alpha_1, \dots, \alpha_5$ применяется степень включения матрицы перехода $M(\gamma \times \gamma_{\text{тр}}, \beta)$ в соответствующие матрицы для каждого канала:

$$\begin{aligned} v_r = v(\beta, \alpha_r) &= v[M(\gamma \times \gamma_{\text{тр}}, \beta), M(\gamma_i \times \gamma_j, \alpha_r)] = \\ &= \min \{ \max [1 - M(\gamma \times \gamma_{\text{тр}}, \beta)_{ij}, M(\gamma_i \times \gamma_j, \alpha_r)_{ij}] \}. \end{aligned} \quad (5.36)$$

Полученные значения мер близости v_r используются для логического вывода:

$$\mu_r(\Delta g_\Gamma) = \&_{\Delta g_\Gamma}(v_r, \mu_{\alpha r}(\Delta g_\Gamma)), \quad (5.37)$$

результатом $\mu_r(\Delta g_\Gamma)$ которого являются усечённые на уровне v_r функции принадлежности $\mu_{\alpha r}(\Delta g_\Gamma)$.

Управление β может быть определено объединением по всем нечётким подмножествам $\mu_r(\Delta g_\Gamma)$:

$$\beta = \{\mu(\Delta g_\Gamma)\} = \left\{ \bigcup_{\Delta g_\Gamma} \mu_r(\Delta g_\Gamma) \right\}. \quad (5.38)$$

Вычисление текущего чёткого значения $\Delta g_\Gamma(t)$ осуществляется методом центраида:

$$\Delta g_\Gamma(t) = \frac{\int \Delta g_\Gamma \cdot \mu(\Delta g_\Gamma) d\Delta g_\Gamma}{\int \mu(\Delta g_\Gamma) d\Delta g_\Gamma}, \quad (5.39)$$

с последующим интегрированием по времени для получения управляющего воздействия $g_\Gamma(t)$:

$$g_\Gamma(t) = \int \Delta g_\Gamma(t) dt. \quad (5.40)$$

Процедуры (5.34)-(5.40) определяют собою алгоритм работы системы в канале управления температурой $T_{н,вых}$ теплоносителя на выходе нагревателя с помощью изменения массового расхода g_Γ этого теплоносителя в первичном контуре. Отметим, что для формирования управления (5.34)-(5.40) не потребовалась информация о динамической модели объекта. Структура регулятора канала управления выходной температурой $T_{х,вых}$ теплоносителя вторичного контура с помощью изменения температуры U поверхности нагревателя аналогична рассмотренной выше и также содержит пять уровней управления.

Численный эксперимент, проведённый на модели системы (5.27)-(5.40) предусматривал проверку работоспособности трёх последовательно усложняющихся вариантов её структуры, позволяющих получить наглядное

сопоставление результативности каждого принимаемого решения. На Рисунке 5.16 показаны переходные процессы в структуре системы, содержащей только контур регулирования температуры $T_{x,вых}$ вторичного теплоносителя на выходе теплообменника (см. также Рисунок 5.12).

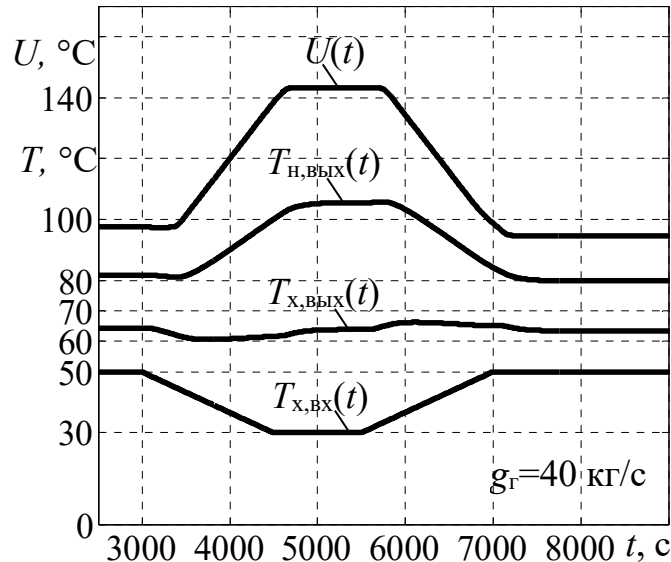


Рисунок 5.16 – Переходные процессы в системе с контуром регулирования $T_{x,вых}$

Изменения $T_{x,вых}$ на Рисунке 5.16 удерживаются системой в заданных пределах 60...70 °С, однако ошибка регулирования при изменяющемся во времени возмущении не может быть принципиально устранена средствами рассматриваемого контура.

Для подавления системой скоростной заводки возмущения $T_{x,вх}$, в структуре организован альтернативный канал ввода $T_{x,вх}$, вырабатывающий сигнал $w \cdot \dot{T}_{x,вх}$, пропорциональный скорости $\dot{T}_{x,вх}$ и вычитаемый из $T_{x,вых,гр}$ на входе регулятора (см. Рисунок 5.12). Очевидно, что этот канал функционирует только в режимах с изменяющейся $T_{x,вх}$, т.е. когда $\dot{T}_{x,вх} \neq 0$.

Результат работы альтернативного канала показан на Рисунке 5.17 и подтверждает обоснованность его введения.

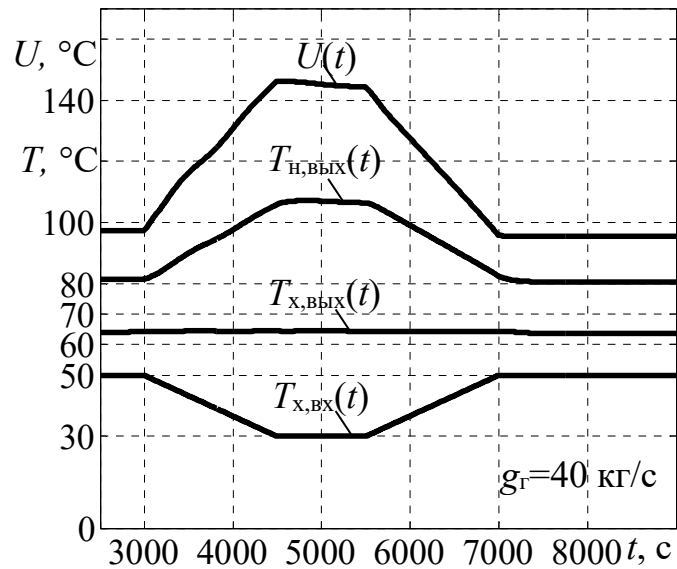


Рисунок 5.17 – Переходные процессы в системе с альтернативным каналом ввода возмущения

На Рисунке 5.17 (на интервале $t = 3000 \dots 4500$ с) можно заметить последовательную передачу управления между каналами регулятора по изменению наклона управляющего воздействия U в процессе отработки изменяющегося возмущения $T_{х,вх}$.

Третий вариант структуры предусматривает введение контура регулирования температуры $T_{н,вых}$ первичного теплоносителя на выходе нагревателя (см. Рисунки 5.12 и 5.18).

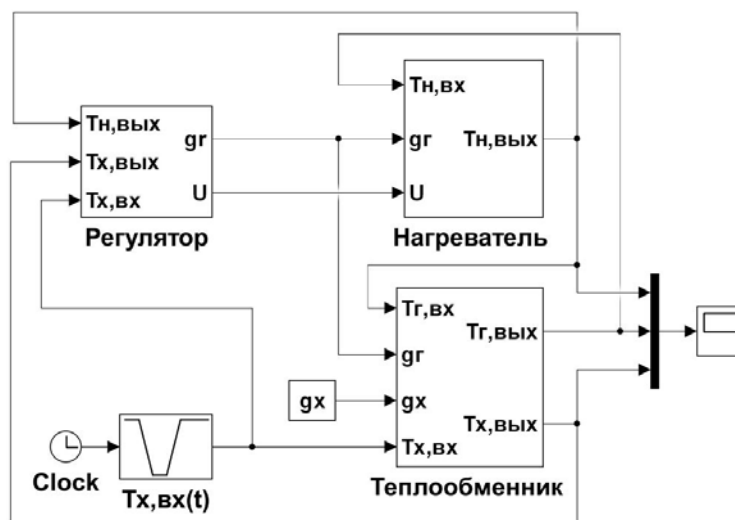


Рисунок 5.18 – Имитационная модель системы управления процессом теплообмена

Необходимость создания этого контура следует из Рисунков 5.16 и 5.17, на которых видно, что значение $T_{н,в\text{ых}}$ в процессе регулирования выходит за рекомендуемое максимальное значение $T_{н,в\text{ых,макс}} = 100^\circ\text{C}$.

Переходные процессы в системе, объединяющей все три упомянутых выше варианта структуры (Рисунок 5.18), показаны на Рисунке 5.19.

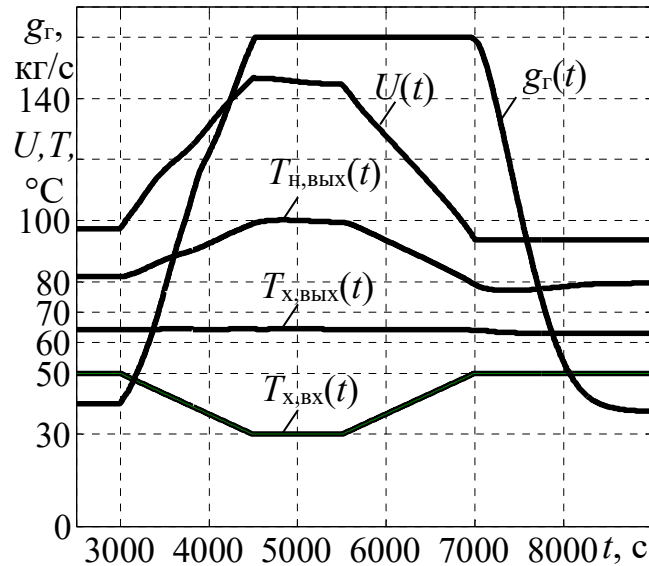


Рисунок 5.19 – Переходные процессы в системе с контуром регулирования $T_{н,в\text{ых}}$

Из Рисунка 5.19 можно заключить, что открытая динамическая система, построенная на основе принципов гомеостатического управления, позволяет полностью обеспечить требуемые показатели качества регулирования рассматриваемого процесса.

Обсудим результаты, которые были получены благодаря использованию принципов многоальтернативного управления:

- многоуровневости обработки информации;
- модульности формирования управляющего решения;
- многообразия методов обработки и разделения функций подсистем.

Использование принципа многоуровневости выразилось в формировании нескольких, n каналов регулирования по расходу g_r и температуре U с помощью соответствующего числа матриц перехода $M(\gamma_i \times \gamma_j, \alpha_r)$, $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, n$; $r = 1, \dots, n$; $n = 5$, формируемых независимо друг от друга, что позволило

избавиться от необходимости синтеза единого универсального алгоритма управления, заменив его совокупностью простых локальных процедур, используемых в процессе управления при различных состояниях объекта – регулируемых величин $T_{x,вых}$ и $T_{n,вых}$.

Взаимосвязь этих каналов управления образует иерархическую структуру по степени отклонения регулируемой величины от заданного значения (для $T_{x,вых}(t)$) или её приближения к критическому значению (для $T_{n,вых}(t)$). Переключение иерархических уровней можно заметить на Рисунке 5.17 (см. комментарии к этому рисунку) и Рисунке 5.19, и имеет ясный физический смысл: при нехватке ресурсов низкого уровня управления включается в работу более высокий иерархический уровень системы, обеспечивая в итоге требуемое качество регулирования. При этом переход к более высокому уровню иерархии (за счёт соответствующего содержания матриц $M(\gamma_i \times \gamma_j, \alpha_r)$ в разных каналах) сопровождается нелинейным, упреждающим нарастанием компенсирующего управляющего воздействия. Биологическая природа и практическая значимость механизма нарастания компенсирующего воздействия подробно рассмотрена в работе [293].

Модульность формирования управляющего решения в каждом канале системы заключается, как это следует из (5.36)-(5.38), в том, что результирующее управление β определяется в результате объединения компонент $\mu_r(\Delta g_r)$ пяти управляющих модулей ($r = 1, \dots, 5$), вклад каждой из которых устанавливается текущей мерой v_r близости искомой матрицы перехода $M(\gamma \times \gamma_{тр}, \beta)$ и соответствующих матриц каждого модуля. В результате, использование принципа модульности при построении регулятора позволяет сформировать управление β в виде многомерной функции $\beta(v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$, т.е., в общем случае, в виде n -мерного вектора, обеспечивающего высокую гибкость управления во всём пространстве текущих состояний объекта, в том числе и в нелинейных областях этого пространства.

Принцип многообразия методов обработки информации, в широком его понимании, реализуется, в первую очередь, путём построения в системе

нескольких каналов управления с различными алгоритмами принятия решений в каждом канале.

Кроме того, в рассматриваемом примере теплового процесса можно указать на введение в структуру системы канала управления по возмущающему воздействию $T_{x,вх}$ (см. Рисунки 5.12 и 5.18), выступающего в качестве принципиальной альтернативы каналам регулирования по отклонению регулируемых величин.

Результативность введения альтернативного управления подтверждается сравнением качества стабилизации $T_{x,вых}(t)$ на Рисунках 5.16 и 5.17. Полученный результат хорошо согласуется с применяемым в теории автоматического регулирования принципом двухканальности [190].

Разделение обрабатываемой информации по функциональному признаку (разделение функций подсистем) опирается на биологические примеры (глава 1) предпочтительности специализированных приспособительных механизмов перед универсальными. В задачах управления многомерными объектами этот принцип реализуется в стремлении обеспечить автономное регулирование координат системы независимыми регуляторами, синтез которых, в силу их автономности, существенно упрощается [76,292]. В частности, в рассмотренном примере подсистема регулирования температуры теплоносителя $T_{x,вых}$ вторичного контура функционирует с целью удовлетворения нужд потребителей, а подсистема температуры $T_{н,вых}$ теплоносителя первичного контура служит для предотвращения аварийных режимов в нагревателе. Как было показано, эти подсистемы реализованы на независимых регуляторах и обеспечивают требуемое качество управления процессом теплообмена одновременно по обеим координатам.

5.2 Игровая модель «сложная система – внешняя среда»

Проведённый в главе 2 анализ влияния видового многообразия и многоуровневости структуры на эволюционные процессы в экосистеме опирается на прямое воспроизведение – имитацию функционирования основных элементов

системы. Вместе с тем, представляет интерес количественная оценка результата этого влияния на более общем – информационном уровне: в какой мере многообразие стратегий поведения любой сложной системы в статистическом смысле способно противодействовать многообразию условий внешней среды? Для ответа на поставленный вопрос воспользуемся игровой моделью этого противодействия.

Рассмотрим игру G системы S с природой (внешней средой) N , обладающих набором стратегий, соответственно: $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ и $N = \{N_1, N_2, \dots, N_k\}$.

Под эволюционно устойчивой стратегией S_i сложной системы будем понимать конкретный вариант её состава и структурной организации, обеспечивающий развитие системы в текущих условиях внешней среды. В качестве числовой меры результата игры будем использовать степень приспособленности (значение функции полезности) $h_{ij} = (h_{ij} \in \mathbb{R}, 0 \leq h_{ij} \leq 1)$; $i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, k}$ системы в случае выбора ею стратегии S_i в условиях N_j среды.

Примем, что платёжная матрица $H = \{h_{ij}\}$ содержит значения h_{ij} , равновероятно и непрерывно распределённые на отрезке $[0; 1]$ в каждом отдельно взятом элементе матрицы H .

Указанный способ формирования платёжной матрицы в содержательном плане отражает способность системы к параметрической адаптации, в результате которой каждая стратегия S_i может обеспечить примерно одинаковую степень приспособленности h_{ij} не только для одного значения j , но для некоторого множества $J \subset N$ стратегий внешней среды. Это обстоятельство, как будет показано ниже, позволяет сложной системе противодействовать неограниченному многообразию N условий среды с помощью ограниченного набора стратегий S структурного уровня. Отметим также, что нормирование h_{ij} до единицы позволяет интерпретировать степень приспособленности как вероятность сохранения системой устойчивого состояния на рассмотренном многообразии N изменяющихся условий внешней среды.

Особенностью игры G является пассивность природы N в отличие от активности системы S , перестраивающей внутренние потоки вещества и энергии так, чтобы сохранить устойчивое состояние. Поскольку предполагается, что варианты таких перестроек образуют множество стратегий S , то механизм «естественного» отбора приведёт к доминированию стратегии с максимальным значением $h_j^* = \max_{i=1, \dots, n} h_{ij}$ для каждого текущего состояния N_j внешней среды [33].

Очевидно, что если у системы в наличии будет всего одна стратегия $n = 1$, то на всём многообразии N стратегий природы средняя степень приспособленности (цена v игры G) при достаточно больших $|N|$ составит $v(1) = 0,5$. При наличии у сложной системы нескольких ($n > 1$) альтернативных стратегий цена v игры определится выражением:

$$v(n) = \frac{\sum_{j=1}^k h_j^*}{k}, \quad h_j^* = \max_i h_{ij}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (5.41)$$

Результат вычислений $v(n)$ для $n = 1 \dots 1000$ и $k = 1 \cdot 10^6$ представлен на Рисунке 5.20.

Зависимость $v(n)$, показанная на Рисунке 5.20, позволяет сделать следующие выводы:

– с ростом числа альтернативных стратегий поведения сложной системы степень её приспособленности к изменяющимся условиям внешней среды возрастает и приближается к некоторому уровню, обеспечивающему её устойчивое существование;

– для обеспечения устойчивого функционирования в условиях неограниченного многообразия внешней среды системе достаточно обладать ограниченным набором стратегий поведения структурного уровня, каждая из которых, согласно принципу неполной специализации [143], способна к параметрической адаптации в некотором диапазоне воздействий среды. Отметим, что выводы о достаточности ограниченного многообразия для устойчивости сложной системы можно найти в работах [6,7].

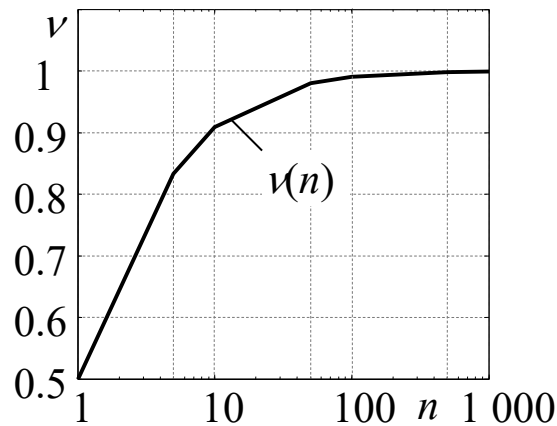


Рисунок 5.20 – Изменение вероятности ν устойчивого существования с ростом числа n альтернативных стратегий системы

Полученный результат был вполне предсказуем теоретически в силу равновероятного заполнения элементов платёжной матрицы H и условия существования доминируемых стратегий у активной системы. Тем не менее, использование в модели игры системы с природой только наиболее существенных информационных свойств её участников – многообразия стратегий и степени приспособленности, позволяет выделить в явном виде и количественно оценить роль многоальтернативности в эволюционном поведении сложных систем. Весьма уместно упомянуть здесь также о подтверждении известного информационного принципа необходимого разнообразия У. Эшби [322].

В заключение этого раздела нельзя не упомянуть об интенсивно развивающемся в настоящее время (но выходящем за рамки настоящей работы) теоретико-игровом подходе к механизмам эволюции сложных систем – эволюционной теории игр [440,445,450,452], которая рассматривает поведение игроков в крупных группах (популяциях) с разными частотами конкурирующих стратегий в этих группах. В результате достигается эволюционная стабильность популяции в целом. При этом большой интерес представляют системы, сочетающие иерархическую и сетевую структуру взаимодействия своих элементов [90,37,85,330,335,401].

Выводы по главе 5

1. 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 позиционные и скоростные компоненты, отвечающие условиям доминирования скоростных составляющих и преобладания позиционных сил управления над потенциальными силами, действующими в объекте. Стабилизация объекта в указанном классе воздействий обеспечивается при произвольном законе переключения альтернативных управлений.

2. Рассмотрен пример реализации стабилизирующего нечёткого управления структурно неустойчивого объекта, описываемого моделью перевёрнутого маятника. Констатировано, что для процесса принятия имплицитивного нечёткого управляющего решения характерны наиболее важные черты многоальтернативных систем:

– многоальтернативность управления: для выбранного множества значимых текущих ситуаций устанавливается соответствующий набор отличающихся нечётких правил вывода, т.е. способ формирования управления в системе непрерывно изменяется в соответствии с состоянием объекта;

– многокритериальность выбора: нечёткие решающие правила в состоянии одновременно оперировать несколькими критериями, характеризующими состояние объекта;

– параллельность выбора: принятие решения по каждому правилу нечёткого вывода может осуществляться независимо – параллельно во времени, с последующим объединением частных решений в результирующее управление.

Указанные свойства многоальтернативного управления обеспечили грубость системы к изменениям параметров структурно неустойчивого объекта, а

также позволили, в результате разделения движений, решить проблему дефицита управляющих воздействий в системе.

3. Разработана гомеостатическая система многомерного нечёткого управления процессом противоточного теплообмена с существенно неопределёнными параметрами. Показано, что высокое качество регулирования этого процесса достигнуто благодаря использованию принципов многоальтернативного управления:

– многоуровневости – формированию в каждом канале управления нескольких уровней, взаимосвязь между которыми образует иерархическую структуру. Передача управления между уровнями осуществляется по мере приближения регулируемых величин к критическим значениям. Такая передача управления имеет ясный физический смысл: при нехватке ресурсов низкого уровня управления включается в работу более высокий иерархический уровень системы;

– модульности – созданию управления как результата объединения компонент нескольких простых управляющих модулей, вклад каждого из которых определяется текущим состоянием объекта;

– многообразия и разделения функций – автономному управлению каждой регулируемой величиной независимыми регуляторами, синтез которых, в силу их автономности, существенно упрощается. Кроме того, в качестве принципиально отличающейся альтернативы регулирования по отклонению в систему введёт канал управления по возмущению, отвечающий известному в теории управления принципу двухканальности.

4. Предложена игровая модель взаимодействия обобщенной сложной системы с внешней средой. С помощью этой модели получена качественная оценка влияния многообразия стратегий поведения любой сложной системы на её способность противодействовать многообразию условий внешней среды. В частности, сделаны следующие выводы:

– с ростом числа альтернативных стратегий поведения сложной системы степень её приспособленности к изменяющимся условиям внешней среды

возрастает и приближается к некоторому уровню, обеспечивающему её устойчивое существование;

– для обеспечения устойчивого функционирования в условиях неограниченного многообразия внешней среды системе достаточно обладать ограниченным набором стратегий поведения структурного уровня, каждая из которых, согласно принципу неполной специализации, способна к параметрической адаптации в некотором диапазоне воздействий среды.

Основные материалы данной главы изложены в работах [59,65,206,213,214,243,405,412].

ГЛАВА 6. МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПОВ МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОСТИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Стратегия синергетического управления состоит в формировании и поддержании в системе некоторых общесистемных инвариантов, отражающих стабилизацию динамического режима системы, т.е. её самоорганизацию с некоторой целью [117,118].

Достижение этой цели осуществляется в результате введения в модель системы дополнительных агрегированных макропеременных $\Psi(X)$, где X – координаты состояния собственно объекта управления, с помощью которых формируется внутренняя система связей – многообразие инвариантов (притягивающих аттракторов) $\Psi(X) = 0$, выбираемых в соответствии с внутренними свойствами объекта и техническими целями управления.

В результате формирования такого многообразия аттракторов становится возможной динамическая декомпозиция (упрощение) задачи синтеза управления, заключающаяся в поочередном обеспечении движения системы сначала к притягивающим аттракторам, а затем, вдоль них, к требуемому конечному состоянию системы [226]. Таким образом, реализуется иерархически-каскадный синтез законов управления и соответствующая последовательная организация движения системы: выход на магистральную (по аналогии с магистральной теорией Дж. фон Неймана), естественную для объекта траекторию и движение по ней к цели управления.

В настоящей главе раскроем методологическую взаимосвязь синергетических и многоальтернативных принципов управления, и приведём примеры синтеза синергетических систем многоальтернативного управления объектами с критическими режимами – структурно неустойчивыми и со слабо демпфированными колебаниями.

6.1 Синергетические свойства принципов многоальтернативности

Покажем ряд синергетических свойств основных принципов многоальтернативности сложных систем [227]:

- принцип многоуровневости и иерархичности структуры системы;
- принцип многообразия и разделения функций подсистем;
- принцип модульности строения.

Многоальтернативный принцип многоуровневости и иерархичности сложных систем предполагает поочерёдную передачу управления в системе от низких уровней к более высоким по мере того, как ресурсы управления нижних уровней иерархии будут исчерпываться.

Содержанию принципа многоуровневости соответствует синергетическое свойство подчинённости управления [117], согласно которому совокупность переменных состояния системы можно разбить на несколько групп – подсистем более низкого порядка – таким образом, что задавшись желаемым поведением одной группы переменных, можно найти требуемое для этого изменение другой группы переменных, которые будут, таким образом, подчинены первой группе. В свою очередь, найденному изменению переменных второй группы будут подчинены переменные третьей группы и т.д. Важно, что такое разбиение сложной системы на подсистемы осуществляется на основе анализа физического смысла переменных состояния, позволяющего установить естественные энергетические и временные соотношения между формируемыми подсистемами.

Синергетическое свойство подчинения даёт возможность осуществить декомпозицию системы управления и свести её синтез и функционирование к последовательному решению нескольких задач малой размерности, реализовав, тем самым, «неусложняемую простоту» многоуровневого принципа многоальтернативного управления.

Многоальтернативный принцип многообразия и разделения функций сложных систем состоит в накоплении в системе такого собственного разнообразия подсистем с различными свойствами, которое бы обеспечивало

сохранение жизнеспособности всей системы в существенно изменяющихся условиях её существования.

Синергетические свойства принципа многообразия вытекают из обоснованного Дж. фон Нейманом положения о критическом уровне сложности системы, начиная с которого в ней становятся возможными процессы самоорганизации [159]. Такие процессы самоорганизации в реальных системах сопровождаются появлением различного рода нелинейных эффектов, возникающих вследствие образования новых взаимодействующих многообразий, качественно отличающихся по своим общесистемным свойствам. Совокупность таких нелинейных эффектов порождает многоальтернативность управлений, обеспечивающих устойчивое функционирование сложной системы в различных, в том числе критических режимах её работы.

Примером реализации синергетических свойств принципа многообразия может служить метод синтеза агрегированных регуляторов автоматических систем с использованием так называемых инвариантных многообразий (фазовых поверхностей), обладающих свойством притяжения любых траекторий системы, начинающихся вне этих многообразий [117]. Примечательно, что каждое такое многообразие по возможности выбирается в соответствии с естественными свойствами объекта управления для того, чтобы в максимальной степени использовать в процессе управления собственные невозмущённые траектории движения объекта. Поскольку собственное движение объектов подчиняется наиболее общим законам природы, то такой способ выбора многообразий полностью отвечает синергетическому подходу к управлению.

Принцип модульности в концепции многоальтернативности заключается в формировании рассмотренных выше многообразий структур и законов управления не путём создания полностью уникальных систем, но в результате новых дискретных комбинаций ограниченного набора некоторых элементарных блоков-модулей, которые могут иметь самую различную физическую или химическую природу.

Синергетическое содержание принципа модульности вытекает из положений квантовой механики, давшей начало представлениям о дискретности природы и, как следствие, её гетерогенности [218]. В частности, многообразие биологических систем в генетическом плане определяется дискретными комбинациями всего 20-ти аминокислот.

В технических приложениях блочно-модульная структура открытых систем тесно связана с принципами многоуровневости и разделения функций, реализация которых возможна только на основе синергетического взаимодействия дискретных компонентов.

Приведённое краткое сопоставление многоальтернативных принципов многоуровневости, многообразия, модульности и принципов синергетической теории управления очевидно указывает на их глубокое методологическое единство, объясняемое тем, что обе концепции обращаются к внутреннему содержанию процессов, характерных для функционирования открытых сложных систем и строят управление такими системами согласно с естественным содержанием этих процессов.

6.2 Синергетическое управление мобильным самобалансирующимся роботом

К мобильным самобалансирующимся роботам относятся исполнительные механизмы, установленные на несущей платформе с двумя соосными колёсами или одной шаровой опорой [307,391,441]. Преимуществом такой кинематической схемы движения является высокая манёвренность робота, необходимая для его перемещения в условиях ограниченного пространства или при совместной работе с несколькими мобильными механизмами.

Однако указанное достоинство неразрывно связано с принципиальным недостатком робота: неустойчивостью его вертикального положения. В связи с этим любое движение платформы включает в себя не только её линейное перемещение на плоскости, но и процесс угловой стабилизации продольной оси

работа в вертикальном положении – балансировку [24,377]. Совместная реализация процессов перемещения и стабилизации в большинстве случаев осуществляется одним управляющим воздействием: вращающим моментом двигателей, встроенных в колёса. Анализ физического содержания такого способа управления указывает на его внутреннюю несогласованность: всякая попытка линейного перемещения платформы приводит к нарушению балансировки робота, и в то же время стремление восстановить вертикальное положение неизбежно отразится на характеристиках линейного перемещения платформы.

Такое взаимное влияние указанных процессов обусловлено собственными свойствами робота как объекта управления. Очевидно, что обеспечить согласованное управление этими двумя процессами возможно только в том случае, если в системе будет организовано также два канала регулирования и, соответственно, два управляющих воздействия. Иным словами, необходимо построение многомерной системы управления.

Практическое воплощение такой системы возможно на основе двух подходов:

- обеспечить автономность регулирования линейными и угловыми координатами робота;

- обеспечить связанное регулирование этих координат на базе синергетического подхода к управлению, т.е. использовать собственные, внутренние взаимосвязи координат объекта для достижения цели управления.

При этом под синергетическим управлением понимается здесь внутренне непротиворечивое, согласованное изменение этих координат. Вырабатываемое системой управление линейными и угловыми координатами робота должно действовать не вопреки, а в точном соответствии с физическими взаимосвязями между указанными координатами. В качестве положительного эффекта такого синергетического управления следует ожидать значительное упрощение алгоритмов управления и снижение мощности управляющих воздействий.

Задача управления на основе первого подхода решена достаточно полно [24,307,377,391,441]. Ниже рассмотрим синергетический подход к управлению самобалансирующимся роботом.

Для реализации синергетического управления рассматриваемым объектом предлагается в качестве прототипа взять аналогичное подвижное транспортное средство – «сегвей». Управление сегвеем осуществляется оператором человеком, располагающимся непосредственно на платформе, Рисунок 6.1.

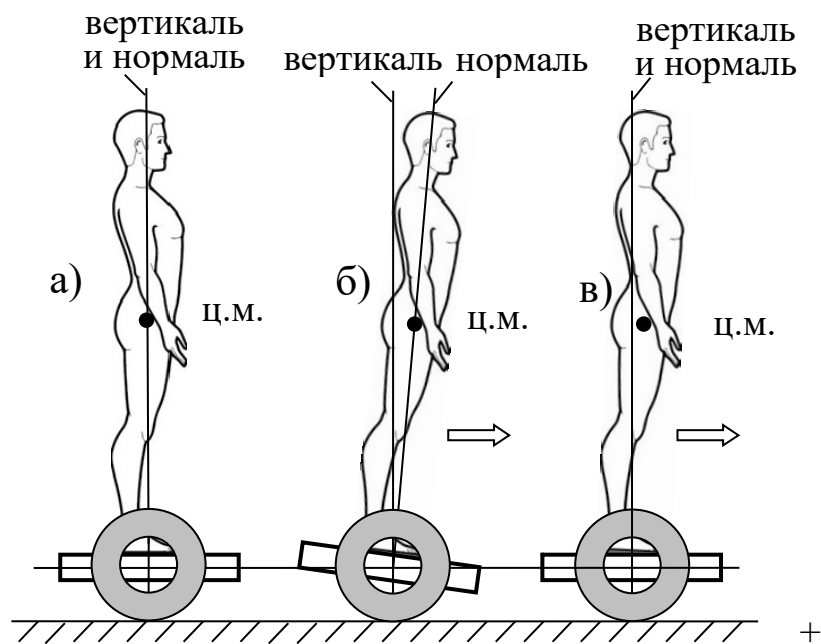


Рисунок 6.1 – Схема управления платформой путем перемещения центра масс оператора-человека: а) неподвижное состояние; б) разгон; в) равномерное движение вперед. Нормаль – вертикальная ось платформы; ц.м. – центр масс человека

Выделим следующие этапы взаимодействия сегвея и оператора:

Начальное неподвижное состояние. Продольные оси платформы и оператора совпадают и занимают вертикальное положение. Центр массы оператора не смещён относительно оси колёс.

Начало движения и набор скорости. Оператор смещает центр масс вперёд. Возникает момент силы тяжести, под действием которого продольная ось оператора вместе с платформой начинает поворачиваться по часовой стрелке, т.е. равновесие нарушается, Рисунок 6.1б. Возникающее при этом угловое отклонение оси платформы обнаруживается гироскопическими датчиками, и начинает работать контур стабилизации положения платформы. Двигатели колёс развивают момент, восстанавливающий равновесие. При этом, если этот момент достаточен для преодоления сил трения покоя, колёса начнут вращаться по ходу часовой стрелки, и платформа будет двигаться направо с постоянным ускорением.

После достижения нужного значения скорости оператор выпрямляется, но не до исходного вертикального положения, а настолько, чтобы момент силы тяжести сравнялся с моментом сил трения качения, Рисунок 6.1в. Такое положение центра масс будет соответствовать состоянию равновесия в системе и равномерному прямолинейному движению стабилизированной платформы.

Рассмотренный способ управления полностью отвечает концепции синергетического управления [117,120]:

- обеспечивает декомпозицию системы на два канала управления верхнего и нижнего уровня: канал перемещения центра масс и канал управления вращением колёс;

- управление верхнего уровня обладает малой мощностью и вызывает движение системы, обусловленное исключительно её собственными кинематическими свойствами;

- согласование управляющих воздействий каждого уровня происходит не в результате организации соответствующих перекрёстных связей в регуляторе, а вследствие существования перекрёстных связей внутри самого объекта управления.

Формальная постановка изложенной задачи может быть представлена в виде: для многосвязного объекта $y(s) = W(s) \cdot u(s) + F(s) \cdot f(s)$ с недиагональной передаточной матрицей $W(s)$ найти автономное управление $u_i(s) = R_i(s) \cdot \varepsilon_i(s)$, $i = 1, 2$ с передаточными матрицами $R_i(s)$. Найденное управление должно

обеспечить нулевые установившиеся отклонения $\varepsilon_i(s)$ регулируемых величин $y_i(s)$ от задающих воздействий $g_i(s)$ при наличии возмущений $f(s)$, действующих на объект в соответствии с передаточной матрицей $F(s)$.

Перейдём к реализации описанного способа управления и последующей его численной проверке на имитационной модели.

Кинематическая схема робота показана на Рисунке 6.2 и представляет собою двухзвенный перевернутый маятник, звенья которого соединены заторможенным шарниром, Рисунок 6.2 [233,234].

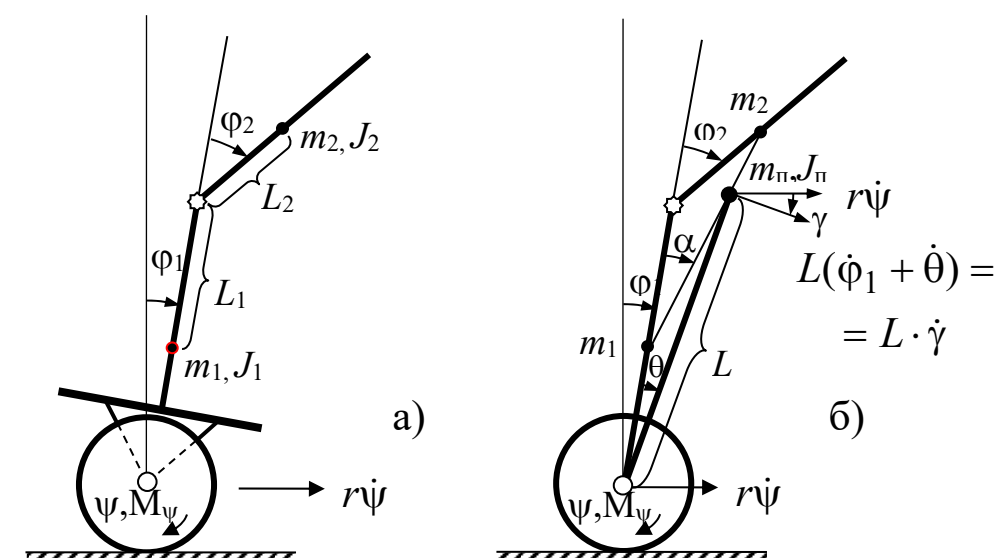


Рисунок 6.2 – Кинематическая схема платформы, управляемой положением центра масс

Платформа представляет собою двухзвенный механизм, верхнее звено 2 которого связано с нижним звеном 1 через заторможенный шарнир, а звено 1 с колесами – через свободно вращающуюся ось. Вращающие моменты $M_{дв}$ электродвигателей действуют на соответствующие колеса и – в обратном направлении – на платформу (звено 1). Угловое отклонение φ_2 звена 2 от продольной оси звена 1 может изменяться переносом центра масс звена 2 вперед или назад.

Введем в рассмотрение величины: 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; $m_{\text{к}}$ – масса колеса; $J_{\text{к}}$ – момент инерции колеса; r – радиус колеса; ψ – 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; φ_1 и φ_2 – угловые положения звеньев (см. Рисунок 6.2а).

Рассматриваемая система имеет две степени свободы: координаты φ_1 и ψ , и два управляющих воздействия: напряжение питания U (вращающий момент двигателей) и угловое отклонение φ_2 звена 2 от продольной оси звена 1, создающее вращающий момент силы тяжести. Возмущающее воздействие – момент трения $M_{\text{т.к}}$ качения колес [416,423].

Модель полученной системы можно составить на основе уравнений Лагранжа (6.1) для координат ψ и $\varphi_1 + \theta = \gamma$, где θ – угол между продольной осью робота и её расчетной осью, проходящей через приведённый центр масс $m_{\text{п}} = m_1 + m_2$ и ось вращения колес, Рисунок 6.2б.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \psi} &= M_{\psi}; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\gamma}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \gamma} &= M_{\gamma}, \end{aligned} \quad (6.1)$$

где M_{ψ} и M_{γ} – моменты, действующие на колеса и платформу соответственно; T – кинетическая энергия системы [252]:

$$T = 2T_{\text{к}} + T_{\text{п}}, \quad (6.2)$$

$T_{\text{к}}$ и $T_{\text{п}}$ – кинетические энергии колеса и платформы соответственно:

$$T_{\text{к}} = \frac{J_{\text{к}} \cdot \dot{\psi}^2}{2} + \frac{m_{\text{к}} \cdot (r\dot{\psi})^2}{2}; \quad (6.3)$$

$$T_{\text{п}} = \frac{J_{\text{п}} (\dot{\varphi}_1 + \dot{\theta})^2}{2} + \frac{m_{\text{п}} v_{\text{п}}^2}{2}, \quad (6.4)$$

$v_{\text{п}}$ – абсолютная скорость приведённого центра масс:

$$v_{\Pi}^2 = (r\dot{\psi})^2 + (L(\dot{\phi}_1 + \dot{\theta}))^2 + 2rL\dot{\psi}(\dot{\phi}_1 + \dot{\theta}) \cdot \cos(\phi_1 + \theta). \quad (6.5)$$

Подстановка (6.5) в (6.3), (5.4) и, далее, (6.3) и (6.4) в (6.2) даёт выражение для полной кинетической энергии системы:

$$T = \left(m_{\kappa} \cdot r^2 + J_{\kappa} + \frac{m_{\Pi} r^2}{2} \right) \cdot \dot{\psi}^2 + \left(\frac{m_{\Pi} L^2 + J_{\Pi}}{2} \right) \cdot \dot{\gamma}^2 + m_{\Pi} r L \dot{\psi} \dot{\gamma} \cdot \cos(\gamma), \quad (6.6)$$

где J_{Π} – момент инерции всей системы относительно центра ее масс:

$$J_{\Pi} = J_1 + J_2 + m_1 d^2 + m_2 (D - d)^2 \quad (6.7)$$

Величины J_{Π} , L и γ являются функциями от управляющего воздействия φ_2 : $J_{\Pi}(\varphi_2)$, $L(\varphi_2)$ и $\gamma(\varphi_2)$. Найдём выражения для этих функций.

Из Рисунка 6.2 определим расстояние D между сосредоточенными массами m_1 и m_2 :

$$D = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos(\pi - \varphi_2)} \quad (6.8)$$

расстояние d между центрами m_1 и m_{Π} :

$$d = \frac{D \cdot m_2}{m_{\Pi}}, \quad (6.9)$$

длину L приведённого однозвенного маятника и угол θ :

$$L = \sqrt{L_1^2 + d^2 - 2L_1d \cos(\pi - \alpha)} \quad (6.10)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{L_1^2 + D^2 - L_2^2}{2L_1D} \quad (6.11)$$

$$\cos(\theta) = \frac{L_1^2 + L^2 - d^2}{2L_1L}. \quad (6.12) \quad \square$$

Подставляя (6.8), (6.9), (6.11) в (6.7), (6.10) и (6.12) найдём $J_{\Pi}(\varphi_2)$, $L(\varphi_2)$ и $\gamma(\varphi_2)$.

$$J_{\Pi}(\varphi_2) = \frac{(L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2 \cos(\varphi_2))m_1m_2}{m_{\Pi}} + J_1 + J_2 \quad (6.13)$$

$$L(\varphi_2) = \left(2L_1L_2 \frac{m_2}{m_{\Pi}} \left(\frac{m_2}{m_{\Pi}} + 1 \right) \cos(\varphi_2) + \right. \\ \left. + L_1^2 + (L_1^2 + L_2^2) \frac{m_2^2}{m_{\Pi}^2} + 2 \frac{m_2}{m_{\Pi}} L_1^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6.14)$$

$$\theta(\varphi_2) = \arccos \left(\frac{L_1^2 + \frac{m_2}{m_{\Pi}} (L_1^2 + L_1L_2 \cos(\varphi_2))}{L_1L(\varphi_2)} \right) \quad (6.15)$$

Моменты M_{Ψ} и M_{γ} в правой части (1) определяются выражениями:

$$M_{\Psi} = 2M_{\text{дв}} - (m_{\Pi} + 2m_{\text{к}})gk_{\text{тр}} \cdot \text{sign}(\dot{\Psi}), \quad (6.16)$$

$$M_{\gamma} = m_{\Pi}gL \cdot \sin(\gamma) - 2M_{\text{дв}}, \quad (6.17)$$

где

$$M_{\text{дв}} = \frac{U - C_e(\dot{\Psi} - \dot{\phi}_1)}{R} \cdot C_{\text{м}}. \quad (6.18)$$

Вычислим компоненты (1):

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\Psi}} = (2m_{\text{к}} \cdot r^2 + 2J_{\text{к}} + m_{\Pi}r^2) \cdot \dot{\Psi} + m_{\Pi}rL\dot{\gamma} \cdot \cos(\gamma); \quad (6.19)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\Psi}} \right) = (2m_{\text{к}} \cdot r^2 + 2J_{\text{к}} + m_{\Pi}r^2) \cdot \ddot{\Psi} + m_{\Pi}rL(\ddot{\gamma} \cdot \cos(\gamma) - \dot{\gamma}^2 \cdot \sin(\gamma));$$

$$\frac{\partial T}{\partial \Psi} = 0; \quad (6.20)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\gamma}} = (m_{\Pi} L^2 + J_{\Pi}) \cdot \dot{\gamma} + m_{\Pi} r L \dot{\psi} \cdot \cos(\gamma);$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\gamma}} \right) = (m_{\Pi} L^2 + J_{\Pi}) \cdot \ddot{\gamma} + m_{\Pi} r L (\ddot{\psi} \cdot \cos(\gamma) - \dot{\psi} \dot{\gamma} \cdot \sin(\gamma));$$
(6.21)

$$\frac{\partial T}{\partial \gamma} = -m_{\Pi} r L \dot{\psi} \dot{\gamma} \cdot \sin(\gamma).$$
(6.22)

После подстановки(6.15)-(6.22) в (6.1) получим искомую динамическую модель робота:

$$(m_{\Pi} L^2 + J_{\Pi}) \cdot \ddot{\gamma} + m_{\Pi} r L \cdot \cos(\gamma) \cdot \ddot{\psi} = m_{\Pi} g L \cdot \sin(\gamma) - 2 \frac{U - C_e(\dot{\psi} - \dot{\phi}_1)}{R} \cdot C_M; \quad (6.23)$$

$$\begin{aligned} & (2m_k \cdot r^2 + 2J_k + m_{\Pi} r^2) \cdot \ddot{\psi} + m_{\Pi} r L (\ddot{\gamma} \cdot \cos(\gamma) - \\ & - \dot{\gamma}^2 \cdot \sin(\gamma)) = 2 \frac{U - C_e(\dot{\psi} - \dot{\phi}_1)}{R} \cdot C_M - (m_{\Pi} + 2m_k) g \cdot k_{\text{тр}} \cdot \text{sign}(\dot{\psi}). \end{aligned}$$
(6.24)

Полученная модель содержит два нелинейных дифференциальных уравнения второго порядка относительно регулируемых координат ψ и $\phi_1 = \gamma - \theta$. Напряжение U и угол ϕ_2 входят в уравнения как внешние управляющие воздействия.

Проверка адекватности модели (6.23), (6.24) проводилась в математическом пакете MatLab для двух режимов движения. На Рисунке 6.3а представлено начало движения платформы с постоянным угловым смещением $\phi_2 = 10,6$ град ($\approx 0,184$ рад) верхнего звена 2 относительно нижнего звена 1. При этом платформа теряет равновесие, и её положение стремится к устойчивому, но нерабочему значению $\phi_1 = \pi$ рад. Если в момент $t = 1,5$ с (Рисунок 6.3б) значение ϕ_2 незначительно уменьшить (примерно до 0,183 рад), то платформа продолжает движение без потери равновесия. Таким образом, модель адекватно воспроизводит физические особенности движения робота, рассмотренные выше.

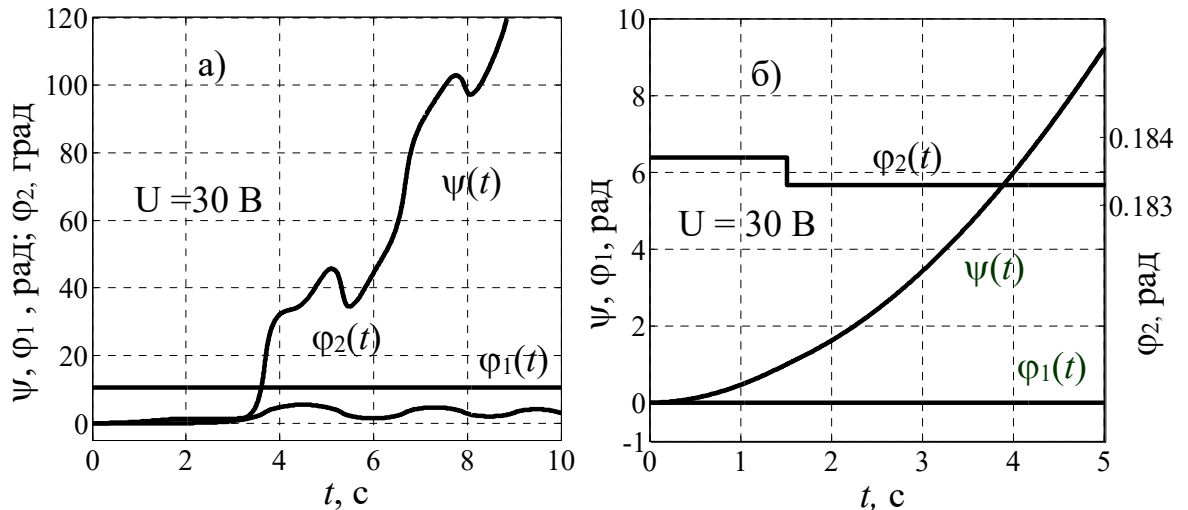


Рисунок 6.3 – Результаты проверки адекватности модели: а) движение с постоянным наклоном $\phi_2 = \text{const}$; б) движение с переменным значением ϕ_2 , уменьшенным в момент времени $t = 1,5 \text{ с}$.

Приведённый выше содержательный анализ выбранного способа управления роботом указывает на необходимость реализации в системе двух контуров регулирования: контура регулирования линейного перемещения, или угловой скорости $\dot{\psi}$ вращения колёс, и контура стабилизации углового положения продольной оси робота, т.е. её отклонения ϕ_1 от вертикали, Рисунок 6.4.

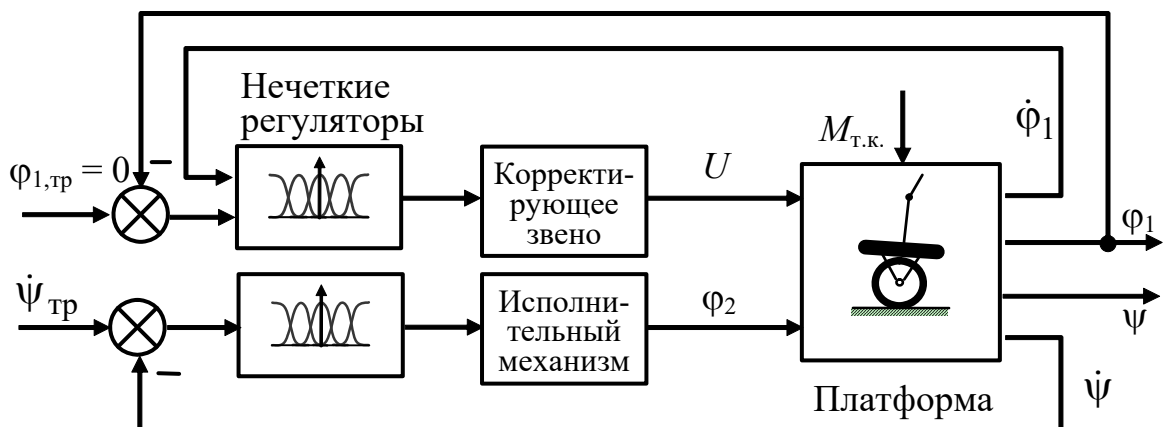


Рисунок 6.4 – Общий состав системы управления

Поскольку контур стабилизации не должен допускать возникновения колебаний в положении платформы, то с целью демпфирования возможных колебаний введём в этот контур производную координаты φ_1 – скорость $\dot{\varphi}_1$. Кроме того, учитывая антропогенные истоки описанного выше синергетического алгоритма управления и существенную нелинейность системы (см. (6.23), (6.24)), применим в системе нечёткие регуляторы, хорошо приспособленные для управления нелинейными объектами [59,124]. Многоальтернативный характер нечёткого управления был подробно рассмотрен в главе 4.

Кроме перечисленных узлов на Рисунке 6.4 отражены исполнительный механизм, представляющий собою малоинерционный линейный двигатель, перемещающий «управляющий» груз малой массы, а также корректирующее звено, содержащее интегратор для обеспечения астатизма контура регулирования φ_1 .

Нечёткий регулятор контура стабилизации использует лингвистические переменные $\alpha = \tilde{\varphi}_1$ и $\beta = \tilde{\dot{\varphi}}_1$ с пятью соответствующими значениями:

$$\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5\}, \quad (6.25)$$

$$\beta = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5\}, \quad (6.26)$$

например: α_1 – отклонение углового положения платформы от вертикали отрицательное и значительное;... α_3 – отклонение близко к нулю;...; α_5 – значительное положительное отклонение. Используемые функции принадлежности $\mu_{\alpha_1}(\varphi_1), \dots, \mu_{\alpha_5}(\varphi_1)$ показаны на Рисунке 6.5. Выходная лингвистическая переменная $\gamma = \tilde{U}$ также содержит пять значений:

$$\gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5\}, \quad (6.27)$$

где γ_1 – существенно уменьшить напряжение U питания;...; γ_3 – практически не изменять и т.д.

Решающие правила α_i & $\beta_i \rightarrow \gamma_i$ ($i = 1, \dots, 5$) для регулятора контура стабилизации рассматривают 25 сочетаний значений α и β , Таблица 6.1 (в скобках указаны неединичные весовые коэффициенты значения γ_i).

Таблица 6.1 – Нечёткие значения выходной величины γ регулятора контура стабилизации

Значение величины α	Значение величины β				
	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
α_1	γ_1	γ_1	$\gamma_1(0,1)$	γ_2	γ_3
α_2	γ_1	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4
α_3	γ_2	γ_2	γ_3	γ_4	γ_4
α_4	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	γ_5
α_5	γ_3	γ_4	$\gamma_5(0,1)$	γ_5	γ_5

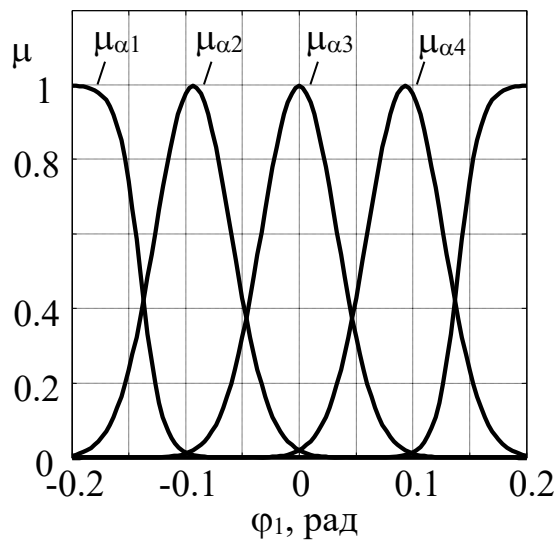


Рисунок 6.5 – Функции принадлежности μ_α регулятора

Регулятор контура линейного перемещения построен аналогично.

Работоспособность предложенного алгоритма управления проверялась для двух режимов работы системы: режима стабилизации вертикального положения робота и режима набора заданной скорости линейного перемещения, Рисунок 6.6.

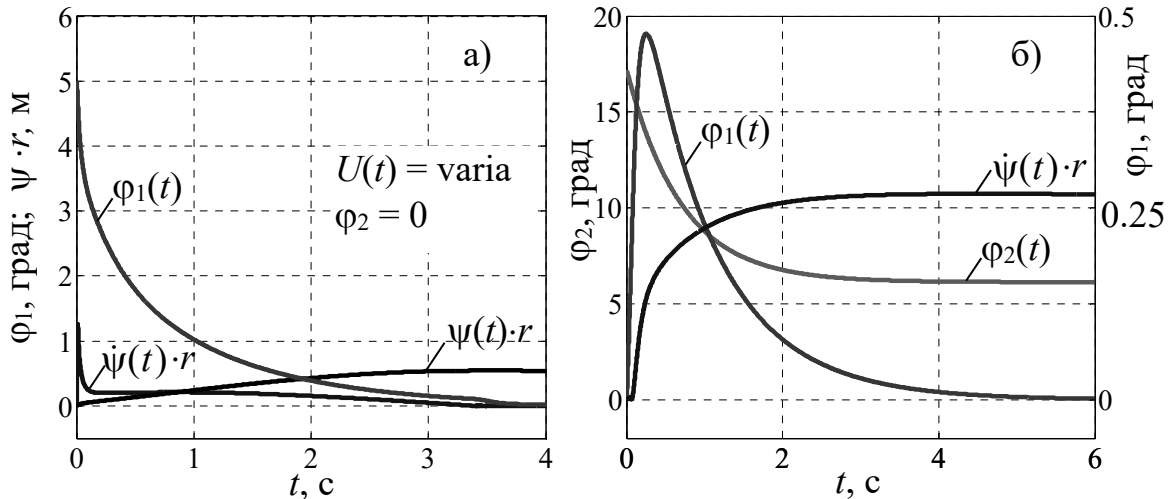


Рисунок 6.6 – Проверка работоспособности системы в двух режимах: а) приведение в вертикальное положение при начальном отклонении $\varphi_1(0) = 5$ град; б) разгон платформы из неподвижного состояния до линейной скорости 0,26 м/с

На Рисунке 6.6а показано приведение робота в вертикальное положение при начальном наклоне $\varphi_1(0) = 5$ град: платформа быстро начинает двигаться в направлении намечившегося падения, и затем плавно восстанавливает равновесие $\varphi_1 = 0$ град, переместившись для этого на 0,5 м вперёд.

Разгон платформы (Рисунок 6.6б) осуществлялся путём первоначального отклонения верхнего звена на угол $\varphi_2(0) = 17$ град. Платформа наклоняется на 0,5 град и постепенно набирает заданную скорость 0,26 м/с. При этом её вертикальное положение восстанавливается $\varphi_1(6) \approx 0$ град, а угол наклона φ_2 стремится к значению примерно 6 град, необходимому для создания момента силы тяжести, равному моменту сил трения качения.

Таким образом, система полностью воспроизводит заданные алгоритмы управления.

Способ реализации многоальтернативного синергетического подхода к задаче управления самобалансирующимся роботом путём дополнительного перемещения центра его масс позволяет:

– осуществить связанное управление координатами робота не за счёт создания искусственных перекрёстных связей в регуляторе, а в результате использования собственных, внутренних взаимосвязей между этими координатами в объекте;

– проектировать автономные, независимые регуляторы для каждого канала управления роботом и, как следствие, упростить алгоритмы их функционирования;

– использовать маломощные исполнительные механизмы перемещения центра масс, освободив от этой функции основной привод двигателей колёс и снизив, тем самым, энергопотребление от аккумуляторов.

6.3 Агрегированное управление беспилотным летательным аппаратом

Аналитический синтез систем управления нелинейными объектами высокой размерности сталкиваются с принципиальными трудностями нахождения решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных [360,354]. Это обстоятельство приводит к тому, что практическое решение таких задач осуществляется только после линеаризации математической модели объекта управления. Получаемые в результате такого синтеза регуляторы оказываются не в состоянии обеспечить заданное качество управления в произвольной области пространства состояний объекта.

Рассмотрим синергетический подход к аналитическому синтезу регуляторов, не требующий линеаризации исходной модели объекта и позволяющий осуществлять синтез регуляторов высокой размерности путём последовательного решения иерархически связанных задач малой размерности [376]. В качестве примера нелинейного многомерного объекта управления будем использовать беспилотный летательный аппарат (БПЛА) вертолётного типа.

Общая схема рассматриваемого типа БПЛА представлена на Рисунке 6.7 [230,358], на котором показана неподвижная (земная) система координат (FCS) X, Y, Z и подвижная систем координат (МС) x, y, z , жёстко связанная с элементами

конструкции аппарата. Угловое положение корпуса аппарата относительно осей МС определяется углами φ , θ , ψ – креном, тангажем и курсом соответственно. Матрица C перехода между указанными системами координат имеет вид [410]:

$$C = \begin{bmatrix} c\theta \cdot c\psi & c\theta \cdot s\psi & -s\theta \\ s\varphi \cdot s\theta \cdot c\psi - & s\varphi \cdot s\theta \cdot s\psi + & s\varphi \cdot c\theta \\ -c\varphi \cdot s\psi & +c\varphi \cdot c\psi & \\ c\varphi \cdot s\theta \cdot c\psi + & c\varphi \cdot s\theta \cdot s\psi - & c\varphi \cdot c\theta \\ +s\varphi \cdot s\psi & -s\varphi \cdot c\psi & \end{bmatrix}, \quad (6.28)$$

где использованы обозначения: $c\theta = \cos(\theta)$, $s\theta = \sin(\theta)$, $c\varphi = \cos(\varphi)$, $s\varphi = \sin(\varphi)$, $c\psi = \cos(\psi)$, $s\psi = \sin(\psi)$.

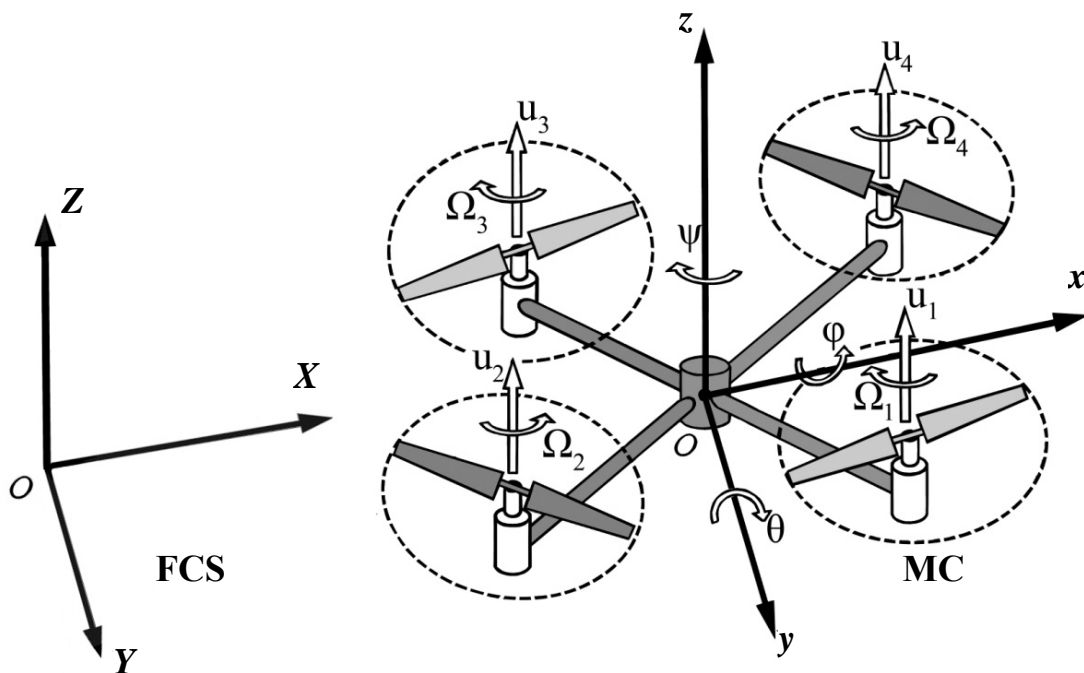


Рисунок 6.7 – Общая схема координат рассматриваемого БПЛА

Величины u_1, \dots, u_4 – обозначают силы тяги, развиваемые винтами вдоль оси z ; $\Omega_1, \dots, \Omega_4$ – частоты вращения винтов.

Движение БПЛА в выбранной системе координат может быть представлено системой уравнений [386,390,398,410, 411,414]:

$$\dot{\omega}_x = \frac{(J_y - J_z) \cdot \omega_y \omega_z + Q_x}{J_x}; \quad (6.29)$$

$$\dot{\omega}_y = \frac{(J_z - J_x) \cdot \omega_z \omega_x + Q_y}{J_y}; \quad (6.30)$$

$$\dot{\omega}_z = \frac{Q_z}{J_z}; \quad (6.31)$$

$$\dot{\varphi} = \omega_x + \operatorname{tg}(\theta) \cdot (\omega_y \cdot \sin(\varphi) + \omega_z \cdot \cos(\varphi)); \quad (6.32)$$

$$\dot{\theta} = \omega_y \cdot \cos(\varphi) - \omega_z \cdot \sin(\varphi); \quad (6.33)$$

$$\dot{\psi} = \frac{\omega_y \cdot \sin(\varphi) + \omega_z \cdot \cos(\varphi)}{\cos(\theta)}; \quad (6.34)$$

$$\dot{V}_x = \frac{m \cdot g \cdot \sin(\theta) - m(V_z \cdot \omega_y - V_y \cdot \omega_z) - k_x \cdot (V_x - Vw_x) \cdot |V_x - Vw_x|}{m}; \quad (6.35)$$

$$\dot{V}_y = \frac{-m \cdot g \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\theta) - m(V_x \cdot \omega_z - V_z \cdot \omega_x) - k_y \cdot (V_y - Vw_y) \cdot |V_y - Vw_y|}{m}; \quad (6.36)$$

$$\dot{V}_z = \frac{U_z - m \cdot g \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\varphi) - m(V_y \cdot \omega_x - V_x \cdot \omega_y) - k_z \cdot (V_z - Vw_z) \cdot |V_z - Vw_z|}{m}; \quad (6.37)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = C^T \cdot \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}, \quad (6.38)$$

где $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции угловой скорости БПЛА на оси x, y, z подвижной системы координат; J_x, J_y, J_z – главные моменты инерции аппарата относительно осей x, y, z ; Q_x, Q_y, Q_z – вращающие моменты относительно соответствующих

осей; V_{W_x} , V_{W_y} , V_{W_z} – проекции скорости ветра на оси x , y , z ; k_x , k_y , k_z – коэффициенты аэродинамического сопротивления при движении вдоль осей x , y , z ; U_z – суммарная сила тяги винтов БПЛА, направленная вдоль оси z ; m – масса аппарата; g – ускорение свободного падения; X , Y , Z – координаты аппарата в земной системе координат; V_x , V_y , V_z – проекции скорости аппарата на оси x , y , z .

Модель (6.29)-(6.38) содержит 12 координат состояния БПЛА: ω_x , ω_y , ω_z ; φ , θ , ψ ; V_x , V_y , V_z ; X , Y , Z . Предполагается, что все перечисленные координаты доступны для измерения в реальном масштабе времени с помощью соответствующих навигационных систем. Управляющие воздействия – вращающие моменты Q_x , Q_y , Q_z и суммарная сила U_z тяги винтов. Возмущения – силы F_w аэродинамического сопротивления перемещению аппарата в воздухе, включая силу ветра.

Заметим, что собственно динамическими уравнениями являются уравнения (6.29)-(6.31), (6.35)-(6.37). Уравнения (6.32)-(6.34), (6.38) определяют кинематические параметры вращательного движения корпуса аппарата в МС и поступательного движения его центра масс в FCS.

Основные свойства полученной модели:

- высокая размерность;
- наличие внутренних перекрёстных связей между координатами;
- существенная нелинейность этих взаимосвязей.

Эти свойства подтверждают актуальность решения задачи синтеза на основе синергетического подхода.

Каноническая постановка задачи синергетического подхода к синтезу регуляторов предполагает нахождение такого вектора управления, который бы обеспечил попадание системы на многообразие притягивающих аттракторов $\Psi = 0$ в пространстве её состояний и последующее движение вдоль них в заданное состояние [120,376]. При этом монотонный характер движения системы определяется дополнительными условиями:

$$T \cdot \dot{\Psi}(t) + \Psi(t) = 0, \quad (6.39)$$

где T – вектор постоянных времени регулирования, т.е. времени попадания системы на притягивающие аттракторы.

Конкретизируем поставленную задачу для рассматриваемого случая.

Пусть аппарат в начальный момент времени находится в некотором произвольном состоянии. Целью управления является перевод аппарата из произвольного начального состояния в режим движения по курсу $\psi_{\text{тр}}(t) = \text{const}$ на требуемой высоте $Z_r(t) = \text{const}$ со скоростями $\dot{X}_r = a_r$ и $\dot{Y}_r = \dot{X}_r \text{tg}(\psi_r)$, т.е. по траектории $X_r = a_r \cdot t$ и $Y_r = X_r \cdot \text{tg}(\psi_r)$ или, в векторной форме: $L_r(t) = \{X_r(t), Y_r(t), Z_r(t)\}$.

Подразумевается, что во время движения аппарата система управления должна парировать возмущающие воздействия порывов ветра F_w .

Искомое управление обозначим вектором $Q_r(t) = \{Q_{x,r}(t), Q_{y,r}(t), Q_{z,r}(t)\}$ и силой $U_z(t)$ тяги винтов.

В результате функциональная схема БПЛА как объекта управления примет вид, показанный на Рисунке 6.8.

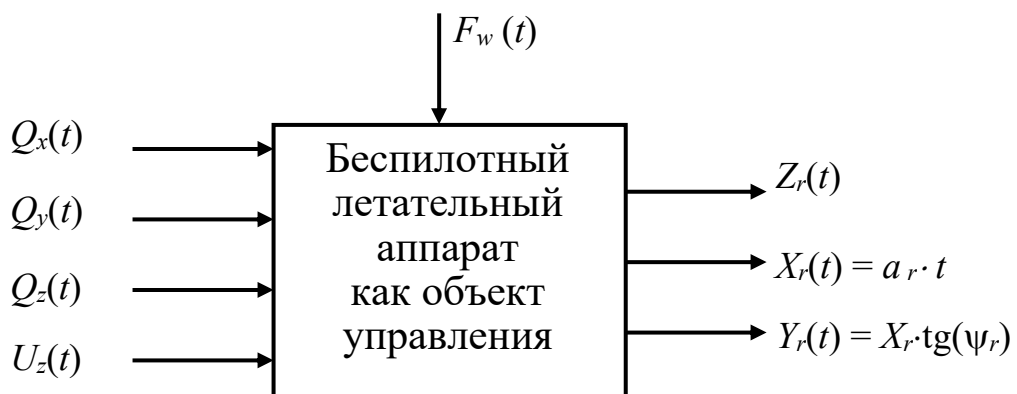


Рисунок 6.8 – Общая схема БПЛА как объекта управления

Показанное на Рисунке 6.8 представление БПЛА как объекта управления является недостаточным для решения задачи синтеза регулятора в указанной выше постановке. Принципиальное отличие синергетического подхода к поставленной задаче является формирование притягивающих аттракторов $\Psi = 0$

на некоторых множествах внутренних переменных объекта управления, выбор которых составляет изложенные ниже процедуры синтеза регулятора.

Формирование притягивающих аттракторов основано на декомпозиции переменных математической модели объекта на группы физически наблюдаемых величин, образующих последовательную динамически или кинематически связанную цепочку процессов в объекте управления. Осуществим такую декомпозицию для модели (6.29)-(6.38).

Уравнение (6.38) указывает на возможность получения требуемой траектории $L_r(t)$ полёта путём создания соответствующего вектора скоростей $V_r(t) = \{V_{x,r}(t), V_{y,r}(t), V_{z,r}(t)\}$. Таким образом, в качестве первой группы внутренних управляющих переменных выберем вектор $V = \{V_x, V_y, V_z\}$ фактических скоростей.

Соотношения (6.32)-(6.37) позволяют формировать в объекте вектор требуемых линейных скоростей $V_r(t)$ и требуемого курса $\psi_r(t)$ путём синтеза требуемого вектора угловых скоростей $\Omega_r(t) = \{\omega_{x,r}(t), \omega_{y,r}(t), \omega_{z,r}(t)\}$ и силы тяги $U_{z,r}(t)$. При этом угловые координаты $\varphi(t)$ и $\theta(t)$ измеряются соответствующими датчиками и используются регулятором для вычисления $\Omega_r(t)$ и $U_{z,r}(t)$. Эти координаты выполняют в данной системе подчинённую роль обеспечения $V_r(t)$ и $\psi_r(t)$, т.е. принимают те значения, которые необходимы для поддержания текущих требуемых значений скорости и курса. Отсюда следует, что ко второй группе внутренних управляющих переменных целесообразно отнести вектор фактических угловых скоростей $\Omega(t) = \{\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t)\}$ и требуемую силу тяги $U_{z,r}(t)$.

Вектор угловых скоростей $\Omega_r(t)$ в соответствии с уравнениями (6.29)-(6.31) формирует вращающие моменты $Q_r(t) = \{Q_{x,r}(t), Q_{y,r}(t), Q_{z,r}(t)\}$, создаваемые винтами аппарата. Вектор $Q_r(t)$ образует третью группу управляющих воздействий.

Заметим, что указанные на Рисунке 6.8 управляющие воздействия $Q_{x,r}(t)$, $Q_{y,r}(t)$, $Q_{z,r}(t)$ и $U_{z,r}(t)$ в результате декомпозиции модели БПЛА отнесены к разным

подсистемам аппарата и будут формироваться, как будет показано ниже, разными частями агрегированного регулятора.

Графическая иллюстрация результата декомпозиции представлена на Рисунке 6.9.

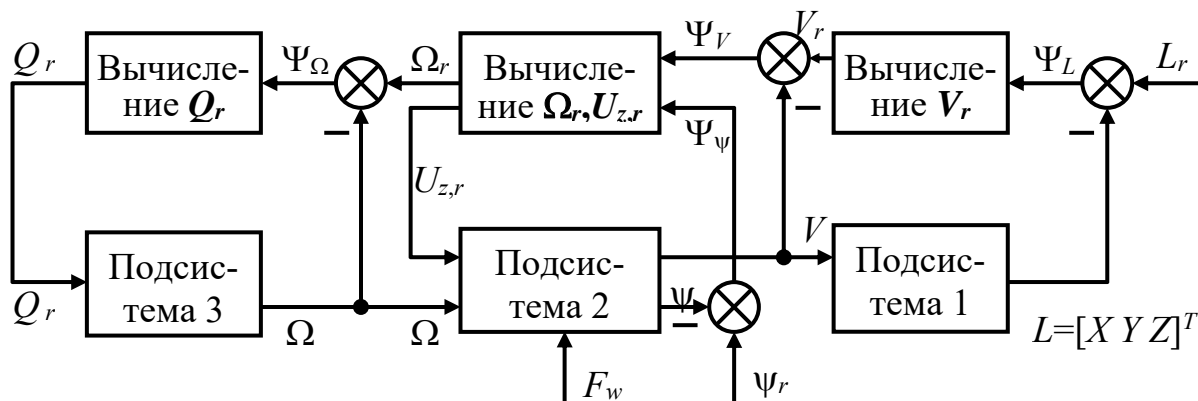


Рисунок 6.9 – Внутренние структуры БПЛА и агрегированного регулятора

Из Рисунка 6.9 следует, что разбиение объекта на три подсистемы даёт возможность провести аналогичное разбиение регулятора также на три части малой размерности, т.е. сделать его агрегированным. Таким образом, дальнейший синтез регулятора заключается в последовательном построении каждой его части в отдельности.

С этой целью воспользуемся методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов [119,120,376].

Первая группа переменных $V = \{V_x, V_y, V_z\}$, как уже было показано, формирует требуемую траекторию $L_r(t) = \{X_r(t), Y_r(t), Z_r(t)\}$ полёта БПЛА в координатах X, Y, Z . Для аналитического синтеза регулятора эта траектория должна быть задана дифференцируемыми функциями времени (в рассматриваемом случае $X_r(t) = a_r t$, $Y_r(t) = X_r(t) \operatorname{tg}(\psi_r)$, $Z_r(t) = \operatorname{const}$, т.е. это условие выполняется). Для этой группы переменных введём в рассмотрение дополнительные макропеременные $\Psi_L = L_r - L$: $\Psi_X = X_r - X$, $\Psi_Y = Y_r - Y$, $\Psi_Z = Z_r - Z$. Тогда, в качестве цели управления первой подсистемы можно поставить задачу её монотонной сходимости из произвольного состояния в состояние $\Psi_L = 0$, т.е. в

состояние с нулевым отклонением от заданной траектории. Поставленная задача (6.39) может быть записана в виде:

$$\begin{aligned} T_X \cdot (\dot{X}_r - \dot{X}) + (X_r - X) &= 0; \\ T_Y \cdot (\dot{Y}_r - \dot{Y}) + (Y_r - Y) &= 0; \\ T_Z \cdot (\dot{Z}_r - \dot{Z}) + (Z_r - Z) &= 0, \end{aligned} \quad (6.40)$$

где T_X , T_Y , T_Z постоянные времени переходных процессов, определяющие длительность последних.

Выражения для $\dot{X} = V_X$, $\dot{Y} = V_Y$, $\dot{Z} = V_Z$ найдём из (6.38):

$$\begin{aligned} V_X &= c\theta \cdot c\psi \cdot V_x + (s\varphi \cdot s\theta \cdot c\psi - c\varphi \cdot s\psi) V_y + (c\varphi \cdot s\theta \cdot c\psi + s\varphi \cdot s\psi) V_z; \\ V_Y &= c\theta \cdot s\psi \cdot V_x + (s\varphi \cdot s\theta \cdot s\psi + c\varphi \cdot c\psi) V_y + (c\varphi \cdot s\theta \cdot s\psi - s\varphi \cdot c\psi) V_z; \\ V_Z &= -s\theta \cdot V_x + s\varphi \cdot c\theta \cdot V_y + c\varphi \cdot c\theta \cdot V_z. \end{aligned} \quad (6.41)$$

Скорости $\dot{X}_r, \dot{Y}_r, \dot{Z}_r$ находятся прямым дифференцированием заданных компонент желаемой траектории $L_r(t)$ полёта: $\dot{X}_r = V_{X,r} = a_r$; $\dot{Y}_r = V_{Y,r} = V_{X,r} \operatorname{tg}(\psi_r)$; $\dot{Z}_r = 0$. Подставляя (6.41) в (6.40) получим систему алгебраических уравнений относительно неизвестных $V = \{V_x, V_y, V_z\}$:

$$\begin{aligned} c\theta \cdot c\psi \cdot V_x + (s\varphi \cdot s\theta \cdot c\psi - \varphi \cdot s\psi) V_y + (c\varphi \cdot s\theta \cdot c\psi + s\varphi \cdot s\psi) V_z &= V_{X,r} + \frac{V_{X,r} \cdot t - X}{T_X}; \\ c\theta \cdot s\psi \cdot V_x + (s\varphi \cdot s\theta \cdot s\psi + c\varphi \cdot c\psi) V_y + (c\varphi \cdot s\theta \cdot s\psi - s\varphi \cdot c\psi) V_z &= V_{Y,r} + \frac{Y_r - Y}{T_Y}; \\ -s\theta \cdot V_x + s\varphi \cdot c\theta \cdot V_y + c\varphi \cdot c\theta \cdot V_z &= \frac{Z_r - Z}{T_Z}. \end{aligned} \quad (6.42)$$

Решение (6.42) даёт расчётные значения $V = \{V_x, V_y, V_z\}$, которые вычисляются в регуляторе в реальном масштабе времени на основе непрерывно изменяющихся данных о фактической $L(t) = \{X(t), Y(t), Z(t)\}$ и желаемой

$L_r(t) = \{X_r(t), Y_r(t), Z_r(t)\}$ траекториях. Поскольку расчётные значения $V(t)$ обеспечивают асимптотическое приближение $L(t)$ к требуемой траектории $L_r(t)$, то обозначим эти расчётные значения как $V_r = \{V_{x,r}, V_{y,r}, V_{z,r}\}$, которые в переходных режимах будут не совпадать с фактическим вектором скоростей V , см. Рисунок 6.9.

Пример решения (6.42) для компоненты $V_{x,r}$ представлен в (6.43):

$$\begin{aligned}
 V_{x,r} = & (-c\psi \cdot T_Y T_Z \cdot c\theta \cdot X + c\psi \cdot T_Y T_X T_Z \cdot c\theta \cdot \dot{X}_r + c\psi \cdot T_Y T_Z \cdot c\theta \cdot \dot{X}_r t + \\
 & + T_Y T_X T_Z \cdot c\theta \cdot \dot{X}_r \cdot \operatorname{tg}(\psi_r) \cdot s\psi + T_X T_Z \cdot c\theta \cdot \dot{X}_r t \cdot \operatorname{tg}(\psi_r) \cdot s\psi - \\
 & - T_X T_Z \cdot c\theta \cdot Y \cdot s\psi + T_Y T_X \cdot Z \cdot s\theta - T_Y T_X \cdot Z_r \cdot s\theta) \cdot \frac{1}{T_Y T_X T_Z}.
 \end{aligned} \quad (6.43)$$

Важно отметить, что компоненты V_r в регуляторе получены аналитически и представляют собою полностью алгебраические выражения, т.е. с точки зрения теории управления регулятор является статическим нелинейным звеном.

Структура первого блока регулятора показана на Рисунке 6.10.

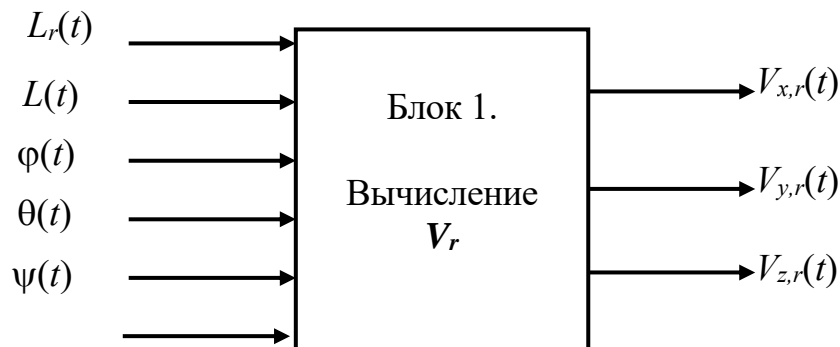


Рисунок 6.10 – Структура первого блока регулятора

Вторая группа переменных $\Omega(t) = \{\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t)\}$ и $U_{z,r}(t)$, управляющая подсистемой 2 в модели БПЛА (см. Рисунок 6.10), формирует текущий вектор скоростей V и курс ψ .

В качестве цели управления второй подсистемой целесообразно потребовать монотонную сходимость к нулю новых дополнительных макропеременных $\Psi_V = V_r - V$: $\Psi_{V_x} = V_{x,r} - V_x$, $\Psi_{V_y} = V_{y,r} - V_y$, $\Psi_{V_z} = V_{z,r} - V_z$ и $\Psi_\psi = \psi_r - \psi$, т.е. обеспечить выполнения равенств:

$$\begin{aligned}
T_{V_x} \cdot (\dot{V}_{x,r} - \dot{V}_x) + (V_{x,r} - V_x) &= 0; \\
T_{V_y} \cdot (\dot{V}_{y,r} - \dot{V}_y) + (V_{y,r} - V_y) &= 0; \\
T_{V_z} \cdot (\dot{V}_{z,r} - \dot{V}_z) + (V_{z,r} - V_z) &= 0; \\
T_{\psi} \cdot (\dot{\psi}_r - \dot{\psi}) + (\psi_r - \psi) &= 0,
\end{aligned} \tag{6.44}$$

в которых T_{V_x} , T_{V_y} , T_{V_z} , T_{ψ} – априорно заданные постоянные времени соответствующих переходных процессов.

Определим величины, входящие в систему (6.44):

– вектор $V = \{V_x, V_y, V_z\}$ и текущий курс ψ определяется датчиками БПЛА;

– вектор $V_r = \{V_{x,r}, V_{y,r}, V_{z,r}\}$ найден на предыдущем этапе синтеза решением (6.42) и является результатом вычислений в регуляторе первой подсистемы.

Требуемый курс $\psi_r = \text{const}$ задан;

– вектор $\dot{V} = \{\dot{V}_x, \dot{V}_y, \dot{V}_z\}$ и $\dot{\psi}$ определяются из уравнений (6.35)-(6.37), (6.34);

– вектор производных $\dot{V}_r = \{\dot{V}_{x,r}, \dot{V}_{y,r}, \dot{V}_{z,r}\}$ и $\dot{\psi}_r$ находятся аналитически по известным выражениям $V_r = \{V_{x,r}, V_{y,r}, V_{z,r}\}$ и ψ_r . В частности: $\dot{\psi}_r = 0$,

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{x,r} &= [-T_Y \cdot T_Z \cdot (\text{s}\varphi \cdot \text{s}\psi + \text{s}\theta \cdot \text{c}\varphi \cdot \text{c}\psi) \cdot (X_r - X) + T_X \cdot T_Z (\text{c}\psi \cdot \text{s}\varphi - \text{c}\varphi \cdot \text{s}\theta \cdot \text{s}\psi) (Y_r - Y) - \\
&- T_X \cdot T_Y \cdot \text{c}\varphi \cdot \text{c}\theta (Z_r - Z) + ((\text{c}\psi \cdot \text{s}\varphi - \text{c}\varphi \cdot \text{s}\theta \cdot \text{s}\psi) \text{tg}(\psi_r) - \text{s}\varphi \cdot \text{s}\psi - \\
&- \text{s}\theta \cdot \text{c}\varphi \cdot \text{c}\psi) T_X T_Y T_Z V_{x,r}] \cdot \frac{\omega_y}{T_X T_Y T_Z} + \\
&+ [T_Y T_Z (\text{s}\varphi \cdot \text{s}\theta \cdot \text{c}\psi - \text{c}\varphi \cdot \text{s}\psi) (X_r - X) + T_X T_Z (\text{c}\varphi \cdot \text{c}\psi + \text{s}\varphi \cdot \text{s}\psi \cdot \text{s}\theta) (Y_r - Y) + \\
&+ T_X T_Y \cdot \text{s}\varphi \cdot \text{c}\theta (Z_r - Z) + ((\text{s}\theta \cdot \text{s}\varphi \cdot \text{s}\psi + \text{c}\varphi \cdot \text{c}\psi) \text{tg}(\psi_r) + \\
&+ \text{s}\varphi \cdot \text{s}\theta \cdot \text{c}\psi - \text{c}\varphi \cdot \text{s}\psi) T_X T_Y T_Z V_{x,r}] \cdot \frac{\omega_z}{T_X T_Y T_Z} + \\
&+ [T_Y T_Z \cdot \text{c}\theta \cdot \text{c}\psi V_{x,r} + T_X T_Z \cdot \text{c}\theta \cdot \text{s}\psi \cdot V_{x,r} \text{tg}(\psi_r) + T_Y T_X \cdot \text{s}\theta (-\text{s}\theta \cdot V_x + \text{s}\varphi \cdot \text{c}\theta \cdot V_y + \text{c}\varphi \cdot \text{c}\theta \cdot V_z) - \\
&- T_Y T_Z \cdot \text{c}\theta \cdot \text{c}\psi (\text{c}\theta \cdot \text{c}\psi \cdot V_x + (\text{s}\varphi \cdot \text{s}\theta \cdot \text{c}\psi - \text{c}\varphi \cdot \text{s}\psi) V_y + (\text{c}\varphi \cdot \text{s}\theta \cdot \text{c}\psi + \text{s}\varphi \cdot \text{s}\psi) V_z) - \\
&- T_X T_Z \cdot \text{c}\theta \cdot \text{s}\psi (\text{c}\theta \cdot \text{s}\psi \cdot V_x + (\text{s}\varphi \cdot \text{s}\theta \cdot \text{s}\psi + \text{c}\varphi \cdot \text{c}\psi) V_y + (\text{c}\varphi \cdot \text{s}\theta \cdot \text{s}\psi - \text{s}\varphi \cdot \text{c}\psi) V_z)] \times \frac{1}{T_X T_Y T_Z}.
\end{aligned}$$

Условия (6.44) представляют собою систему линейных уравнений относительно неизвестных $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ и U_z :

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & 0 \\ 0 & \alpha_{21} & \alpha_{23} & 0 \\ 0 & \alpha_{31} & \alpha_{32} & 0 \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ U_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{bmatrix}. \quad (6.45)$$

Система (6.45) аналитически решается относительно входящих в них искомых величин $\Omega(t) = \{\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t)\}$ и $U_{z,r}(t)$, которые обеспечивают асимптотическое приближение фактического вектора V к требуемому V_r и курса ψ к ψ_r на первом уровне декомпозиции системы.

Решение (6.45) обозначим как $\Omega_r = \{\omega_{x,r}, \omega_{y,r}, \omega_{z,r}\}$ и $U_{z,r}$, см. Рисунок 6.10. Громоздкость решения (6.45) не позволяет привести его здесь в полном виде. Однако для пояснения структуры и физического содержания этого решения покажем содержание компоненты ω_y в свёрнутом виде:

$$\omega_y = \gamma_{22} \cdot \dot{\theta} + \gamma_{23} \cdot \dot{\psi} + \gamma_2, \quad (6.46)$$

где производные $\dot{\theta}, \dot{\psi}$ известны из (6.33), (6.34); коэффициенты при этих производных:

$$\begin{aligned} \gamma_{22} = & [T_Y T_Z \cdot s\theta \cdot c\psi \cdot (X_r - X) + T_X T_Z \cdot s\theta \cdot s\psi \cdot (Y_r - Y) + \\ & + T_X T_Y \cdot c\theta \cdot (Z_r - Z) + T_X T_Y T_Z \cdot c\phi \cdot s\theta \cdot c\psi \cdot V_{X,r} + \\ & + T_X T_Y T_Z \cdot c\phi \cdot s\theta \cdot s\psi \cdot V_{Y,r}] \cdot \frac{c\phi}{T_X T_Y T_Z (V_y \cdot s\phi + V_z \cdot c\phi)}; \end{aligned} \quad (6.47)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{23} = & [T_Y T_Z \cdot c\theta \cdot s\psi \cdot (X_r - X) - T_X T_Z \cdot c\theta \cdot c\psi \cdot (Y_r - Y) + \\ & + T_X T_Y T_Z \cdot c\phi \cdot c\theta \cdot s\psi \cdot V_{X,r} - \\ & - T_X T_Y T_Z \cdot c\phi \cdot c\theta \cdot c\psi \cdot V_{Y,r}] \cdot \frac{c\phi}{T_X T_Y T_Z (V_y \cdot s\phi + V_z \cdot c\phi)}. \end{aligned} \quad (6.48)$$

Заметим, что используемые в (6.46) значения $\dot{\theta}, \dot{\psi}$, вычисляемые по (6.33) и (6.34), содержат в себе величину ω_y . т.е. для получения точного решения системы (6.45) уравнение (6.46) следует решить относительно ω_y . Однако на практике, в режимах полёта с докритическими значениями крена φ и тангажа θ вместо расчётных величин $\dot{\theta}, \dot{\psi}$ могут быть использованы фактические значения производных этих угловых координат БПЛА, измеряемые гироскопами. Эта возможность позволяет существенно снизить требования к вычислительным возможностям микроконтроллеров и их быстродействию для аппаратов неспециального назначения. В БПЛА высокого класса наличие альтернативного способа организации вычислительного процесса позволит существенно повысить надёжность аппарата на основе диверсного подхода [363,375]. С учётом изложенного структура блока 2 регулятора приобретает вид, показанный на Рисунке 6.11.

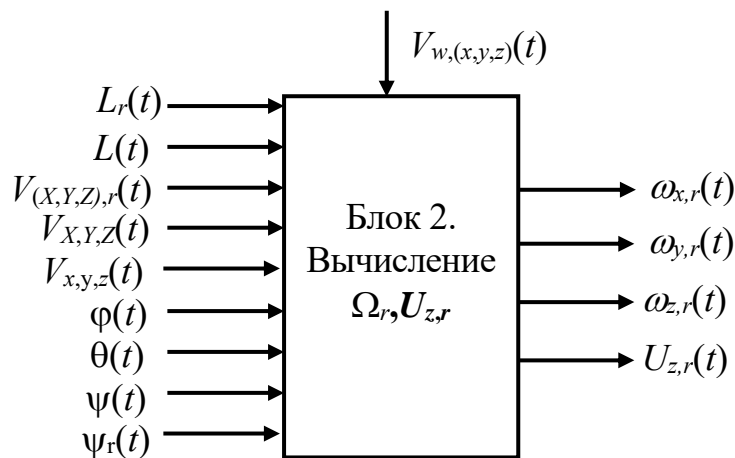


Рисунок 6.11 – Структура второго блока регулятора

Третий блок регулятора формирует требуемые вращающие моменты $Q_r(t) = \{Q_{x,r}(t), Q_{y,r}(t), Q_{z,r}(t)\}$, создаваемые винтами аппарата.

Для того чтобы вектор $Q_r(t)$ обеспечил расчётные значения вектора угловых скоростей $\Omega_r = \{\omega_{x,r}, \omega_{y,r}, \omega_{z,r}\}$ воспользуемся уравнениями динамики (6.29)-(6.31) и введём очередную группу макропеременных $\Psi_\Omega = \Omega_r - \Omega$: $\Psi_{\omega_x} = \omega_{x,r} - \omega_x$,

$\Psi_{\omega_y} = \omega_{y,r} - \omega_y$, $\Psi_{\omega_z} = \omega_{z,r} - \omega_z$, потребовав их монотонную сходимость к нулю с постоянными времени T_{ω_x} , T_{ω_y} , T_{ω_z} . Для этого составим систему уравнений:

$$\begin{aligned} T_{\omega_x} \cdot (\dot{\omega}_{x,r} - \dot{\omega}_x) + (\omega_{x,r} - \omega_x) &= 0; \\ T_{\omega_y} \cdot (\dot{\omega}_{y,r} - \dot{\omega}_y) + (\omega_{y,r} - \omega_y) &= 0; \\ T_{\omega_z} \cdot (\dot{\omega}_{z,r} - \dot{\omega}_z) + (\omega_{z,r} - \omega_z) &= 0. \end{aligned} \quad (6.49)$$

Определим компоненты системы (6.49):

– вектор текущих угловых скоростей $\Omega = \{\omega_x, \omega_y, \omega_z\}$ определяется датчиками БПЛА в реальном масштабе времени;

– вектор $\Omega_r = \{\omega_{x,r}, \omega_{y,r}, \omega_{z,r}\}$ найден на предыдущем этапе синтеза решением (6.45) и является результатом вычислений в регуляторе второй подсистемы;

– вектор $\dot{\Omega} = \{\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z\}$ задан аналитически уравнениями (6.29)-(6.31);

– вектор производных $\dot{\Omega}_r = \{\dot{\omega}_{x,r}, \dot{\omega}_{y,r}, \dot{\omega}_{z,r}\}$ находится аналитическим дифференцированием известных выражений для $\Omega_r = \{\omega_{x,r}, \omega_{y,r}, \omega_{z,r}\}$, найденных на предыдущем этапе синтеза.

После подстановки перечисленных компонент в (6.49) получим систему алгебраических уравнений, решаемую относительно искомого вектора моментов $Q_r(t) = \{Q_{x,r}(t), Q_{y,r}(t), Q_{z,r}(t)\}$.

Структура третьего блока регулятора показана на Рисунке 6.12.

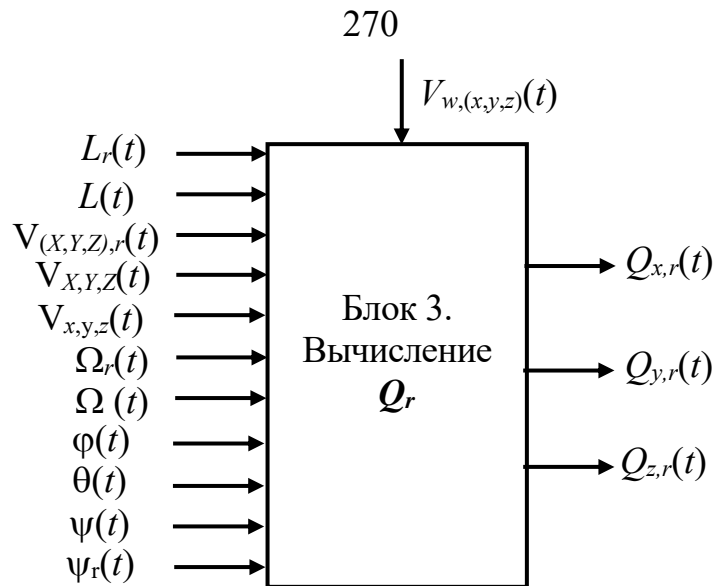


Рисунок 6.12 – Структура третьего блока регулятора

Объём вычислений в последнем, третьем блоке регулятора весьма значителен, но так же, как и в блоке 2, может быть существенно уменьшен непосредственным измерением величин $\dot{\Omega}_r = \{\dot{\omega}_{x,r}, \dot{\omega}_{y,r}, \dot{\omega}_{z,r}\}$ соответствующими датчиками угловых ускорений.

Расчёт третьего блока завершает синтез регулятора в том случае, если исполнительные электродвигатели с установленными на них винтами (см. Рисунок 6.7) обеспечивают изменение сил тяги u с постоянными времени переходных процессов, значительно меньшими по сравнению с заданной длительностью попадания регулируемых координат на притягивающие аттракторы (см. величины $T_X, T_Y, T_Z, T_{Vx}, T_{Vy}, T_{Vz}, T_\psi, T_{\omega x}, T_{\omega y}, T_{\omega z}$).

Если исполнительные механизмы БПЛА не обеспечивают указанное соотношение постоянных времени, то в структуру системы следует включить указанные исполнительные механизмы и в регулятор ввести блок 4, вычисляющий требуемые значения напряжений питания электродвигателей.

Проверка работоспособности синтезированного регулятора проводилась на имитационной модели для следующей задачи управления:

из начального положения корпуса БПЛА с нулевыми значениями линейных координат X, Y, Z и произвольно заданным угловым положением $\varphi = 0,2$ рад,

$\theta = 0,4$ рад, $\psi = -0,4$ рад в течение десяти секунд выйти на траекторию полёта высотой $Z_r(t) = 20$ м, курсом $\psi_r(t) = 0,4$ рад и скоростями полёта $V_{X,r}(t) = 3$ м/с, $V_{Y,r}(t) = V_{X,r}(t) \cdot \text{tg}(\psi_r)$, $V_{Z,r}(t) = 0$.

В процессе движения по заданной траектории система управления должна парировать ветровую нагрузку со скоростями $V_{W_x} = -5$ м/с, $V_{W_y} = -5$ м/с, $V_{W_z} = -0,5$ м/с и порывы ветра до скоростей $V_{W_x} = -15$ м/с, $V_{W_y} = -15$ м/с, направленными навстречу движению аппарата.

Результаты проверки представлены на Рисунках 6.13-6.15.

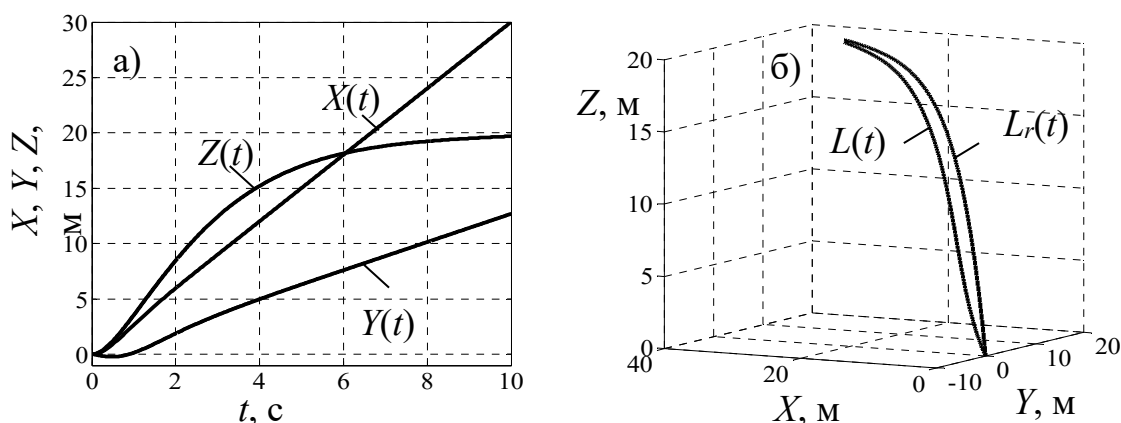


Рисунок 6.13 – Перемещение БПЛА при наборе требуемой высоты $Z_r = 20$ м с одновременным набором скорости полёта $\dot{X}_r = 3$ м/с, $\dot{Y}_r = \dot{X}_r \text{tg}(\psi_r)$ и выходом на курс $\psi_r = 0,4$ рад: а) изменение линейных координат X, Y, Z во времени; б) расчётная $L_r(t)$ и фактическая $L(t)$ траектории полёта в неподвижной системе координат X, Y, Z

Рисунок 6.13 демонстрирует набор высоты $Z(t) = 20$ м аппаратом в течение 10 с и его последующий полёт на этой высоте с проекциями скоростей $V_{X,r}(t) = 3$ м/с, $V_{Y,r}(t) = V_{X,r}(t) \cdot \text{tg}(\psi_r) = 3 \text{tg}(0,4) = 1,27$ м/с. Траектория $L(t)$ полёта (Рисунок 6.13б) в неподвижной системе координат характеризуется монотонным сближением с расчётным аттрактором $L_r(t)$ по условиям (6.40).

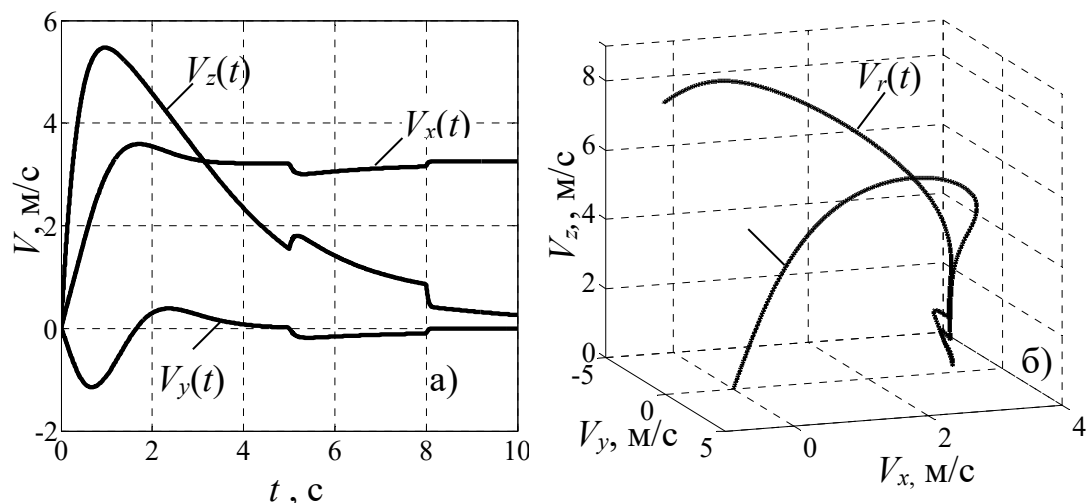


Рисунок 6.14 – Изменение скоростей БПЛА в подвижной системе координат:
 а) проекции скоростей $V_x(t)$, $V_y(t)$, $V_z(t)$; б) фактическая $V(t)$ и расчётная $V_r(t)$
 фазовые траектории в пространстве скоростей V_x, V_y, V_z

На Рисунке 6.14 показано изменение скоростей $V_x(t)$, $V_y(t)$, $V_z(t)$ БПЛА в подвижной системе координат x, y, z . Рисунок 6.14а свидетельствует о том, что в течение переходного процесса продольная ось x аппарата (см. Рисунок 6.7) повернулась на заданный курс, и БПЛА движется по этому курсу с установившейся скоростью $V_x(t)$, обеспечивающей заданную скорость $V_{x,r}(t) = 3$ м/с в неподвижной системе координат. При этом скорость $V_z(t)$ стремится к малому значению в силу существования ненулевого тангажа, необходимого для горизонтального полёта. Скорость $V_y(t)$ уменьшается до нуля, так как ось y ортогональна установившемуся направлению движения вдоль оси x . Рисунок 6.14б показывает траекторию попадания вектора $V(t)$ фактических скоростей на притягивающий аттрактор расчётного вектора $V_r(t)$. На Рисунках 6.14а,б видно также влияния порыва ветра на интервале $t = [5; 8]$ с. Как и следовало ожидать, встречный ветер вызвал первоначальное уменьшение скоростей $V_x(t)$ и $V_y(t)$, постепенно парируемое системой управления. Увеличение $V_z(t)$ подтверждает известный факт роста подъёмной силы при увеличении воздушной скорости летательного аппарата.

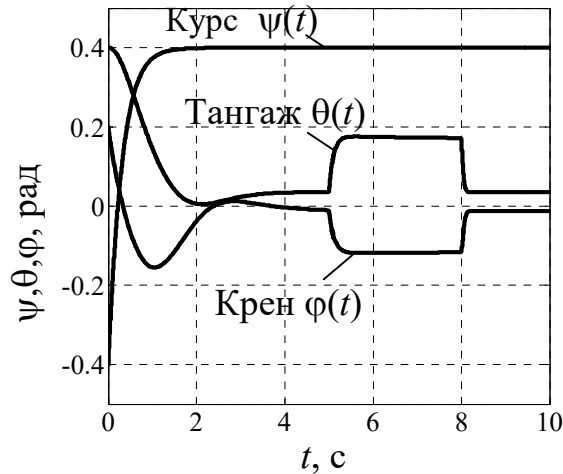


Рисунок 6.15 – Изменение углового положения аппарата: курса $\psi(t)$, крена $\varphi(t)$ и тангажа $\theta(t)$, при выходе на заданный режим полёта

Изменение угловых координат $\psi(t)$, $\varphi(t)$, $\theta(t)$ БПЛА, показанное на Рисунке 6.15 подтверждает достаточно быстрый, в течение 2 с, выход аппарата на заданный курс $\psi_r(t) = 0,4$ рад, а также обработку системой ветровой нагрузки в интервале времени $t = [5; 8]$ с за счёт соответствующего наклона корпуса, т.е. изменением крена $\varphi(t)$ и тангажа $\theta(t)$.

Таким образом, проверка работоспособности системы свидетельствует о достижении поставленной цели управления беспилотным летательным аппаратом, т.е. подтверждает возможность аналитического синтеза агрегированного регулятора БПЛА на основе синергетического подхода к управлению.

Представленные процедуры аналитического синтеза агрегированного регулятора методологически основаны на принципах многоальтернативности:

– принцип многообразия и разделения функций, проявляющийся здесь в том, что на основе анализа физического содержания математической модели объекта последний разбивается на модули (подсистемы), отражающие локальные динамические или кинематические взаимосвязи между группами координат. В результате такой декомпозиции модели объекта появляется возможность формирования соответствующей блочной структуры регулятора. Поскольку

размерность каждой подсистемы ниже общей размерности объекта, то каждый блок регулятора также имеет малую размерность;

– принцип многоуровневости алгоритма управления. Реализация этого принципа заключается в методике синтеза системы управления путём поочерёдного, последовательного аналитического решения задач управления каждой подсистемой объекта в отдельности, образующих иерархическую структуру взаимосвязей.

Очередной раз заметим, что принципы многоальтернативности носят конструктивный характер, и указывают на конкретные способы реализации синергетического подхода к проектированию регуляторов.

В практическом плане применение изложенного подхода позволило преодолеть проклятие размерности решаемой задачи построения многомерного регулятора и использовать в ходе синтеза полную нелинейную модель объекта, не прибегая к её линеаризации. Кроме того, поскольку синтез системы осуществляется путём максимального согласования технических требований с естественными динамическими и кинематическими свойствами объекта управления, то алгоритмы полученного регулятора содержат только алгебраические преобразования, и не нуждаются в численном решении дифференциальных уравнений в реальном масштабе времени.

6.4 Синергетическое управление перемещением подвешенного груза

Задача управления подвешенным грузом заключается в перемещении точки его подвеса по горизонтали таким образом, чтобы груз в процессе его движения не раскачивался, или, иными словами, не изменял знака своего углового положения относительно вертикальной оси подвеса.

Физическая причина колебаний заключается в том, что в момент трогания с места груз, имеющий массу m_2 , в силу своей инерционности отстаёт от точки подвеса, и возникает угловое отклонение α линии его подвеса от вертикали, Рисунок 6.16а.

В результате груз приобретает потенциальную энергию, которая в процессе перемещения будет расходоваться на совершение медленно затухающих колебательных движений. Симметричное явление происходит при остановке точки подвеса: груз по инерции продолжает движение, его кинетическая энергия переходит в потенциальную, и снова возникают колебания.

Наиболее распространённые способы демпфирования возникающих колебаний используют те или иные конструктивные исполнения системы подвеса (пассивные способы) [187,315], либо предполагающие устранение колебаний в результате силового управления движением точки подвеса (каретки) с помощью электрического или гидравлического привода (активные способы) [78,79,260,339]. Распространённым недостатком перечисленных классических способов является низкая степень гашения колебаний в сочетании с высокой чувствительностью результата управления к изменению параметров системы «каретка-груз» [283]. К таким параметрам в первую очередь следует отнести массу груза, которая может варьироваться в широких пределах в зависимости от конкретной производственной задачи.

В связи с этим можно предположить, что качественный скачок в решении задачи управления подвешенным грузом может быть достигнут в результате синергетического подхода к её решению на основе принципов многоальтернативности. Из физических соображений очевидно, что управление свободно подвешенным грузом, обладающим большой массой и приобретающим в процессе перемещения значительной механической энергией, целесообразно осуществлять с максимальным использованием траектории и динамики собственного движения объекта. В результате такого управления следует ожидать значительного упрощения регуляторов и повышения качества регулирования с одновременным снижением энергетических затрат.

Свойство робастности при таком управлении можно обеспечить на основе нечёткого регулирования, идеологически близкого к управлению в условиях неопределённости [4,240,276,288,328,340,429].

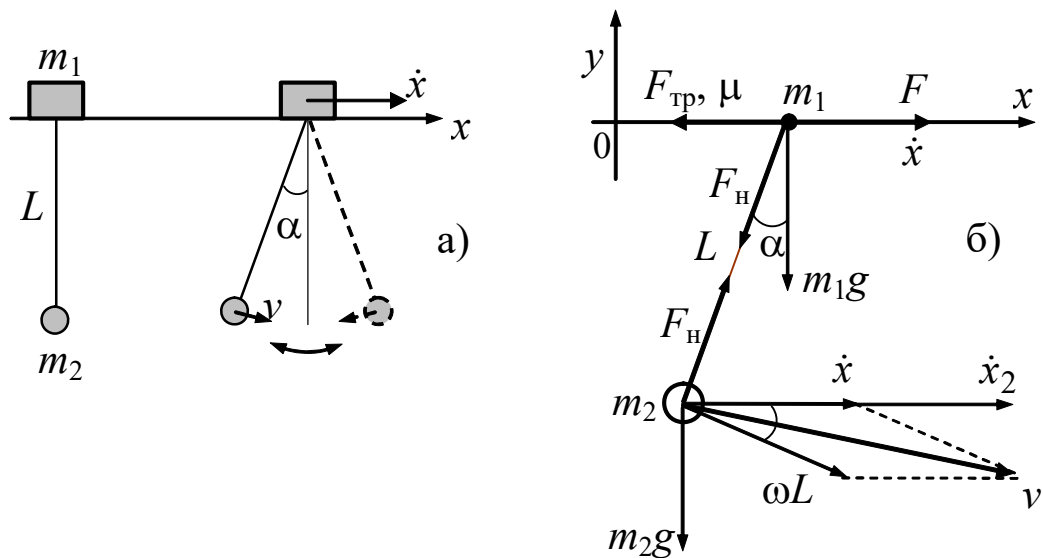


Рисунок 6.16 – Расчётная схема объекта управления

Объектом управления в рассматриваемой задаче является тележка и груз, свободно подвешенный к ней на гибком тросе. Расчётные физические величины, которые будем использовать при описании объекта, показаны на Рисунке 6.16б:

x – горизонтальная ось неподвижной системе координат, м;

y – вертикальная ось неподвижной системы координат, м;

F – сила, прикладываемая со стороны электропривода к точке подвеса, Н;

$F_{тр}$ – сила трения, действующая на каретку, Н;

μ – коэффициент трения между колёсами каретки и направляющими её перемещения ($\mu=r/R$, где r – коэффициент трения качения, R – радиус колёс каретки, м);

m_1 – масса каретки, кг; m_1g – сила тяжести, действующая на каретку, Н;

F_H – сила натяжения троса, Н;

L – длина троса, м; α – угловое отклонение троса от вертикали, рад;

m_2 – масса груза, кг;

m_2g – сила тяжести, действующая на груз, Н;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

v – скорость груза в неподвижной системе координат, м/с;

$\omega = -\dot{\alpha}$ – частота вращения груза (угловая скорость), с^{-1} ;

\dot{x} – скорость поступательного движения каретки, м/с ;

\dot{x}_2 – горизонтальная составляющая скорости груза ($\dot{x}_2 = \dot{x} + \omega L \cos \alpha$), м/с .

Уравнения движения объекта в координатах состояния x и α имеют вид [53]:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2)\ddot{x} + m_2L(\ddot{\alpha} \cos \alpha - \dot{\alpha}^2 \sin \alpha) = F - F_{\text{тр}}; \\ \ddot{x} \cos \alpha + L\ddot{\alpha} + g \sin \alpha = 0. \end{cases} \quad (6.50)$$

$$F_{\text{тр}} = \mu(m_1g + F_{\text{н}} \cos \alpha) \text{sign} \dot{x}, \quad (6.51)$$

$$F_{\text{н}} = m_2g \cos \alpha + m_2\ddot{x} \sin \alpha + m_2\dot{\alpha}^2 L. \quad (6.52)$$

В соответствии с концепцией нечёткого управления полученная полная модель объекта (6.50)–(6.52) при синтезе регулятора не используется, и предназначена здесь только для визуального анализа физических свойств объекта и проверки результатов синтеза на имитационной модели.

Реализация синергетического подхода к нечёткому управлению предполагает предварительное проведение качественного анализа физического содержания задачи для того, чтобы формировать управляющее воздействие на объект согласованно с его собственным движением.

На Рисунке 6.17 представлены основные физические величины, характеризующие систему «каретка-груз» в первые 5 секунд после приложений постоянной силы $F = 500 \text{ Н}$.

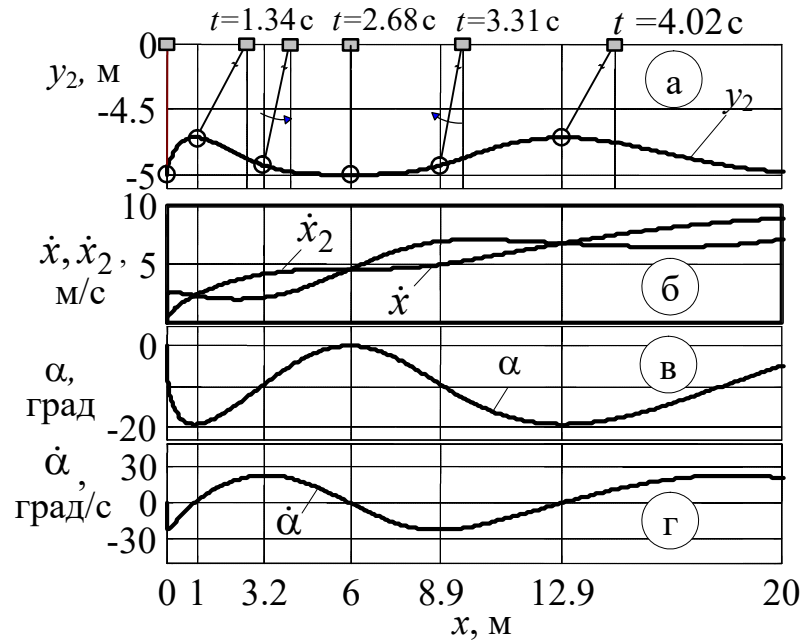


Рисунок 6.17 – Анализ физического содержания задачи

На отрезке движения $x = [0; 1]$ м скорость \dot{x} каретки быстро возрастает (Рисунок 6.17б), а затем, по мере начала перемещения груза вперёд и вверх (Рисунок 6.17а), снижается.

В точке $x = 1$ м груз поднимается на максимальную высоту $y_2 = -4,7$ м и горизонтальные скорости \dot{x} , \dot{x}_2 каретки и груза становятся равными. Отклонение груза от вертикали также максимальное: $\alpha \approx -20$ град, т.е. груз получает максимальную потенциальную энергию.

После этого груз начинает вращаться против часовой стрелки относительно точки подвеса (Рисунок 6.17в), его потенциальная энергия переходит в кинетическую, и скорость груза становится больше скорости каретки (Рисунок 6.17б, отрезок $x = [1; 6]$ м).

В точке $x = 6$ м горизонтальные скорости каретки и груза снова становятся равными, угловая скорость груза равно нулю. При этом он располагается вертикально точно под кареткой. Такое положение было бы желательным для дальнейшего перемещения груза, однако под действием силы F каретка продолжает увеличивать скорость и груз снова начинает разгоняться вперёд и вверх, вновь запасая потенциальную энергию для очередного цикла колебаний.

Представленный анализ процесса трогания груза с места позволяет сделать следующие выводы:

– если в момент времени, при котором угловое отклонение груза от вертикали и его угловая скорость равны нулю, снять управляющее воздействие (принять $F = 0$), то груз и каретка, имея равные скорости \dot{x}_2 и \dot{x} , сохранят своё плоскопараллельное поступательное движение без вращения груза относительно точки подвеса, т.е. без раскачивания. Отметим, что такое управление в максимальной степени использует собственную динамику объекта и не требует дополнительной энергии на его демпфирование;

– для того чтобы возможность перехода к плоскопараллельному движению возникла раньше (левее точки $x = 6$ м), разгон системы целесообразно осуществлять в три этапа:

- 1) приложить силу F для начала движения системы;
- 2) при приближении груза к максимальному угловому отклонению снять управление, предоставив возможность грузу подняться на некоторую максимальную высоту $y_{2,\max}$ с последующим вращением в противоположную сторону (в направлении против хода часовой стрелки на Рисунке 6.17а);
- 3) при приближении скорости вращения груза к максимальной (Рисунок 5.17г, $x = 3,2$ м), следует снова подать управление F для того, чтобы скорость каретки сравнялась с поступательной скоростью груза, и при наступлении этого равенства управление снять.

Можно сказать, что первый этап служит для сообщения системе некоторого количества движения, определяющего среднюю скорость переноса груза, второй – для предотвращения избыточного накопления грузом потенциальной энергии; третий – для выравнивания скорости \dot{x} каретки со скоростью \dot{x}_2 груза.

В результате следует ожидать, что при трогании с места груз однократно отклонится от вертикали, а затем вернётся в вертикальное положение с одновременным переходом к плоскопараллельному движению совместно с кареткой.

Для останова системы описанные выше операции следует повторить с обратными знаками.

Анализ физического содержания рассматриваемой задачи указывает на то, что для контроля над состоянием объекта достаточно измерять всего две его координаты: угол α отклонения груза от вертикали и скорость $\dot{\alpha}$ изменения этого угла (Рисунок 6.17).

По умолчанию подразумевается, что эти величины практически доступны для прямого измерения или восстановления с помощью наблюдателей.

Таким образом, на вход регулятора будут поступать две физические величины: угловое положение α и угловая скорость $\dot{\alpha}$ груза, которым будут сопоставлены лингвистические переменные z_1 и z_2 соответственно.

Для определения необходимого количества нечётких значений этих переменных воспользуемся Рисунок 6.18, который представляет собою фрагменты Рисунок 6.17в,г для величин α и $\dot{\alpha}$ на отрезке $x = [0;6]$ м, соответствующему интервалу времени $t = [0;2,68]$ с.

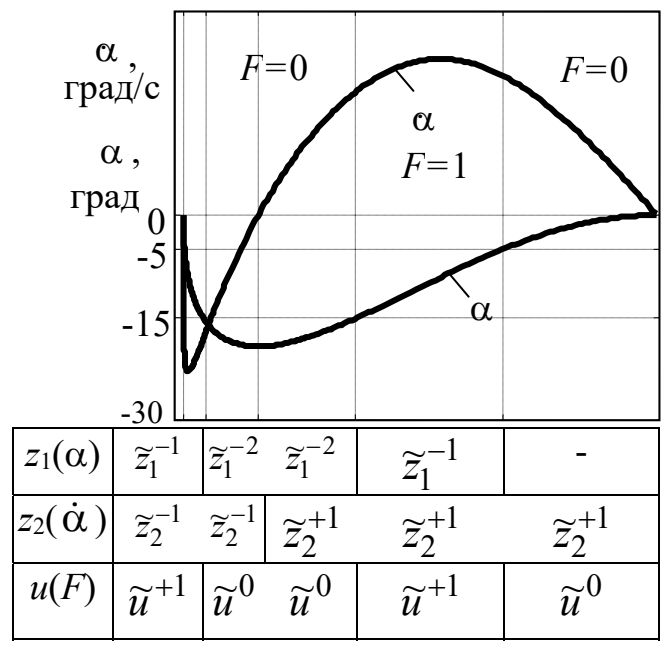


Рисунок 6.18 – Анализ областей определения нечётких переменных

На Рисунке 6.18 видно, что в соответствии с изложенным выше содержанием этапов процесса перехода системы из положения покоя в состояние плоскопараллельного движения относительно оси x (в данном случае равномерного и прямолинейного перемещения) для задания лингвистической переменной z_1 необходимы две нечёткие переменные \tilde{z}_1^{-2} и \tilde{z}_1^{-1} с областями определения $[-30;-15]$ и $[-15;-5]$ градусов соответственно.

Для режима торможения потребуются также две симметричные нечёткие переменные \tilde{z}_1^{+1} и \tilde{z}_1^{+2} с областями определения $[5;15]$ и $[15;30]$ градусов, Рисунок 6.19.

Таким образом $z_1 = \{\tilde{z}_1^{-2}, \tilde{z}_1^{-1}, \tilde{z}_1^{+1}, \tilde{z}_1^{+2}\}$.

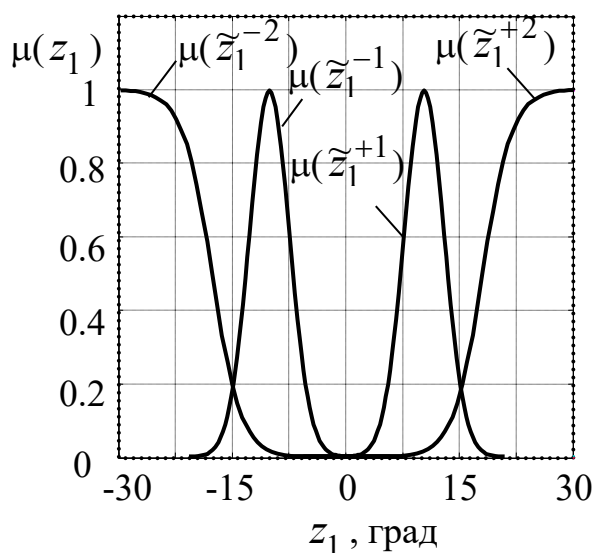


Рисунок 6.19 – Функции принадлежности $\mu(z_1)$ нечётких значений лингвистической переменной z_1 (угол отклонения груза)

Интервал $\alpha = [-5;5]$ не сопоставлен никакой нечёткой переменной с целью ускорения процесса переключения управления u (силы F) и, как следствие, улучшения быстродействия системы.

Для того чтобы различать участки движения с уменьшающимся и растущим углом отклонения α , у лингвистической переменной z_2 (угловая скорость $\dot{\alpha}$ груза) следует определить две нечёткие переменные \tilde{z}_2^{-1} и \tilde{z}_2^{+1} с областями определения $[-30;0]$ и $[0;30]$ град/с, т.е. $z_2 = \{\tilde{z}_2^{-1}, \tilde{z}_2^{+1}\}$, Рисунок 6.20.

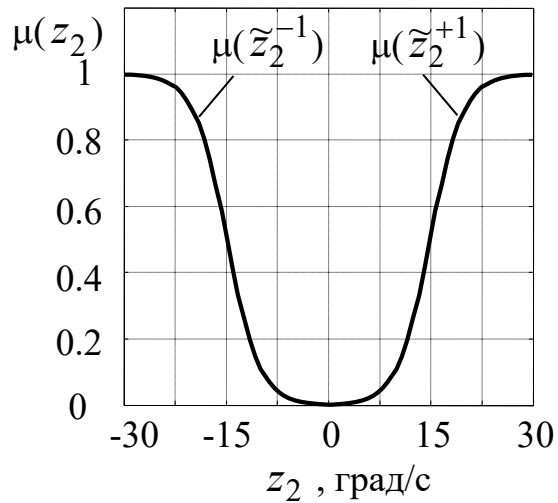


Рисунок 6.20 – Функции принадлежности $\mu(z_2)$ нечётких значений лингвистической переменной z_2 (угловая скорость груза)

Выход регулятора формируется с помощью лингвистической переменной u (сила F), заданной в нормированном диапазоне $[-1;1]$ тремя нечёткими переменными: $u = \{\tilde{u}^{-1}, \tilde{u}^0, \tilde{u}^{+1}\}$, равномерно заполняющими указанный диапазон, Рисунок 6.21. Эти переменные соответствуют трём значениям силы F : $F = -1$; $F = 0$ и $F = +1$.

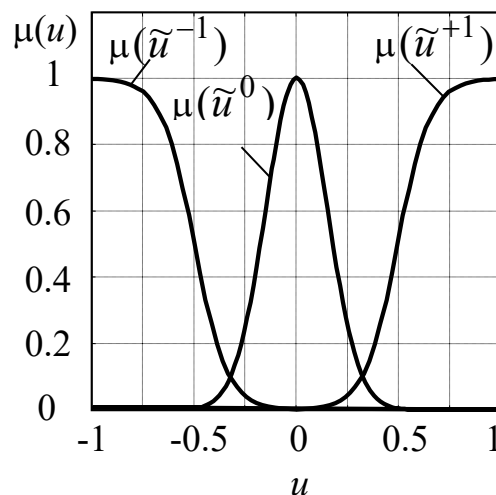


Рисунок 6.21 – Функции принадлежности $\mu(u)$ нечётких значений лингвистической переменной u (управляющее воздействие)

Решающие правила, определяющие алгоритм нечёткого управления, формируются путём выписывания нечётких переменных в столбцах таблицы на Рисунке 6.18. Например, из первого слева столбца, соответствующему режиму начала движения системы, получаем: $\tilde{z}_1^{-1} \wedge \tilde{z}_2^{-1} \rightarrow \tilde{u}^{+1}$, и т.д. с учётом симметричной смены знаков для режима торможения.

В итоге алгоритм нечёткого управления будет содержать шесть правил:

$$\begin{aligned}
 &\tilde{z}_1^{-1} \wedge \tilde{z}_2^{-1} \rightarrow \tilde{u}^{+1}; \\
 &\tilde{z}_1^{-2} \rightarrow \tilde{u}^0; \\
 &\tilde{z}_1^{-1} \wedge \tilde{z}_2^{+1} \rightarrow \tilde{u}^{+1}; \\
 &\tilde{z}_1^{+1} \wedge \tilde{z}_2^{+1} \rightarrow \tilde{u}^{-1}; \\
 &\tilde{z}_1^{+2} \rightarrow \tilde{u}^0; \\
 &\tilde{z}_1^{+1} \wedge \tilde{z}_2^{-1} \rightarrow \tilde{u}^{-1}.
 \end{aligned} \tag{6.53}$$

Анализ правил (6.53) указывает на избыточность числа входных переменных: переменная z_2 не используется, т.е. для управления достаточно только информация z_1 об угловом положении груза.

Таким образом, алгоритм управления примет вид:

$$\begin{aligned}
 &\tilde{z}_1^{-2} \rightarrow \tilde{u}^0; \\
 &\tilde{z}_1^{-1} \rightarrow \tilde{u}^{+1}; \\
 &\tilde{z}_1^{+1} \rightarrow \tilde{u}^{-1}; \\
 &\tilde{z}_1^{+2} \rightarrow \tilde{u}^0.
 \end{aligned} \tag{6.54}$$

Важно отметить, что результат синтеза нечёткого регулятора хорошо соответствует процессу управления оператором-человеком, который при перемещении груза визуально ориентируется, главным образом, на угол его отклонения от вертикали.

Вместе с решающими правилами (6.54) реальный процесс управления предусматривает наличие обязательных команд на трогание и останов груза.

Для реализации этих команд сохраним лингвистическую переменную z_2 (угловая скорость $\dot{\alpha}$ груза в качестве переключателя этих режимов: при кратковременной подаче на вход регулятора значения $z_2 = \{\tilde{z}_2^{-1}\}$ (первое правило

системы (6.53)) груз тронется с места и начнёт движение под управлением первых трёх правил системы (6.53); а при кратковременной подаче $z_2 = \{\tilde{z}_2^{+1}\}$ (четвёртое правило системы (6.53)) произойдёт переключение режима, и начнётся процесс торможения груза под управлением четвёртого, пятого и шестого правил из (6.53).

В методологическом плане предложенное решение соответствует многоальтернативным принципам многоуровневой передачи управления и разделения функций [226,227].

Проверка результатов синтеза проводилась на имитационной модели системы, структура которой представлена на Рисунке 6.22.

В качестве исполнительного механизма может быть использован электрический или гидравлический привод, создающий силовое воздействие на каретку.

Блоком пуска и останова является пульт управления оператора-человека, дающего команды на начало перемещения и останов груза.

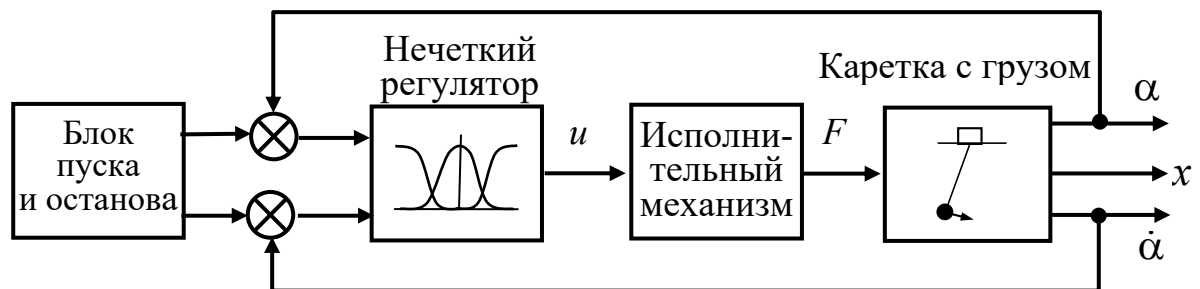


Рисунок 6.22 – Структурная схема системы нечёткого управления

Числовые параметры объекта: $m_1 = 100$ кг; $m_2 = 20 \dots 200$ кг; $L = 5$ м; $\mu = 0,0005$; $g = 9,81$ м/с², коэффициент передачи исполнительного механизма равен 1500.

Результаты проверки показаны на Рисунках 6.23, 6.24 для масс груза $m_2 = 200$ кг и $m_2 = 20$ кг соответственно.

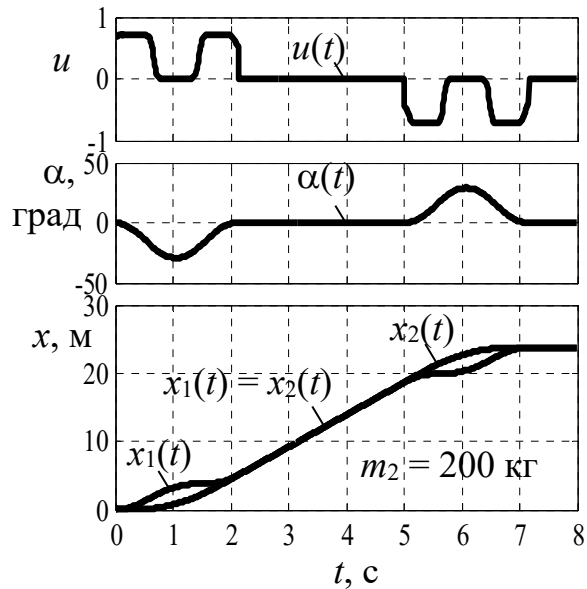


Рисунок 6.23 – Перемещение груза массой 200 кг

В начале движения груз под действием первого импульса управления однократно отклоняется от вертикальной оси ($\alpha < 0$) и отстаёт от горизонтального положения каретки ($x_2(t) < x_1(t)$). Характер движения груза после завершения первого импульса управления совпадает с его естественным движением, показанным на Рисунке 6.17.

Скорость груза постепенно растёт, и при $t > 1$ с превышает скорость каретки. Регулятор вырабатывает второй импульс управления так, чтобы скорость каретки сравнялась со скоростью груза. После выравнивания скоростей система «каретка-груз» продолжает плоскопараллельное движение относительно оси x без раскачивания.

В момент времени $t = 5$ с подана команда на останов, процесс которого полностью симметричен процессу пуска.

При уменьшении массы груза в 10 раз качественный характер его перемещения не изменился (команда на останов подана в момент времени $t = 4$ с). Это обстоятельство подтверждает ожидаемую грубость нечёткого управления.

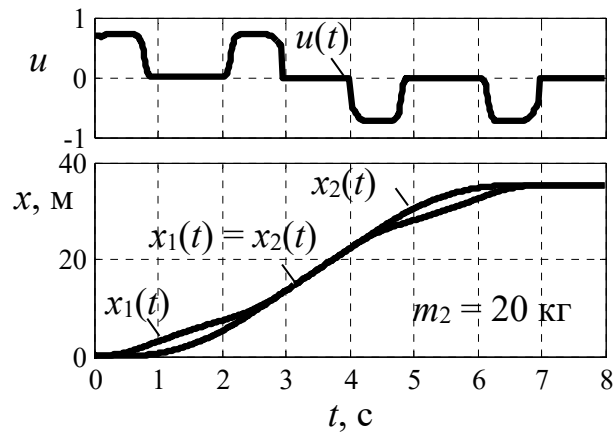


Рисунок 6.24 – Перемещение груза массой 20 кг

Скорость перемещения груза с уменьшением его массы растёт, и может управляться соответствующим изменением коэффициента передачи исполнительного механизма, создающую силу F . Для случая с $m_2 = 20$ кг установлен коэффициент передачи равный 1000.

Полученная форма управляющих воздействий указывает на тесную взаимосвязь синергетического подхода с оптимальным управлением по критерию наименьшей колебательности [111].

Представленные результаты решения задачи управления перемещением подвешенного груза позволяют сделать следующие выводы:

– рассматриваемый объект управления относится к объектам с несколькими степенями свободы и описывается нелинейными дифференциальными уравнениями с нестационарными коэффициентами, которые могут изменяться в процессе эксплуатации в широких пределах. Особенностью объекта является дефицит управляющих воздействий – при двух степенях свободы имеется один канал управления:

– перечисленные свойства объекта указывают на необходимость отказа от детерминированного подхода к его перемещению по заранее заданной фазовой траектории, и на целесообразность перехода к синергетическим принципам многоальтернативного управления. Такой переход позволяет при формировании управления в максимальной степени использовать собственные невозмущённые

траектории движения объекта с текущими значениями его нестационарных параметров;

– синергетический подход к поставленной задаче совместно с нечёткими процедурами принятия решений даёт возможность решить задачу синтеза управления без построения математической модели объекта, но основываясь исключительно на содержательном анализе его физических свойств;

– в соответствии с идеологией синергетического подхода полученный алгоритм регулирования по своей логической простоте и физической прозрачности приближается к эмпирически обоснованному управлению оператором-человеком;

– формируемый нечётким регулятором закон управления качественно близок к импульсному управлению, синтезированному на основе принципа максимума, но получен значительно более простыми средствами.

Выводы по главе 6

1. Приведённое сопоставление многоальтернативных принципов многоуровневости, многообразия, модульности и принципов синергетической теории управления указывает на их глубокое методологическое единство, объясняемое тем, что обе концепции обращаются к внутреннему содержанию процессов, характерных для функционирования открытых сложных систем и строят управление такими системами согласно с естественным содержанием этих процессов.

2. Рассмотрен пример синтеза системы управления самобалансирующимся роботом. Предложенный способ многоальтернативного управления этим объектом демонстрирует синергетические свойства полученной системы:

– обеспечивает декомпозицию системы на два канала управления верхнего и нижнего уровня и, как следствие, упростить алгоритмы их функционирования;

– позволяет осуществить связанное управление координатами работа не за счёт создания искусственных перекрёстных связей в регуляторе, а в результате

использования собственных, внутренних взаимосвязей между этими координатами в объекте;

– управление верхнего уровня обладает малой мощностью, и вызывает движение системы, обусловленное исключительно её собственными кинематическими свойствами.

3. Представленный синтез системы синергетического управления беспилотным летательным аппаратом методологически опирается на принципы многоальтернативности:

– принцип многообразия и разделения функций, проявляющийся здесь в том, что на основе анализа физического содержания математической модели объекта последний разбивается на модули (подсистемы), отражающие локальные динамические или кинематические взаимосвязи между группами координат. Поскольку размерность каждой подсистемы ниже общей размерности объекта, то каждый блок регулятора также имеет малую размерность;

– принцип многоуровневости алгоритма управления. Реализация этого принципа заключается в методике синтеза системы управления путём поочерёдного, последовательного аналитического решения задач управления каждой подсистемой объекта в отдельности, образующих иерархическую структуру взаимосвязей.

В практическом плане применение изложенного подхода позволило смягчить проклятие размерности решаемой задачи построения многомерного регулятора и использовать в ходе синтеза полную нелинейную модель объекта, не прибегая к её линеаризации.

4. Разработанная на основе синергетического подхода система многоальтернативного управления перемещением подвешенного груза даёт возможность:

– формировать управление, которое в максимальной степени использует собственные невозмущённые траектории движения объекта с текущими значениями его нестационарных параметров;

– решить проблему дефицита управляющих воздействий – при двух степенях свободы достаточно реализовать один канал управления;

– получить закон нечёткого управления качественно близкий к импульсному управлению, синтезированному на основе принципа максимума, но полученному значительно более простыми средствами.

В соответствии с идеологией синергетического подхода полученный алгоритм регулирования по своей логической простоте и физической прозрачности приближается к эмпирически обоснованному управлению оператором-человеком.

Основные материалы данной главы изложены в работах [53,226,227,230,233,234,240,243,410,411,414,416,423,429].

ГЛАВА 7. МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОСТИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

В этой главе рассмотрим многоальтернативные модели систем принятия решений: активные нейросетевые модели управления распределённой энергосистемой, модели с матричной репликацией, а также особый вид систем принятия решений, в которых многоальтернативный подход позволяет снизить априорную неопределённость задачи в результате последовательного накопления необходимого разнообразия вариантов решений

7.1 Активные нейросетевые модели

Построение интеллектуальных систем на основе нейронных сетей опирается на прямую аналогию между решаемыми этими системами задачами и мотивами высшей нервной деятельности живых организмов.

В классическом случае реализация указанной аналогии сводится, главным образом, к попыткам искусственного воспроизведения электрохимических процессов биологических нервных систем путём разработки различных моделей возбуждения и торможения элементарных нейронов и организации взаимосвязей между ними.

В традиционном виде нейросеть представляется функционалом [277,338,347,364,393]:

$$y_{j_N}(x) = F \left(\sum_{i_N} b_{i_N j_N} \cdot \dots \cdot F \left(\sum_{i_2 j_2} b_{i_2 j_2} \times F \left(\sum_{i_1 j_1} b_{i_1 j_1} x_{i_1 j_1} + c_{j_1} \right) + c_{j_2} \right) + \dots + c_{j_N} \right), \quad (7.1)$$

в котором: b, c – настраиваемые при обучении параметры сети; r – номер слоя; j_r – номер нейрона в слое r ; i_r – номер входа; N – количество слоёв; x, y – входные и выходные переменные; $x_{i_r j_r}$ – элемент i вектора x , подаваемый на нейрон j в слое r ; $F(b, c, x)$ – функция активации.

Формальным обоснованием использования таких нейросетей в общей теории принятия решений является теорема о полноте: любая непрерывная функция может быть асимптотически приближена функциями вида $y(x)$, если первая и вторая производные функции активации $F(b,c,x)$ также непрерывны [91,99,133,297].

Однако на практике указанных формальных оснований для искусственной реализации свойств биологических сетей оказалось недостаточно, и искусственным нейросетям вида (7.1) присущи принципиальные несоответствия их биологическому прототипу [332,334,381,388,447].

Эти несоответствия связаны, в первую очередь, с попыткой воспроизведения биологических процессов с помощью некоторого функционала с постоянной заданной структурой, перестройка которого производится только на самом низком – параметрическом уровне: сеть не способна к изменению своей структуры при обучении, т.е. пассивна.

Неспособность пассивной нейросети к изменению своей структуры приводит к возникновению у таких сетей недостатков, совершенно не свойственных их биологическим прототипам [370,389].

Наиболее важные из них [331,357,326]:

– проблема переобучения, заключающаяся в росте ошибки сети при предъявлении некоторого априорно неизвестного избыточного количества обучающих векторов. В естественных нейросетях элементы памяти обладают высокой избирательностью (селективностью), и характер запоминания носит накопительный характер, позволяющий сохранять без искажений старую информацию в сети практически в неограниченном объёме;

– низкие обобщающие свойства, устанавливающие между распознаваемыми ситуациями отношения «частное-общее», для чего сеть должна обладать развитой многоуровневой, иерархической структурой;

– отсутствие функциональной автономности элементов искусственных нейросетей, приводящее к нелинейному росту числа настраиваемых параметров с увеличением размерности задач, т.е. проявлению «проклятия размерности» при

обучении. В биологических нейросетях ограничений на вновь запоминаемую информацию не наблюдается.

Современные представления о биологических нервных системах [166,349,353,371,378,399,436,437] свидетельствуют о том, что для этих систем характерны принципы многоальтернативного строения и функционирования, основанные на многоуровневости структуры, разделении функций и модульности [219]:

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

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

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

Для искусственной реализации перечисленных свойств биологических нейросетей предлагается отказаться от попыток имитации работы биологической нервной системы на уровне процессов функционирования элементарных нейронов и перейти к воспроизведению информационной структуры хранения и обработки информации.

Для построения такой структуры может быть использован фасетный принцип классификации объектов (от фр. *la facette* – грань).

7.1.1 Модель фасетной организации памяти

Фасетный принцип классификации объектов заключается в том, что для каждого события формируется ансамбль (набор) $\{f, s\}$ признаков-фасетов f , совокупность значений s которых определяет собою конкретный объект $a(f,s)$,
Рисунок 7.1:

$$s = \{s^{f_1}, s^{f_2}, \dots, s^{f_p}\}, s^{f_i} = \{s_1^{f_i}, s_2^{f_i}, \dots, s_t^{f_i}\}, i = \overline{1, p}, \quad (7.2)$$

$$a \in A, |A|=z, f = \{f_1, f_2, \dots, f_p\}.$$

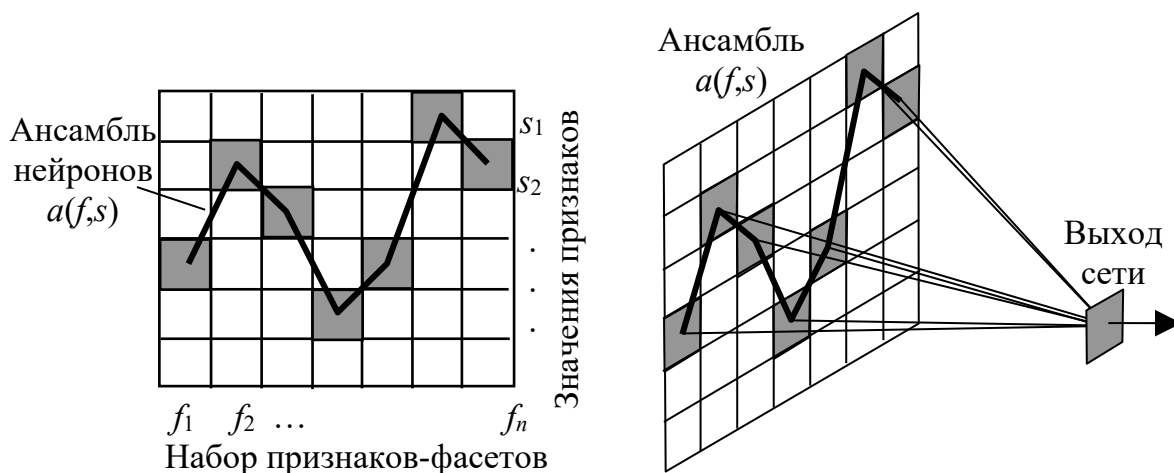


Рисунок 7.1 – Фасетная организация памяти в нейросети

Фасетный принцип хранения информации позволяет объединять различные объекты в сетевую структуру $A^i = a_1^i \cap a_2^i \cap \dots \cap a_z^i$ отдельно по каждому признаку f_i , при этом введение дополнительного признака или объекта не требует перестройки ранее имеющейся структуры, а лишь дополняет её новым ансамблем с соответствующими связями. Существенно, что при наличии нескольких признаков-фасетов f_i возможна иерархическая классификация объектов.

На Рисунке 7.2 представлена возможная структура нейронной сети фасетного типа с тремя иерархическими уровнями ансамблей $a(f,s)$ нейронов, которые могут возбуждаться или тормозиться от определённых рецепторов-фасетов f_i и от других ансамблей.

В частности, возбуждение рецепторов f_4, f_5, f_6 активирует ансамбль $a_{1,2}$, и далее, при отсутствии торможения со стороны ансамбля $a_{1,1}$, возбудится ансамбль $a_{2,1}$, который активируется не непосредственно от первичных рецепторов f , а при наличии предшествующей активации $a_{1,2}$.

Таким образом, в системе произойдёт последовательность управляемых событий, соответствующих ансамблям $a_{1,2}$ и $a_{2,1}$. В то же время возбуждение ансамбля $a_{2,1}$ при отсутствии торможения со стороны других ансамблей, например, $a_{2,2}$, $a_{2,3}$, приведёт к активации события $a_{3,1}$.

В результате, под действием внешнего воздействия $\{f_4, f_5, f_6\}$ сформировалась последовательность событий, соответствующая указанному возбуждению. Полученная последовательность возбуждённых ансамблей соответствует образу воздействия $\{f_4, f_5, f_6\}$, т.е. происходит распознавание этого образа.

Процедура обучения в фасетной нейросети включает в себя:

- добавление нового объекта в виде ансамбля значений признаков $a(f,s)_{z+1}$;
- включение каждого признака-фасета объекта в структуру связей сети.

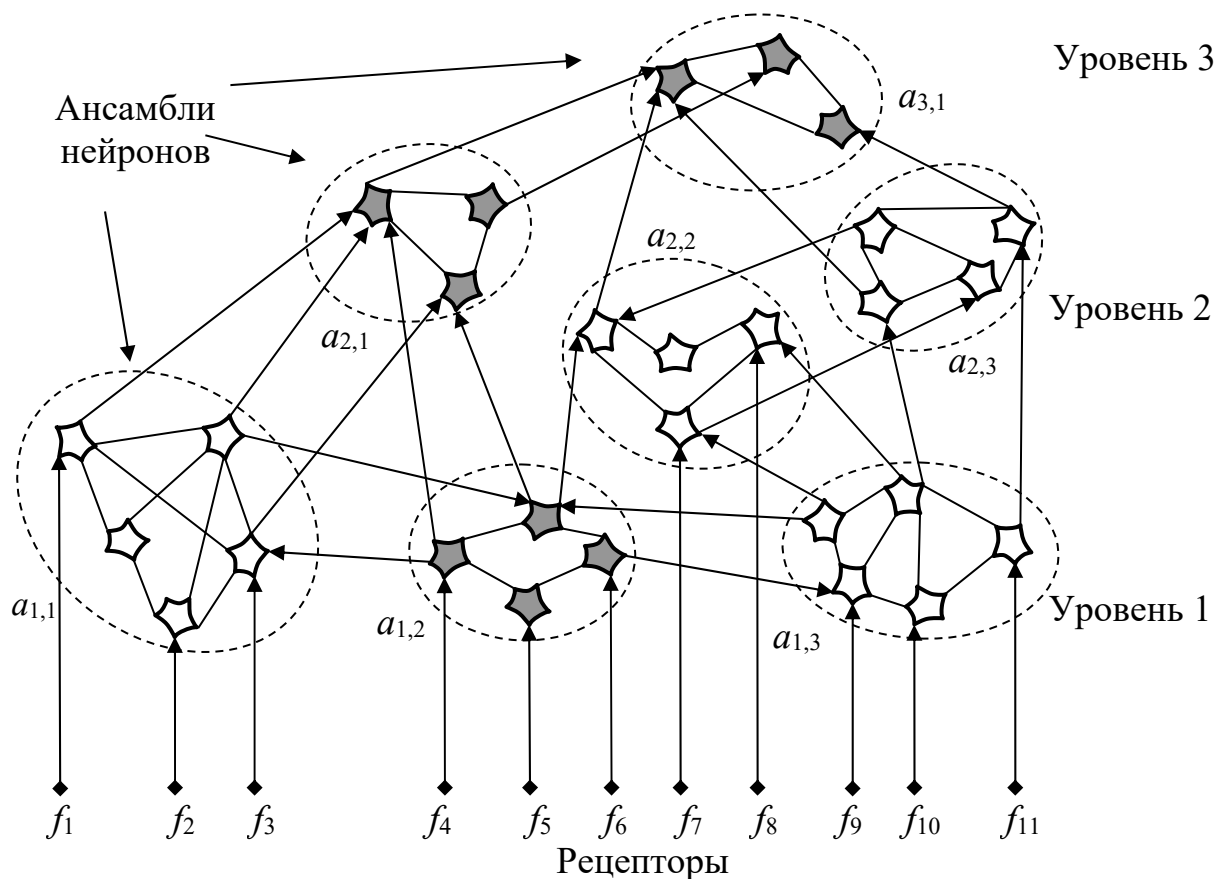


Рисунок 7.2 – Структура нейронной сети фасетного типа

При решении задач распознавания образов в фасетной нейросети возможны две ситуации:

1) в пределах одного фасета существует внутренняя иерархическая взаимосвязь между выбранным множеством объектов. В этой ситуации по степени близости объектов по рассматриваемому признаку строится генеалогическое дерево взаимосвязей между ними и определяется принадлежность объектов к той или иной ветви дерева;

2) требуется классифицировать объект по некоторой заданной совокупности признаков, причём значение некоторых признаков, по которым требуется произвести классификацию, неизвестно. В этом случае для построения генеалогического дерева необходимо предварительно задаться искусственной иерархией (последовательностью) признаков, в соответствии с которой и будет определена принадлежность распознаваемого объекта.

7.1.2 Модель управления распределённой энергосистемой

В качестве примера использования активной нейросети рассмотрим распределительную электрическую сеть, состоящую из входной высоковольтной подстанции и тридцати трансформаторных подстанций низкого напряжения, Рисунок 7.3 [64].

Примем, что кабели передачи электроэнергии, обозначенные штриховыми линиями, являются резервными и подключаются к системе при возникновении критических событий: перегрузках или выходе из строя основных питающих кабелей.

Для данной системы электроснабжения можно поставить задачу разработки нейросетевой модели принятия решений, обеспечивающей, при возникновении критического события, подачу команды на подключение соответствующей резервной линии.

Небольшая размерность поставленной задачи, определяемая числом подстанций $n = 30$, позволяет составить полный перечень критических ситуаций и

необходимых управлений и количественно анализировать работоспособность построенных вариантов нейросети при сокращении обучающей выборки, а также при одновременном возникновении нескольких критических событий. Номера этих событий с указанием номеров подстанций, соединяемых отказавшей линией, представлены в Таблице 7.1

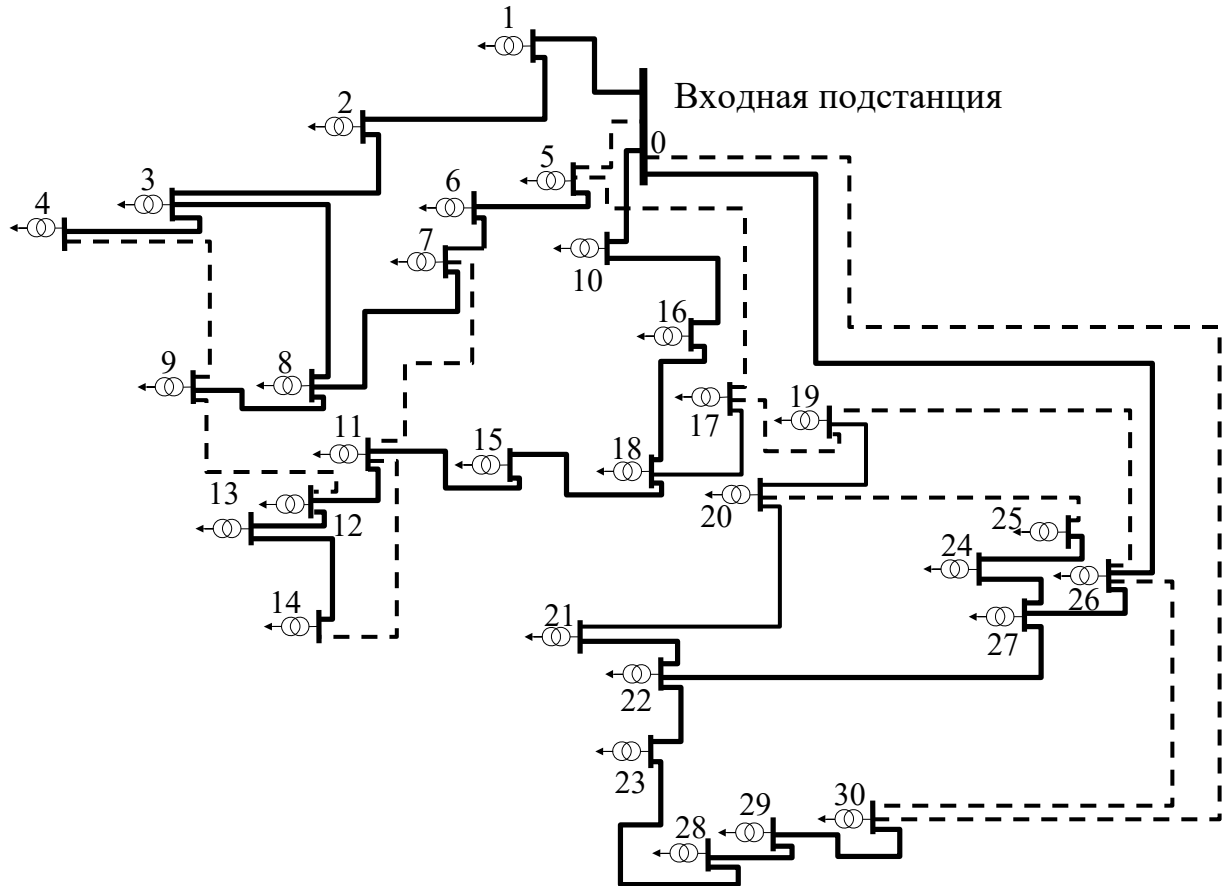


Рисунок 7.3 – Конфигурация электрической сети

Таблица 7.1 – Множество критических событий

Номер события	1	2	...	10	11	12	13	14	15	16	17	18	...	30
Номера подстанций	0-1	1-2	...	0-26	26-27	27-22	23-28	28-29	29-30	23-22	22-21	21-20	...	24-25

Нумерация резервных линий приведена в Таблице 7.2; перечень принимаемых решений (матрица решающих правил) – в Таблице 7.3.

Таблица 7.2 – Нумерация резервных линий

Номер резервной линии	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Номера подстанций	4-9	7-11	0-5	5-17	11-14	17-19	19-26	0-30	30-26	9-12	20-25

Таблица 7.3 – Фрагмент матрицы решающих правил

Номер события	Номера резервных линий										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
...
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Обучающая выборка представляет собою перечень из $z = 30$ критических ситуаций (событий), характеризующихся отключением нескольких подстанций из-за перегрузки или выходе из строя основных питающих линий.

Фрагмент обучающей выборки представлен в Таблице 7.4, полное число строк в которой равно количеству возможных критических событий, т.е. числу основных линий, а число столбцов – количеству подстанций. Единица в ячейке ij означает, что при возникновении критического события i подстанция с номером j будет обесточена.

Для рассматриваемой задачи перечень фасетов $f = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, $n = 30$, образует собою столбцы Таблицы 7.4 (номера обесточенных подстанций); число объектов-событий $z = 30$ – строки этой таблицы; количество значений каждого признака $t = 2$: $s^{f_i} = \{0;1\}$.

Графическая иллюстрация фасетной организации фрагмента сети представлена на Рисунке 7.4, на котором ансамбли нейронов F выполняют логическую операцию И. Нумерация нейронов соответствует номеру события из Таблицы 7.1.

Важной особенностью полученной модели является её структурная аналогичность модели объекта, т.е. структура модели отображает объектную среду.

Таблица 7.4 – Фрагмент обучающей выборки в виде матрицы критических событий

Номер события	Номера обесточенных подстанций																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...	22	23	24	25	26	27	28	29	30									
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	..	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	..	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	..	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	..	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	..	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
...								
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	..	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0								
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0								

Например, при выходе из строя основной линии 11-12 будут обесточены подстанции 12,13 и 14, что соответствует событию 26 (F_{26} на Рисунке 7.4) и принятию решения о включении резервной линии 10 (см. Рисунок 7.3). В то же время из Рисунка 7.3 следует, что частным случаем возникшей ситуации является

обесточенность подстанций 13 и 14. Этому случаю соответствует событие 27 и принятие моделью решения о включении резервной линии 5. Таким образом, использование модели приведёт к включению двух резервных линий с номерами 10 и 5. Анализ электрической схемы Рисунка 7.3 показывает, что при отказе основной линии 11-12 оба этих решения эквивалентны. Из этого следует, что построенная модель обладает обобщающими свойствами в той мере, в которой это позволяет структура объекта. Действительно, если при обучении сети будет предъявлена ситуация 20 (F_{20} на Рисунке 7.4), то этого окажется достаточным для правильного парирования не рассмотренных при обучении критических ситуаций 21,22,24,25,26,27,28, поскольку все они являются частными случаями общей ситуации 20. Отметим, что появление обобщающих свойств у фасетной нейросети обусловлено наличием в ней иерархических взаимосвязей, т.е. её многоуровневостью [407,408,426].

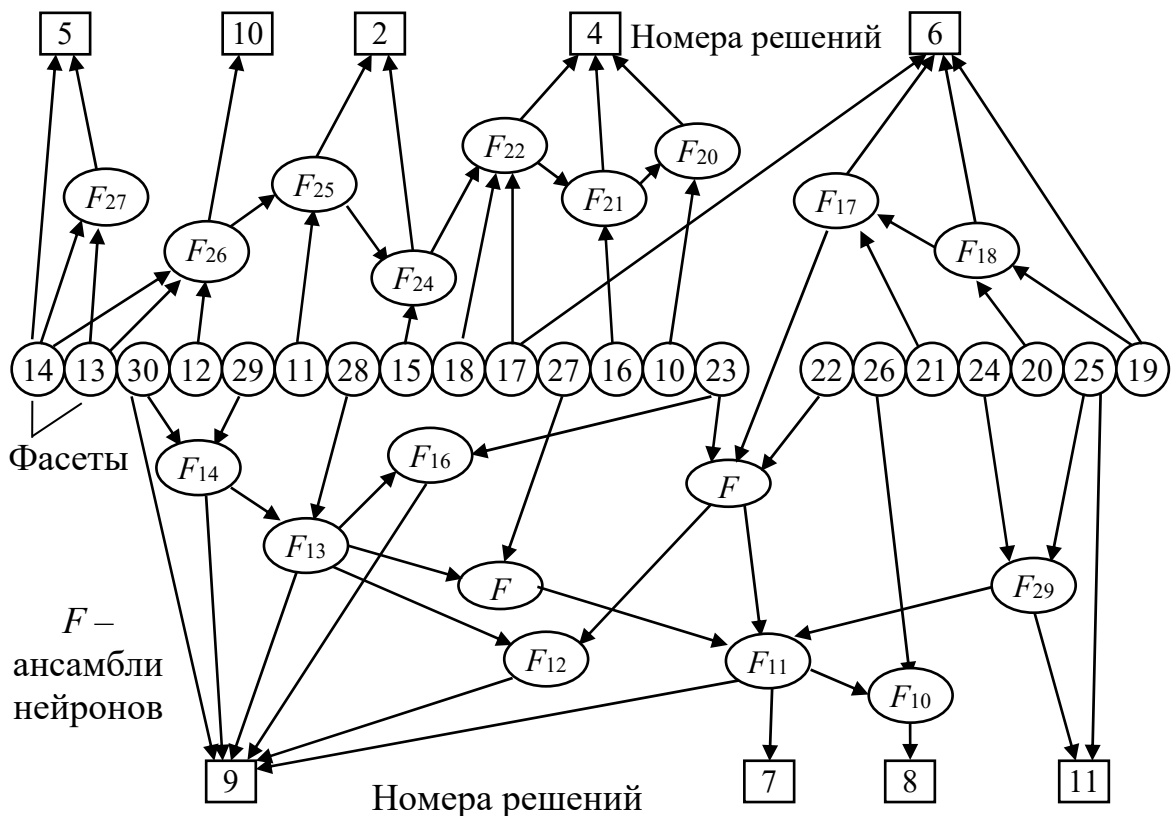


Рисунок 7.4 – Фасетная структура активной нейросети

Процедура обучения такой нейросети включает в себя: добавление нового объекта в виде ансамбля значений признаков $a(f,s)_{z+1}$ (строка $z+1$ в Таблице 7.4); включение каждого признака-фасета объекта в сетевую структуру этого признака.

При этом ранее сформированные взаимосвязи в сети не разрушаются, что исключает возможность появления в ней явления переобучения. Поскольку блочный характер обучения сводится к простому накоплению сведений о новых ситуациях, и не требует какой-либо многопараметрической оптимизации, то в сети сохраняются высокие избирательные свойства: для каждой аварийной ситуации вырабатывается одно решение с суперпозицией этих решений при одновременном возникновении нескольких отказов. Например, при одновременном возникновении событий 10 и 11 моделью будут выработаны решения 7,8 и 9, полностью восстанавливающие электроснабжение (см. Рисунок 7.3).

Иллюстрация изменения структуры модели при появлении в обучающей выборке новых событий приведена на Рисунке 7.5.

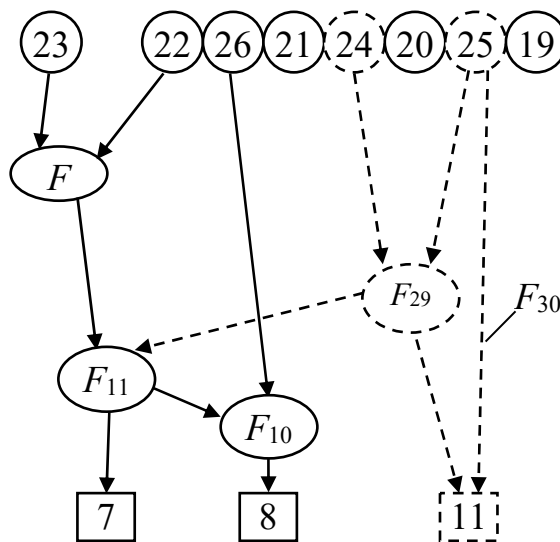


Рисунок 7.5 – Перестройка структуры при обучении новым событиями 29 и 30 (отключение подстанций 24, 25)

Рисунок 7.5 иллюстрирует накопительный характер обучения, полностью сохраняющий в нейросистеме сформированные ранее структурные связи.

Проектирование нейронных систем на основе эволюционных принципов многоальтернативности позволяет создавать активные нейромодели с перестраиваемой структурой, по своим свойствам в значительно большей степени приближающиеся к их биологическим прототипам:

иерархическая многоуровневая схема внутренних взаимосвязей в сети обеспечивает высокие обобщающие способности системы при принятии решений в ситуациях, не встречавшихся при обучении. В частности, ярко выраженную иерархическую структуру имеют весьма эффективные свёрточные нейросети [348];

модульность строения позволяет встраивать в структуру системы новые ансамбли нейронов, не встречая при этом ограничений «проклятия размерности» и эффекта переобучения;

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

7.1.3 Модель распознавания образов

Построим активную нейросетевую модель распознавания образов для задачи классификации объектов с не полностью известными признаками (набор признаков применим ко всем объектам, но значения некоторых признаков могут быть неизвестными).

Множество классифицируемых объектов показано на Рисунке 7.6 [237,425].

Описание геометрических объектов приведено с помощью следующих признаков:

- равенство всех сторон;
- наличие прямых углов;

- равенство всех углов;
- число сторон равно четырём;
- число сторон равно трём;
- белый цвет фигуры;
- площадь фигуры больше 1 ед.².

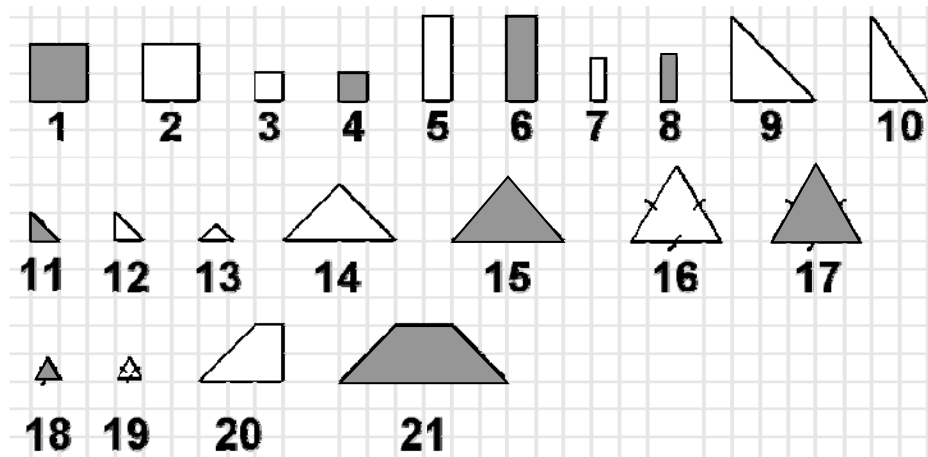


Рисунок 7.6 – Множество классифицируемых объектов

Каждый из признаков может принимать два значения: 1, если объект обладает этим признаком, 0 – в противном случае.

Такое описание выбранных фигур представлено в Таблице 7.5. При этом было принято, что значение признака «наличие прямых углов» для фигуры 2 неизвестно.

Зададимся последовательностью классификации таким образом, чтобы признак, значение которого для одного из объектов неизвестно, завершал иерархию классификации. Это позволит классифицировать объекты по всем известным значениям и максимально полно определить принадлежность распознаваемого объекта, несмотря на отсутствие информации о нем по одному из применяемых признаков классификации.

Применим следующую последовательность:

- б) белый цвет фигуры;
- 4) число сторон равно четырём;

- 7) площадь фигуры больше 1 ед.²;
- 5) число сторон равно трём;
- 1) равенство всех сторон;
- 3) равенство всех углов;
- 2) наличие прямых углов.

Таблица 7.5 – Набор признаков-фасетов для объектов

Номер объекта	Признаки						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	0	0	1
2	1	-	1	1	0	1	1
3	1	1	1	1	0	1	0
...
20	1	0	1	0	1	1	0
21	0	0	0	1	0	0	1

Построенное классификационное дерево изображено на Рисунке 7.7.

Этот рисунок отражает структуру фасетной нейросети на Рисунке 7.2. Каждый прямоугольник дерева представляет собою ансамбль значений признаков $a(f,s)$ (см. также Рисунки 7.1 и 7.2). Причём ансамбли первого иерархического уровня содержит все признаки-фасеты, ансамбль следующего уровня – на один признак меньше и т.д. до последнего известного признака. Последовательность возбуждённых ансамблей (на Рисунке 7.7 эти ансамбли обведены) создаёт искомый образ объекта. При введении в задачу нового признака существующая структура сети не разрушается, а дополняется новой ветвью классификационного дерева, т.е. сеть приобретает активный характер.

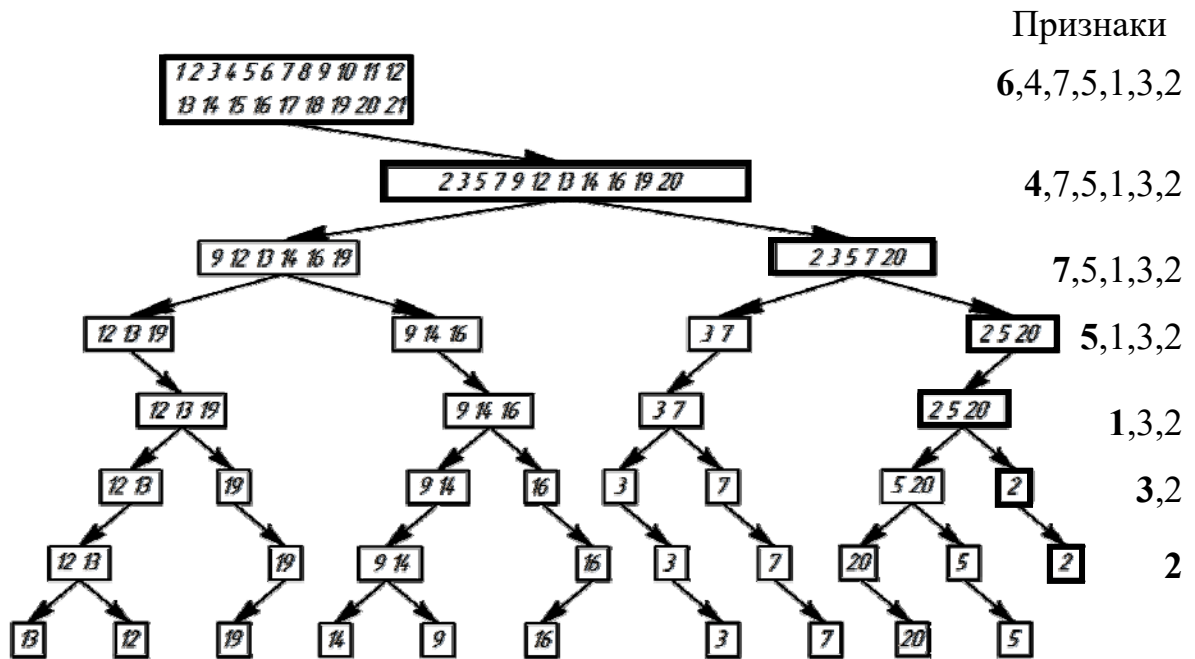


Рисунок 7.7 – Фрагмент классификационного дерева

Результат классификации показывает: несмотря на отсутствие информации о наличии прямых углов у второго объекта, по построенному дереву можно судить о том, что данная фигура относится к классу четырехугольников с равными углами, равными сторонами, цвет фигуры – белый, и площадь превышает значение 1 ед.². Заметим, что в рассмотренном случае из равенства углов в четырёхугольнике вытекает существование у фигуры прямых углов, т.е. первоначально неизвестный признак объекта может быть восстановлен в результате проведённой классификации по известным признакам.

Обсудим два основных свойства рассмотренной фасетной нейросети, приближающие её к свойствам биологических систем [326]: многоуровневость структуры и свойство активности, т.е. способность к структурной перестройке.

Своей принадлежностью к понятию «сеть» фасетная структура памяти обязана характером взаимосвязей между объектами распознавания и признаками-фасетами, который носит общепринятое название “многие ко многим”, Рисунок 7.8.

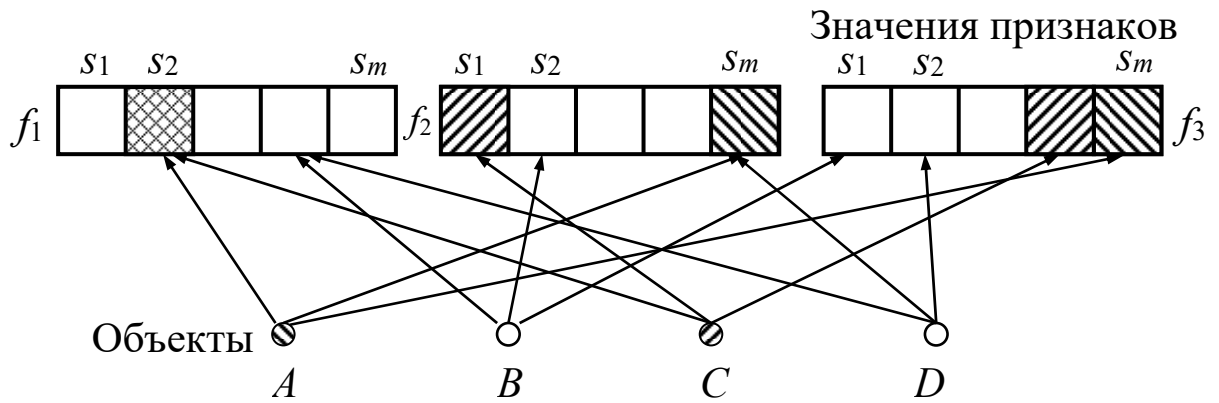


Рисунок 7.8 – Сетевая взаимосвязь между объектами и признаками-фасетами

В то же время структура взаимосвязей между самими фасетами содержит отношения «один ко многим», характерные для иерархических систем, которые в задачах классификации объектов оперируют категориями «частное – общее».

На Рисунке 7.9 показана такая взаимосвязь, показывающая, что объекты A и C относятся к одному классу по признаку f_1 , но к разным классам по признаку f_2 .

По признаку f_1 объекты A, C и B, D объединяются в различные классы, а по признаку f_2 в один класс попадают объекты A и D .

Такая иерархичность представлена также на Рисунке 7.7, который иллюстрирует более наглядную – бинарную классификацию объектов по геометрическим признакам.

Важно отметить, что вид многоуровневой структуры зависит от принятой очередности построения классификационного дерева, и определяется приоритетами признаков в задаче распознавания.

Тем не менее, для любой выбранной очередности результат распознавания будет определяться полученной структурой взаимосвязей, т.е. их уникальной последовательностью, аналогичной последовательности возбуждений ансамблей нейронов в биологической нервной системе.

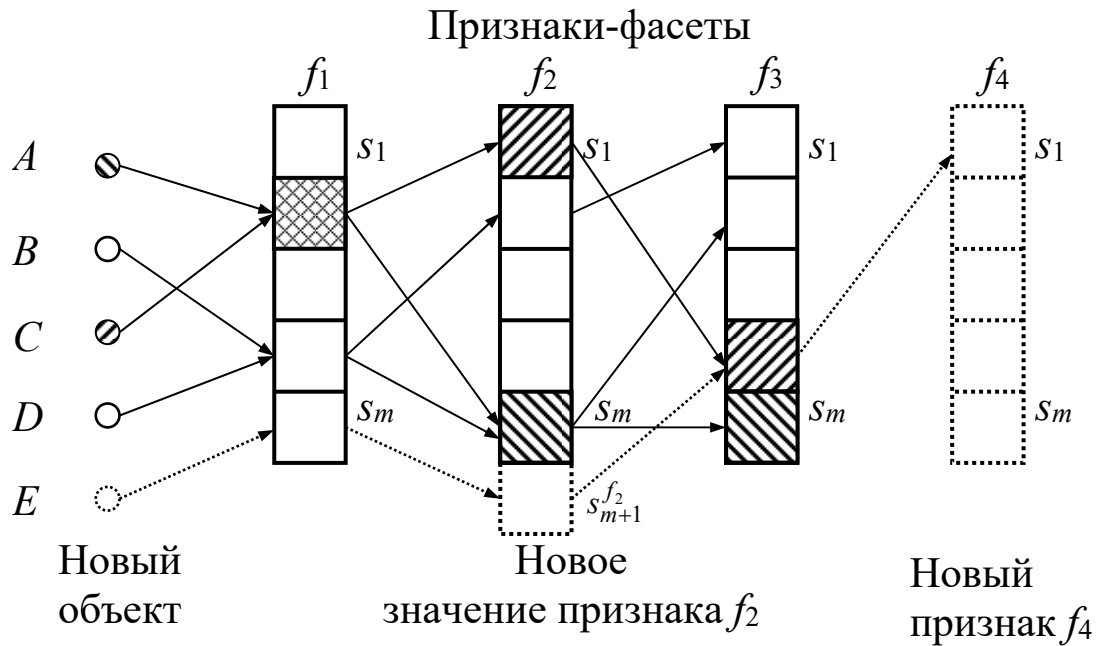


Рисунок 7.9 – Иерархические взаимосвязи между признаками-фасетами

Активность фасетной сети поясняется на Рисунке 7.9 введением нового объекта E , обладающего признаком f_4 , который отсутствовал у известных объектов A, B, C, D .

Кроме того, новый объект E может характеризоваться значением $s_{m+1}^{f_2}$, признака f_2 , также не встречавшимся ранее. Как следует из Рисунка 7.9, новый объект E встраивается в существующую структуру, расширяя и дополняя её без искажения имеющей системы связей.

7.2 Многоальтернативная модель оптимальной стратегии последовательного выбора

Многоальтернативность вариантов решения в ряде задач может непосредственно интерпретироваться как некоторое необходимое разнообразие этих решений, которое позволит с заданной вероятностью получить представление о свойствах исследуемого процесса. К таким задачам относятся, например, задача последовательного анализа и принятия решений, возникающая

при анализе статистических данных в реальном масштабе времени – обнаружение сигналов на фоне помех, распознавание кибернетических атак в информационных системах, текущий контроль качества изделий, управление финансовыми процессами и вложениями в инновации [43,266].

Оптимальная стратегия последовательного выбора в такой задаче подразумевает пошаговое рассмотрение или формирование очередного варианта решения (объекта) с накоплением полученной информации с целью продолжения процедуры поиска лучшего варианта, либо завершения этой процедуры в случае, если желаемый результат будет достигнут. Такое рассмотрение может носить необратимый, критический характер, т.е. рассмотренный, но отклонённый вариант решения теряется, и вернуться к нему невозможно.

Указанные задачи формулируются как задачи об оптимальной остановке [25,312,313,400]: какое количество k вариантов решений должно быть просмотрено и отклонено, чтобы с наибольшей вероятностью обеспечить нахождение глобально лучшего варианта при продолжении поиска до его остановки – появления решения, лучшего, чем во всей выборке k .

Иными словами: каково оптимальное разнообразие начальной выборки вариантов, которое бы позволило завершить поиск с наибольшей вероятностью попадания в глобальный экстремум.

С методологической точки зрения накопление некоторого первоначального разнообразия вариантов решений является предварительным этапом сбора информации об исследуемой системе.

Детализируем постановку задачи.

Пусть известно общее количество n возможных вариантов решений. Первоначально последовательно с равной вероятностью анализируются k вариантов решений с соответствующими значениями целевой функции Q_i , $i = 1, \dots, k$; $k < n$. Далее рассмотрение новых вариантов решений продолжается до некоторого заранее неизвестного варианта с номером m , для которого выполнится неравенство $Q_m \succ Q_{1, \dots, k}$. Этот вариант принимается в качестве лучшего решения задачи, и поиск останавливается.

Если такой вариант m не встретится, то поиск завершается при достижении заданного количество шагов n . При этом окончательным вариантом решения будет вариант с номером n .

Требуется найти значение k , обеспечивающее максимальную вероятность того, что найденное решение является наилучшим из всех n вариантов.

Для решения этой задачи применяется анализ однородных цепей Маркова с использованием переходных вероятностей, а также идеи динамического программирования [97,336].

Ниже будет рассмотрен более компактный способ решения, основанный на прямом пошаговом анализе вероятностей появления событий и использовании свойств гармонического ряда [41,232].

Вероятность p_1 того, что первый выбранный вариант окажется лучшим из всей последовательности n , равна $p_1 = 1/n$. Из этого следует, что если первый предъявленный вариант был отвергнут, то вероятность попадания лучшего варианта в оставшуюся часть последовательности равна

$$p_{2\dots n} = 1 - \frac{1}{n} = \frac{n-1}{n} \gg \frac{1}{n}, \quad (7.3)$$

и целесообразно начать процедуру выбора лучшего варианта, начиная, например, со второго, сравнивая его с лучшим из пропущенных, т.е. в данном случае с первым, т.е. принять $k = 1$.

Вероятность $p_{1,2}$ того, что первый или второй варианты окажутся лучшими из всей последовательности n :

$$p_{1,2} = \frac{1}{n} + \frac{1}{n} = \frac{2}{n}, \quad (7.4)$$

при этом вероятность $p_{2>1}$ того, что вариант 2 лучше варианта 1 равна $p_{2>1} = 1/2$.

В результате, вероятность того, что при данной стратегии $k = 1$ будет выбран вариант 2, и он окажется лучшим из всей последовательности n :

$$p_{2,k=1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{n}. \quad (7.5)$$

Если в результате сравнения вариант 2 не лучше варианта 1, то с вероятностью $1 - p_{2>1} = 1/2$ переходим к анализу 3-го варианта, для которого получим $p_{3>1,2} = 1/3$, $p_3 = 3/n$ и

$$p_{3,k=1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{3}{n}, \quad (7.6)$$

и т.д. до n -го, последнего варианта.

Вероятность рассмотрения n -го варианта $p_{1>2,3,\dots,n-1} = 1/(n-1)$. Поскольку n -й вариант последний, то его не сравнивают с вариантом 1, а принимают в качестве окончательного решения, с вероятностью того, что оно лучшее, $p_n = 1/n$.

Таким образом, с помощью рассмотренной стратегии с $k=1$ будет найден вариант решения, для которого вероятностью $p_{k=1}$ того, что он окажется лучшим из всей последовательности n , равна:

$$p_{k=1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{n} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{3}{n} + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{4}{n} + \dots + \frac{1}{n-1} \cdot \frac{1}{n} = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n-1} \right). \quad (7.7)$$

Аналогичные рассуждения для стратегии $k=2$ с двумя первоначально пропускаемыми вариантами приводят к выражению:

$$p_{k=2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{3}{n} + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{4}{n} + \frac{2}{4} \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{5}{n} + \dots + \frac{2}{n-1} \cdot \frac{1}{n} = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{2}{3} + \frac{2}{4} + \dots + \frac{2}{n-1} \right), \quad (7.8)$$

из которого по индукции получаем вероятность выбора лучшего варианта из всей последовательности n для стратегии с k первоначально пропущенными вариантами:

$$p_k = \frac{1}{k+1} \cdot \frac{k+1}{n} + \frac{k}{k+1} \cdot \frac{1}{k+2} \cdot \frac{k+2}{n} + \frac{k}{k+2} \cdot \frac{1}{k+3} \cdot \frac{k+3}{n} + \dots + \frac{k}{n-1} \cdot \frac{1}{n} = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{k}{k+1} + \frac{k}{k+2} + \dots + \frac{k}{n-1} \right) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1-k} \frac{k}{k+i}, \quad (7.9)$$

где $0 < k < n$.

Зависимости $p_k(k)$ для $n = 5$ и $n = 10$ приведены на Рисунке 7.10, анализ которого указывает на экстремальный характер функции $p_k(k)$. Определим оптимальную стратегию k^* , доставляющую максимум вероятности $p_{k,\max} = p_{k^*}$ выбора лучшего варианта для произвольного числа предъявляемых вариантов n .

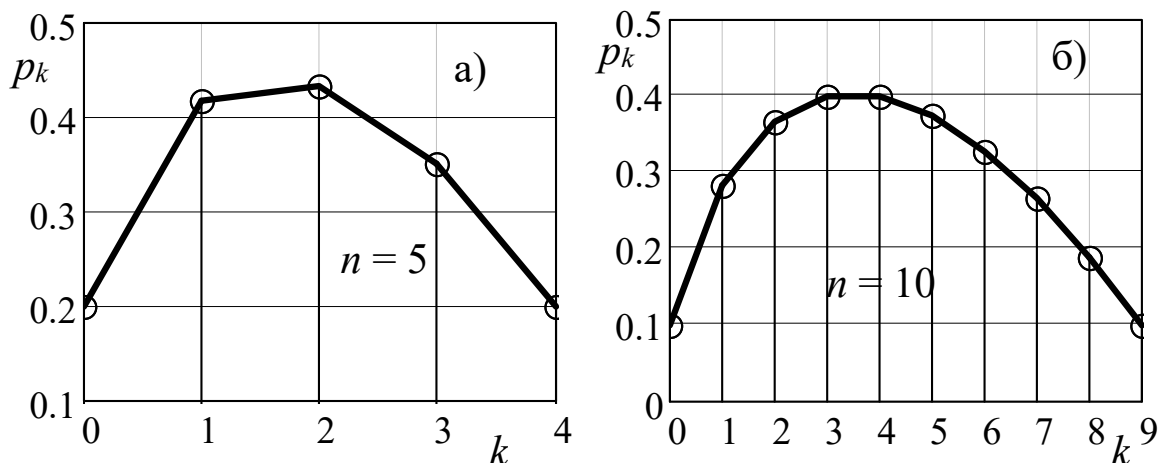


Рисунок 7.10 – Изменение вероятности выбора лучшего варианта в зависимости от стратегии k : а) для $n = 5$; б) для $n = 10$

Перепишем выражение (7.9) в виде:

$$p_k = \frac{k}{n} \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k+1} + \frac{1}{k+2} + \dots + \frac{1}{n-1} \right), \quad (7.10)$$

указывающем на возможность представления его разностью двух гармонических рядов:

$$p_k = \frac{k}{n} \left[\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{k-1} + \frac{1}{k} + \dots + \frac{1}{n-1} \right) - \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{k-1} \right) \right] = S_n(k). \quad (7.11)$$

Для вычисления частной суммы гармонического ряда $S_n(k)$ воспользуемся содержанием постоянной Эйлера-Маскерони [123]:

$$C = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n \right), \quad (7.12)$$

из которого для достаточно больших n вытекает:

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = \ln n - C + \varepsilon, \quad (7.13)$$

где ε – остаток ряда, уменьшающийся с ростом n .

Тогда, для рассматриваемой задачи получим:

$$S_n(k) = \frac{k}{n} [\ln(n-1) - \ln(k-1)] = \frac{k}{n} \ln \frac{n-1}{k-1}. \quad (7.14)$$

Дифференцируя $S_n(k)$ по k и используя необходимое условие существования экстремума:

$$\frac{dS_n(k)}{dk} = \frac{1}{n} \left(\ln \frac{n-1}{k-1} - \frac{k}{k-1} \right) = 0, \quad (7.15)$$

приходим к равенству:

$$e^{\frac{k}{k-1}} = \frac{n-1}{k-1}, \quad (7.16)$$

или, для $n \gg 1$ и $k \gg 1$, $e \approx n/k$:

$$k^* \approx \frac{n}{e}. \quad (7.17)$$

Значения k^* для некоторых n представлены в Таблице 7.6.

Таблица 7.6 – Значения k^* оптимальных стратегий последовательного выбора

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
k^*	1	1	1	2	2	2	3	3	3	5

Искомая вероятность $p_{k,\max}$ определится предельным значением:

$$p_{k,\max} = p_{k^*} = S_n(k^*) = \frac{1}{e} \ln e = \frac{1}{e} = 0,368, \quad (7.18)$$

ограничивающим $p_{k,\max}$ снизу, Рисунок 7.11.

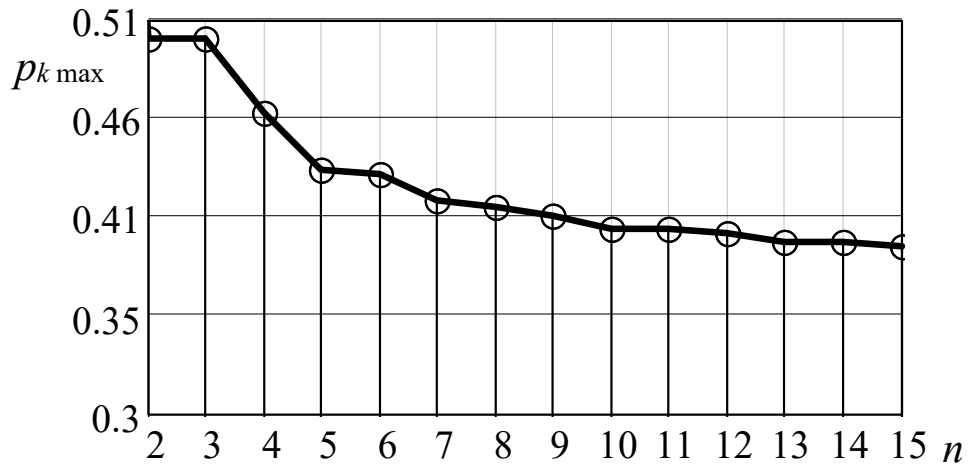


Рисунок 7.11 – Изменение вероятности $p_{k, \max}$ выбора лучшего варианта при оптимальной стратегии k^* в зависимости от n

Численная проверка $p_{k, \max}$ для $n = 2 \dots 15$, представленная на Рисунке 7.11, подтверждает результаты аналитического решения.

7.3 Эволюционные модели с матричной репликацией

Хорошо известные в настоящее время генетические алгоритмы решения оптимизационных задач [31,262] воспроизводят эволюцию видов с использованием доминирующего механизма скрещивания, подчиняющегося закону расщепления родительских признаков Г. Менделя [152]. Высокая степень избирательности этого механизма, выражающаяся во всё возрастающей частоте порождения себе подобных, обеспечивает быстрое вытеснение неконкурентоспособных особей из популяции, и сопровождается снижением его эволюционной пластичности.

Это обстоятельство с прикладной точки зрения (теории принятия решений) предопределяет низкую вероятность завершения поиска в глобальном экстремуме, особенно в тех случаях, когда этот экстремум располагается изолированно в области определения функции цели, Рисунок 7.12.

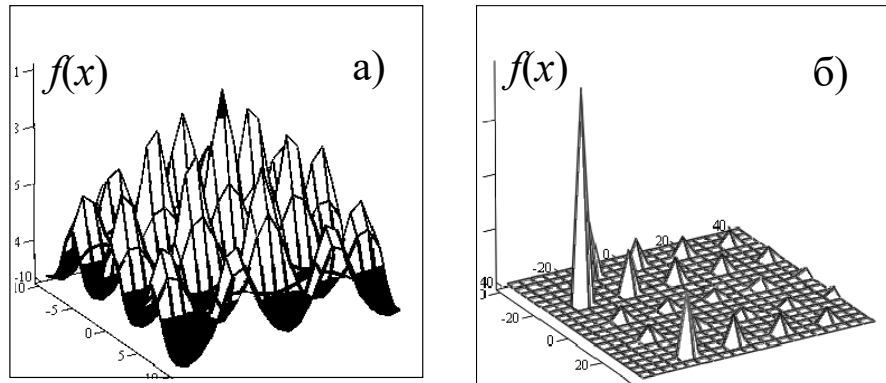


Рисунок 7.12 – Примеры расположения глобальных экстремумов: а) со шлейфом локальных экстремумов; б) изолированное

Целеустанавливающая роль термина «поиск» в задачах оптимизации постепенно привела к подмене методологической сущности генетических алгоритмов: процесс создания нового уровня организации системы стал рассматриваться как процесс его обнаружения в многомерном пространстве её состояний. Эта подмена, незаметная на уровне элементарных алгоритмических процедур, приводит к неверной оценке возможностей генетических алгоритмов в плане достижения единичных наилучших решений.

Действительно, целенаправленный отбор имеющейся информации из шума, эквивалентный поиску единственного наилучшего варианта в их колоссальном многообразии во многомерных задачах, не оставляет практически никаких надежд на успешное его завершение в глобальном экстремуме [52,83,110,438]. Включение в алгоритм поиска механизма мутаций смягчает остроту этой проблемы только в задачах низкой размерности.

Проведённый количественный анализ сходимости этих процедур к глобальному экстремуму на тестовых NP-полных задачах квадратичного программирования $tail$, $n = 12...20$ [443,444] показал, что результативность генетического алгоритма по мере роста размерности n задачи очень быстро снижается.

На Рисунке 7.13 показано, что с увеличением n примерно в два раза (с $n = 12$ до $n = 20$) многообразие M вариантов решения возрастает с $M = 12! = 4,79 \cdot 10^8$ до $M = 20! = 2,433 \cdot 10^{18}$, и процентное содержание поисков, завершающихся нахождением глобального экстремума, снижается со 100% до 2...5%.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что механизмы генетического скрещивания и мутаций не эффективны при решении задач с изолированным глобальным экстремумом.

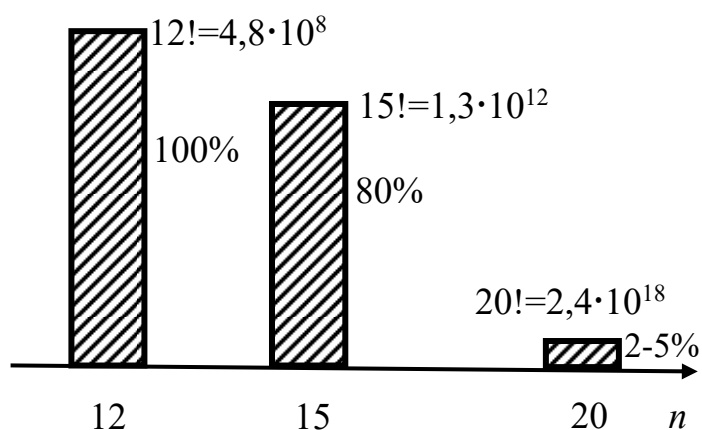


Рисунок 7.13 – Сравнение процентных долей поисков, завершившихся нахождением глобального экстремума задач tai_{12a} , tai_{15a} , tai_{20a}

В связи с этим, в качестве биологической аналогии решения NP-полной задачи предлагается рассмотреть довидовый этап возникновения жизни, т.е. процесс создания простейших живых организмов, отличающийся очень низкой вероятностью их возникновения.

Воспользуемся гипотезой М. Эйгена [317,318] о том, что формирование добиологических макромолекул происходит не в результате скрещивания, а путём последовательного своего наращивания элементарными блоками по принципу сигнатуры (самоинструкции) – свойства, возникающего в уже сформированной части макромолекулы. Указанный способ построения сложных образований из простых элементов называют матричной репликацией.

Сформулируем основные свойства матричной репликации [51]:

- исходным элементом для построения макромолекулы является матрица – относительно простая молекула, которая обладает различной степенью взаимодействия со свободными структурами;
- формирование макромолекулы происходит случайным, но преимущественным подсоединением тех свободных структур, которые имеют бóльшую степень взаимодействия с матрицей;
- процессе формирования молекул из различных матриц во времени или пространстве разделён, и не подвержен внутривидовой конкуренции.

Для реализации перечисленных свойств матричной репликации при поиске комбинаторного экстремума рассмотрим следующие процедуры [49,50,241,430]:

1) Формирование некоторого множества матриц репликации.

Пусть генетическая модель задачи (хромосома) имеет n локусов с общим количеством $n!$ вариантов их заполнения генами, имеющими условные номера $1, \dots, n$.

Тогда матрицы репликации можно сформировать двумя способами.

Способ равновероятного формирования: в качестве матрицы выбирается любое число $r < n$ локусов $\underline{h_i^j}$, $i = 1, \dots, n - 1$, $j = 1, \dots, r$, которые могут занимать в хромосоме произвольные r мест с общим количеством вариантов, равным количеству сочетаний C_n^r без повторений, Рисунок 7.14:

$$C_n^r = \frac{n!}{r!(n-r)!}. \quad (7.19)$$

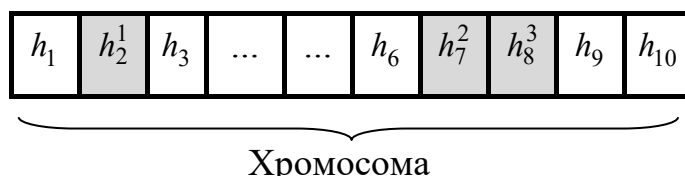


Рисунок 7.14 – Иллюстрация одного варианта расположения трёхместной матрицы в хромосоме, $n = 10$, $r = 3$

В каждом варианте расположения r локусов может быть без повторений размещено r генов из их общего числа n . В результате будет получено A_n^r матриц:

$$A_n^r = \frac{n!}{(n-r)!} = n(n-1)\dots(n-r+1). \quad (7.20)$$

Всего r -мерных матриц будет сформировано P :

$$P(r, n) = C_n^r A_n^r. \quad (7.21)$$

Например, для $n = 10$ и $r = 2$ получим: $C_n^r = 45$; $A_n^r = 90$; $P = 4050$.

Для каждой матрицы число T вариантов расположения оставшихся $(n-r)$ генов составляет $T(r, n) = (n-r)! = 40320$. Общее количество вариантов хромосом:

$$S(r, n) = P(r, n)T(r, n) \quad (7.22)$$

Для данного примера получим значение $S(2, 10) = 4050 \cdot 40320 \approx 163 \cdot 10^6$.

Заметим, что исходное многообразие вариантов решения определяется выражением $M(n) = n! = 10! = 3\,628\,800 \approx 3,6 \cdot 10^6$, что значительно меньше $S(2, 10) \approx 163 \cdot 10^6$.

Сравнительная оценка величин C_n^r , $P(r, n)$, $S(r, n)$, $T(r, n)$ для $n = 10$ показана на Рисунке 7.15.

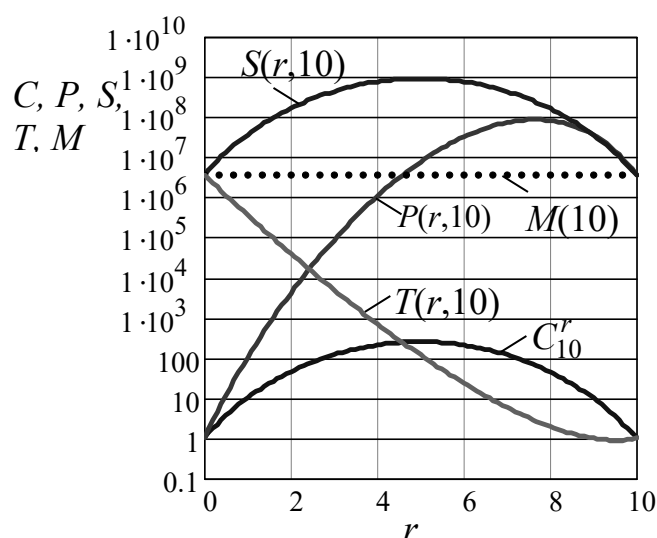


Рисунок 7.15 – Сравнение величин C_{10}^r , $P(r, 10)$, $S(r, 10)$, $T(r, 10)$, $M(10)$

Качественное соотношение C_n^r , $P(r,n)$, $S(r,n)$, $T(r,n)$ сохраняется при любых n .

Способ приоритетного формирования основан на том свойстве матричной репликации, которое обеспечивает не равновероятное подсоединение новых структур к уже имеющейся части макромолекулы, а с приоритетом по степени их взаимодействия. В качестве количественной меры степени взаимодействия может быть использована частота встречаемости тех или иных групп одинаково заполненных локусов в результатах предварительного проведения поиска классическим генетическим алгоритмом. Эти группы локусов целесообразно выбрать в качестве матриц репликации. При таком способе формирования матриц репликации в одной хромосоме может образоваться несколько матриц различной длины.

Практические приёмы приоритетного выделения матриц репликации представлены в данном разделе ниже.

2) Поиск решения для каждой сформированной матрицы.

Если матрицы сформированы по равновероятному способу, то одна матрица из P обязательно принадлежит оптимальной хромосоме, т.е. глобальному экстремуму. Отсюда следует, что проведя P независимых поисков решения, мы исследуем всю область определения функции цели, включая домен, в котором расположен глобальный экстремум. Каждый поиск проводится классическим генетическим алгоритмом с той особенностью, что во всех особях каждой популяции присутствует выбранная матрица репликации, т.е. занятые ею локусы не изменяют своего содержания. Из этого следует, что размерность задачи в каждом независимом поиске уменьшена на r , т.е. многообразие вариантов в каждом поиске снижается в $\frac{n!}{(n-r)!}$ раз, (линия $T(r,10)$ на Рисунке 7.15).

Количество P матриц репликации зависит от r и имеет экстремальный характер с максимумом при $r = 0,5n$ (линия $P(r,10)$ на Рисунке 7.15). В результате общее многообразие вариантов решения задачи $S(r,n) = P(r,n)T(r,n)$ всегда превышает исходное количество вариантов $M(n)$, Рисунок 7.15. Этот вывод

означает, что общая мощность множества решений задачи с использованием матриц репликации возрастает. Например, для $n = 10$ и $r = 2$ имеем: $M(10) \approx 3,6 \cdot 10^6$, а $S(2,10) \approx 163 \cdot 10^6$, т.е. общее число вариантов увеличилось примерно в 40 раз. Однако поиск решения производится не на многообразии $S(r,n)$, а разбит на P независимых поисков с мощностью множества решений, уменьшенной в $(n - r)!$ раз. И, поскольку одна из матриц репликации обязательно принадлежит решению с глобальным экстремумом, то в соответствии с гипотезой М. Эйгена вероятность “выращивания” на этой матрице наилучшей хромосомы значительно возрастает. В частности, в работах [51,52] показано, что введение матричной репликации в 5-10 раз увеличивало частоту нахождения глобального экстремума генетическим алгоритмом. Аналогичные результаты получены и в рассматриваемом ниже примере решения NP-полной задачи.

Выбор длины r матриц репликации зависит от конкретной задачи, и определяется степенью изолированности глобального экстремума. В том случае, если глобальный экстремум предположительно сопровождается шлейфом локальных экстремумов, целесообразно применять малые значения r , обеспечивающие выполнение неравенства $P(r,n) \ll T(r,n)$, т.е. доминирующую роль в ходе поиска будут играть механизмы скрещивания и мутаций. При изолированном расположении глобального экстремума предпочтение следует отдавать значениям r , при которых $P(r,n) \gg T(r,n)$ с доминирующим влиянием матриц репликации. В неопределённых случаях первоначальный выбор r целесообразно осуществлять по условию:

$$r = \max\{r : P(r,n) < T(r,n)\}, \quad (7.23)$$

т.е. следует выбирать максимальный размер матрицы, обеспечивающий многообразие свободной части хромосомы большее, чем многообразие самих матриц, см. Таблицу 7.7.

Таблица 7.7 – Выбор длины r матрицы репликаций

n	r	$P(r,10)$	$T(r,10)$
10	1	$1.00 \cdot 10^2$	$3.63 \cdot 10^5$
10	2	$4.05 \cdot 10^3$	$4.03 \cdot 10^4$
10	3	$8.64 \cdot 10^4$	$5.04 \cdot 10^3$
10	4	$1.06 \cdot 10^6$	$7.20 \cdot 10^2$
...
20	1	$4.00 \cdot 10^2$	$1.22 \cdot 10^{17}$
20	2	$7.22 \cdot 10^4$	$6.40 \cdot 10^{15}$
20	3	$7.80 \cdot 10^6$	$3.56 \cdot 10^{14}$
20	4	$5.63 \cdot 10^8$	$2.09 \cdot 10^{13}$
20	5	$2.88 \cdot 10^{10}$	$1.31 \cdot 10^{12}$
20	6	$1.08 \cdot 10^{12}$	$8.72 \cdot 10^{10}$
...

Из Таблицы 7.7 следует, что, например, при $n = 10$ условию (7.23) удовлетворяет значение $r = 2$, а при $n = 20$ – значение $r = 5$.

В способе приоритетного формирования матриц последние не охватывают всю область определения функции цели. Поэтому в текущих популяциях допускается присутствие особей, не содержащих матрицы.

Важно отметить, что программный поиск решения для каждой матрицы удобно реализовать в виде независимых параллельных вычислений.

3) Отбор лучшего решения сводится к просмотру результатов P независимых поисков и отбору одного или нескольких конкурентоспособных вариантов решения.

Перейдём к практическим примерам применения матричной репликации в комбинаторных задачах оптимизации.

7.3.1 Квадратичная задача о назначениях

Для проверки работоспособности алгоритма с матричной репликацией использовалась тестовая квадратичная задача о назначениях $ta120a$ с заранее известной величиной глобального экстремума. Эта задача решалась двумя алгоритмами:

- типовой генетический алгоритм с генной мутацией одной пары генов в популяции из 6000 особей и формированием новой популяции такого же объёма из лучших родителей и мутантов;

- генетический алгоритм с матричной репликацией одной пары генов в 116280 особях и последующим отбором лучшего варианта отдельно в каждой последовательности.

Кроме того, были исследованы варианты решений с одновременным использованием генной и хромосомной мутаций, где случайным образом реверсировалось расположение нескольких смежных генов, количество которых также выбиралось случайным на каждом шаге эволюции.

Для сопоставимости результатов численного эксперимента число повторений E алгоритма без репликации выбрано таким, чтобы общее количество особей, участвующих в эксперименте, для обоих алгоритмов было примерно одинаковым: $|P|_{r=0} \cdot E = 6000 \cdot 40 = 240000 \approx |P|_{r=4} \cdot 2 = 116280 \cdot 2$, т.е. алгоритм без репликации повторялся 40 раз для популяции объёмом 6000 особей, а алгоритм с репликацией осуществил двукратную индивидуальную эволюцию для 116280 особей.

Результаты решения представлены в Таблице 7.8 и подтверждают высокую результативность применения механизма матричной репликации в задачах достижения глобального экстремума.

Таблица 7.8 – Сравнительные результаты решения задачи tai20a различными генетическими алгоритмами

Вариант алгоритма с числом шагов $N=3000$	Количество эволюций, завершившихся формированием глобального экстремума		
	Генные мутации	Генные и хромосомные мутации	Генные мутации с фиксированной матрицей
Без репликации $ P _{r=0}=6000, E=40$	1	2	-
С репликацией $ P _{r=4}=116280, E=2, r=4,$	8	11	1

7.3.2 Задача коммивояжера

Рассмотрим классическую задачу коммивояжера на практическом примере выбора кратчайшего маршрута сверления печатной платы с большим количеством отверстий.

Воспользуемся образцом платы, представленным на Рисунке 7.16.

Плата содержит 99 отверстий. Размеры платы указаны в миллиметрах.

Требуется найти кратчайший замкнутый маршрут их сверления.

Начало маршрута должно совпадать с его концом для того, чтобы станок мог начать сверление очередной платы без предварительного начального перемещения сверла.

Типовой генетический алгоритм для решения этой задачи содержал только процедуры мутации и отбора.

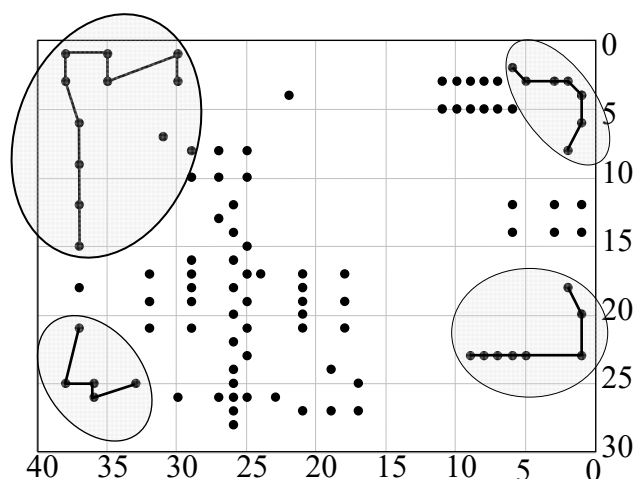


Рисунок 7.16 – Образец платы для построения оптимального маршрута сверления отверстий

Размер популяции составлял 2000 особей, каждый поиск был ограничен по длительности 1000 циклами эволюции.

Пятисоткратное повторение поиска привело к определению нескольких близких маршрутов длиной $L = 261 \dots 264$ мм.

В результате анализа этих конкурентоспособных вариантов решения были выявлены часто встречающиеся локусы, выделенные на Рисунке 7.14. Эти локусы были использованы в качестве матриц репликации, и все четыре матрицы одновременно введены в исходный генетический алгоритм. Размерность задачи при этом снижается с $n = 99$ до $n = 99 - 26 = 73$.

После примерно пятидесяти повторений поиска были найдены значительно лучшие варианты решений с длинами маршрутов $L = 232$ мм и $L = 236$ мм, Рисунки 7.17а,б.

Дальнейшие многократные повторения поиска этот результат не изменили.

Найденные решения существенно отличаются по своей топологии в центральной части, с наиболее плотным расположением отверстий, но разница в их длине составляет всего 2%. Это указывает на наличие в рассматриваемой задаче, по меньшей мере, двух изолированных экстремумов.

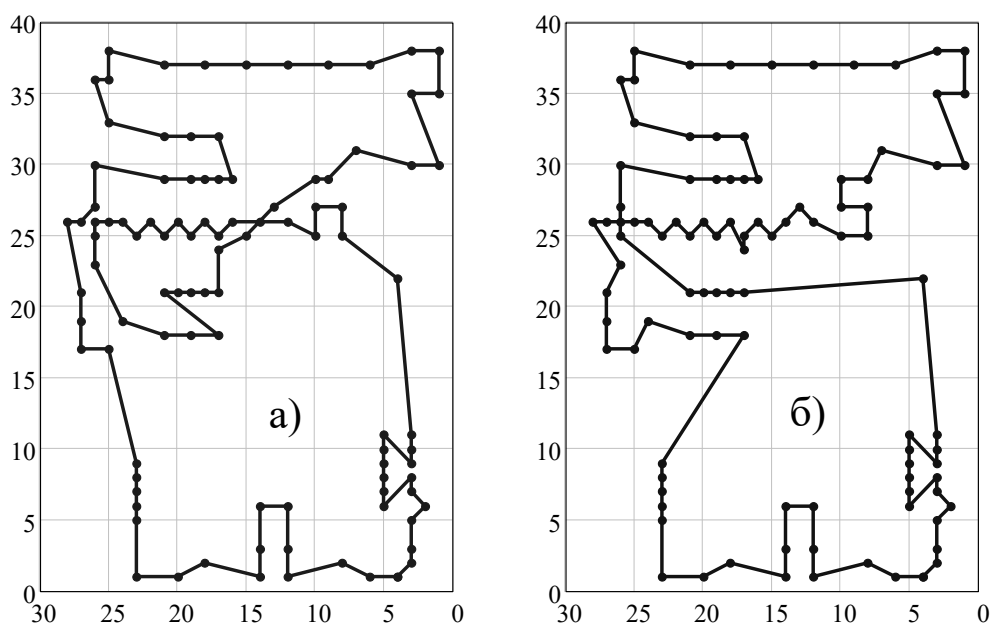


Рисунок 7.17 – Решения с длиной маршрута 232 мм (а) и 236 мм (б)

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.

Выводы по главе 7

1. Проведённый в главе анализ недостатков классических нейронных сетей, используемых в общей теории принятия решений, указывает, что наиболее распространённым нейросетям прямого распространения присущи принципиальные несоответствия их биологическому прототипу. Эти несоответствия связаны, в первую очередь, попыткой воспроизведения биологических процессов с помощью некоторого функционала с постоянной заданной структурой, перестройка которого производится только на одном, самом низком – параметрическом уровне: сеть не способна к изменению своей структуры при обучении, т.е. пассивна. В то же время современные представления о биологических нервных системах свидетельствуют о том, что для этих систем характерны принципы многоальтернативного строения и функционирования, основанные на многоуровневости структуры, разделении функций и модульности:

- независимое хранение событий нервной деятельности в виде ансамбля связанных нейронов, дифференцированно возбуждаемых только от определённых сенсорных сигналов;

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

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

Для реализации указанных свойств активной нейросети предложена модель многоуровневой фасетной организации памяти, существо которой заключается в том, что для каждого события формируется ансамбль (набор) признаков-фасетов, совокупность значений которых определяет собою конкретный объект.

2. В качестве апробации предложенного подхода разработана фасетная нейросетевая модель управления распределённой энергосистемой при возникновении в ней критических режимов – отказов. Показано, что

проектирование нейронных систем на основе эволюционных принципов многоальтернативности позволяет создавать активные нейромодели с перестраиваемой структурой, по своим свойствам приближающиеся к их биологическим прототипам:

– иерархическая многоуровневая схема внутренних взаимосвязей в сети обеспечивает высокие обобщающие способности системы при принятии решений в ситуациях, не встречавшихся при обучении. В частности, ярко выраженную иерархическую структуру имеют весьма эффективные свёрточные нейросети;

– модульность строения позволяет встраивать в структуру системы новые ансамбли нейронов, не встречая при этом ограничений «проклятия размерности» и эффекта переобучения;

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

3. Представлен пример построения фасетной нейросетевой модели принятия решений для задачи классификации объектов с не полностью известными значениями признаков. Продемонстрирована многоуровневость структуры модели и её свойство активности, т.е. способность к структурной перестройке при введении нового объекта, обладающего ранее не встречавшимся признаком.

4. Рассмотрена задача нахождения оптимальной стратегии последовательного выбора, в которой осуществляется пошаговое рассмотрение очередного варианта решения с накоплением полученной информации с целью продолжения процедуры поиска лучшего варианта, либо завершения этой процедуры в случае, если желаемый результат будет достигнут. Показано, что указанное накопление информации о множестве возможных решений может интерпретироваться как формирование оптимального разнообразия альтернативных решений, которое позволит с максимальной вероятностью получить глобально лучшее решение.

5. Предложена генетическая модель принятия решений, использующая многоальтернативный механизм матричной репликации. Использование этого механизма 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 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. Полученный вывод подтверждён результатами практических примеров.

Основные материалы данной главы изложены в работах [41,49,50,51,52,64,219, 241,232,237,407,408,425,430,243,426].

Глава 8. ЭВОЛЮЦИОННАЯ МЕТОДОЛОГИЯ МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Обобщение изложенных в предыдущих главах результатов работы позволяет сформулировать на их основе научно обоснованную, эволюционную методологию построения систем многоальтернативного управления сложными объектами, обеспечивающую повышение надёжности и качества функционирования этих объектов в критических режимах.

Для изложения содержания этой методологии будем придерживаться схемы, предложенной в работе А.М. Новикова и Д.А. Новикова [167]:

теоретическое основание;

характеристики (принципы);

логическая структура (объект, предмет, модели и методы);

оценка результативности методологии;

взаимосвязь с основными принципами кибернетики.

8.1 Теоретическое основание эволюционного подхода к управлению

Теоретическая основа предлагаемой методологии многоальтернативного управления определяется кибернетическим подходом к решаемой проблеме: воспроизведением в искусственных системах принципов управления, созданных природой в живых организмах.

Поскольку объектами исследования в данной работе являются сложные системы с критическими режимами, то в качестве биологического аналога были выбраны эволюционные свойства живых систем, которые обеспечивают последним успешную приспособительную реакцию и развитие в существенно неопределённых условиях внешней среды, включая кризисные (критические) состояния. При этом наблюдается уникальная особенность биологических систем: с ростом сложности адаптационные возможности этих систем возрастают и порождают свойство гомеостаза – способность сохранять состояние

динамического равновесия при открытом взаимодействии с изменяющейся средой.

Выбор эволюционного подхода к методологии построения сложных систем с критическими режимами определяет собою её характеристики, соответствующие принципам и механизмам эволюционных процессов.

8.2 Характеристики (принципы) методологии многоальтернативного управления

Анализ эволюционных процессов биологических систем, проведённый в главе 1, показал, что открытые живые системы достигли высокой степени адаптивного взаимодействия с внешней средой на основе ряда механизмов, обеспечивающих альтернативное многообразие внутреннего строения и принципов функционирования этих систем.

Моделирование и исследование влияния этого разнообразия на эволюционные процессы различных уровней организации жизни – от добиологических макромолекул до живых экосистем – (глава 2), дало основание объединить указанные механизмы в несколько общих принципов, которые составляют в своей совокупности эволюционную концепцию многоальтернативности строения и функционирования сложных систем:

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

Эти принципы носят конструктивный, методологический характер, т.е. указывают на пути практического воспроизведения приспособительных и гомеостатических свойств в антропогенных системах с критическими режимами путём построения их структуры и алгоритмов управления, опирающихся на принципы многоуровневости, разнообразия и разделения функций, модульности.

8.3 Логическая структура методологии многоальтернативного управления: объект, предмет, модели и методы

Объектом методологии многоальтернативного управления в рамках данной работы является процесс построения систем управления сложными объектами с критическими 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: многоуровневостью, многоканальностью, модульностью строения. Формирование такой структуры системы управления осуществляется на начальном этапе её построения, и на принципиальном уровне, в соответствии с используемой биологической аналогией, определяет возможность выполнения своих функций сложным объектом в критических режимах.

Изложенные в главах 3-7 примеры различных систем и их анализ позволяют сформулировать общие требования к структуре системы многоальтернативного управления:

1) приспособляемость системы к изменениям условий функционирования обеспечивается соответствующими изменениями внутренней структуры и параметров её управляющей части, т.е. её многоальтернативностью;

2) многообразие возможных альтернативных состояний управляющей части системы не должно уступать многообразию условий её функционирования;

3) изменения внутренней структуры и параметров системы обеспечиваются, по меньшей мере, двумя иерархически связанными видами обратной связи по её состоянию: обратной связью по критическим отклонениям переменных системы, используемой для качественных, структурных изменений в управлении, и обратной связью, реализующей регулирование и параметрическую настройку при небольших, некритических отклонениях в рамках выбранного варианта управления;

4) выбор альтернативного варианта управления, адекватного текущему состоянию объекта, необходимо предполагает получение полной информации о координатах этого состояния;

5) теоретически предельным по своей результативности способом выбора альтернативного управления является детерминированная дифференциация всех соответствий «состояние объекта – управление»;

6) многоальтернативность алгоритмов управления подразумевает наличие нескольких каналов управления объектом, число k которых может превосходить количество n регулируемых координат. Наличие взаимосвязи между этими каналами определяет возможность заблаговременной реакции управления на возможное предстоящее изменение состояния объекта, т.е. свойство предвидения;

7) в управляемых открытых системах должен быть предусмотрен механизм формирования и сохранения новых альтернатив управления, причём этот механизм целесообразно построить на комбинаторном поиске нового сочетания из имеющегося многообразия способов (блоков) управления [84]. В общем случае в многоальтернативной системе с памятью следует различать адаптацию как процесс выбора адекватного управления из уже имеющегося множества альтернатив, и адаптацию как обучение – процесс формирования новой альтернативы с последующим её запоминанием [206]. Подробно с функцией обучения (накоплением опыта) как эволюционного аналога естественного отбора можно ознакомиться в обстоятельной монографии [23], посвящённой математическим моделям деятельности активных систем.

Общий вид структуры многоальтернативной системы управления, отвечающей перечисленным требованиям, приведён на Рисунке 8.1.

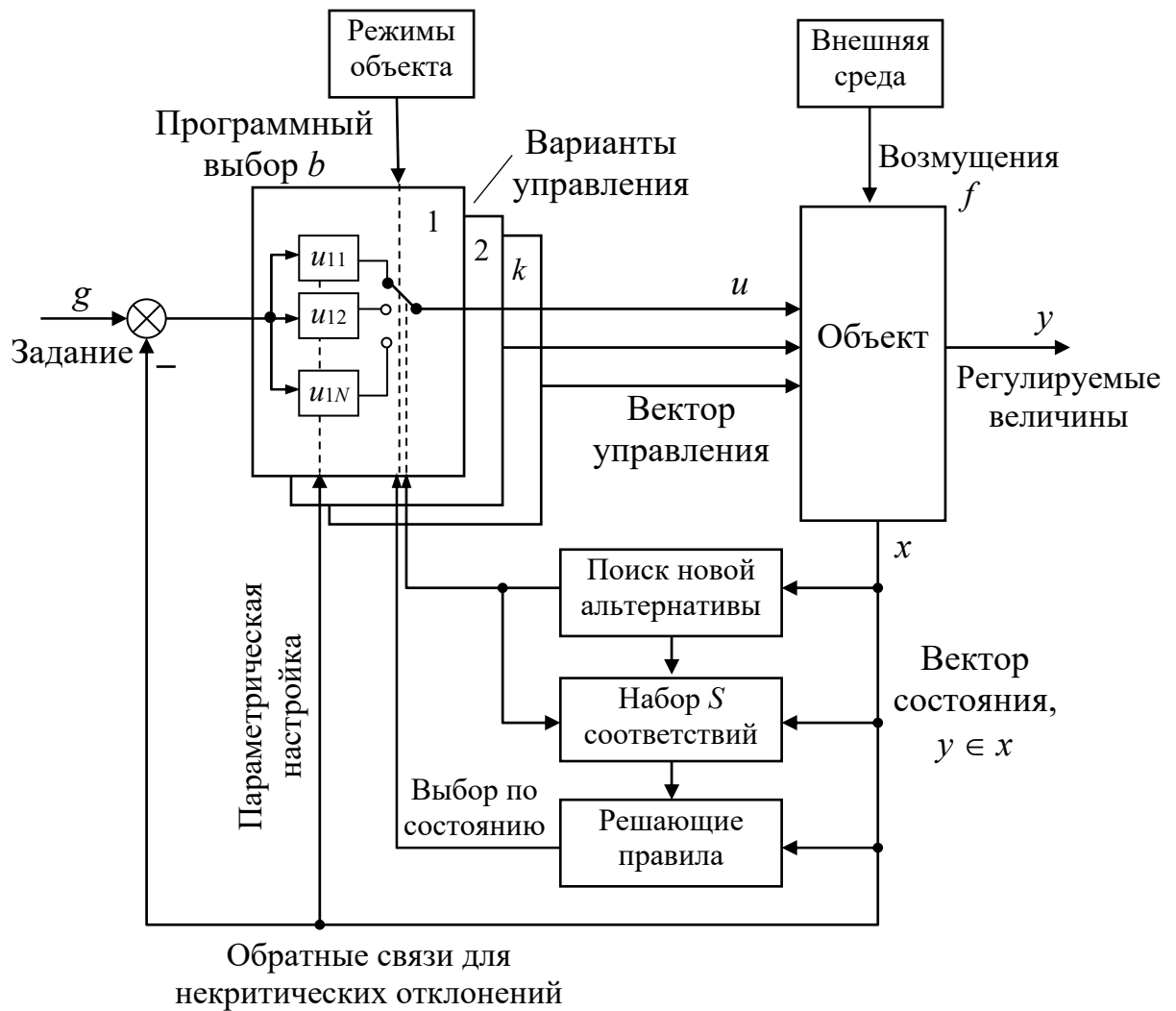


Рисунок 8.1 – Структура системы управления и принятия решений, использующая принципы многоальтернативного управления

К основным элементам представленной на Рисунке 8.1 структуры относятся:

– процедуры принятия решений (решающие правила), используемые при выборе необходимого соответствия между текущим состоянием объекта и вариантом алгоритма управления;

– выбор варианта управления из множества альтернатив по текущему состоянию объекта, а также при программном назначении режима работы системы с помощью функциональных взаимосвязей;

– контур параметрической настройки альтернативных 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, достигаемого на множестве альтернатив.

Показанные на Рисунке 8.1 блок поиска альтернатив, блоки вариантов управления u_{iN} и соответствий $s_i \in S$, и блок решающих правил реализуют процедуры обучения, хранения его результатов и принятия решений соответственно.

Формальное описание системы может быть представлено уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{x} = K(x, t) + N(x, t) \cdot u + F(x, t) \cdot f; \\ y = L(x, t) + A(x, t) \cdot u + H(x, t) \cdot f, \end{cases} \quad (8.1)$$

$$x_j \xrightarrow{r_{ij}} s_{ij}; \quad r_{ij} \in R; \quad i = \overline{1, k}; \quad j = \overline{1, N_i}, \quad (8.2)$$

$$x_j \xrightarrow{s_{ij}} u_{ij}; \quad s_{ij} \in S, \quad \text{или} \quad b_j \xrightarrow{d_{ij}} u_{ij}; \quad d_{ij} \in D, \quad (8.3)$$

$$u = [u_{ij}(p_{ij}, Q)]; \quad p_{ij} = P_{ij}(x_{ij}), \quad (8.4)$$

$$q(t) = \underset{\ell}{\text{extr}} q(s_{i, N_i + \ell_i}); \quad q(t) = q(g(t), x(t)), \quad (8.5)$$

$$Q(t) = \underset{ij}{\text{extr}} Q(u_{ij}); \quad Q(t) = Q(g(t), x(t)), \quad (8.6)$$

где (8.1) – описание объекта управления в пространстве состояний x с векторами управления u и возмущения f с помощью нестационарных матриц K, N, F, L, S, H ; (8.2) – процедуры принятия решений (решающие правила) r_{ij} при выборе необходимого соответствия s_{ij} между текущим состоянием x_j объекта и вариантом алгоритма управления u_{ij} ; (8.3) – выбор варианта управления u_{ij} из множества

альтернатив $j = 1, 2, \dots, N_i$ по текущему состоянию x_j , а также при программном назначении режима b_j работы системы с помощью функциональных взаимосвязей $d_{ij} \in D_i$; (8.4) – формирование вектора управления u в соответствии с выбранной альтернативой u_{ij} , текущим значением функции цели $Q(t)$ и параметрами $p_{ij} = P_{ij}(x_j)$, настраиваемыми контуром параметрического управления с алгоритмами P ; (8.5) – процедуры обучения, обеспечивающие синтез новых взаимосвязей $s_{i, N_i + \ell_i}$ по целевому критерию $q(t)$ обучения; (8.6) – общая цель управления $Q(t)$, достигаемая на множестве альтернатив u_{ij} .

Отметим, что перечисленные процедуры составляют существо так называемых интеллектуальных систем, определяющих общую перспективу развития теории управления и принятия решений [144,201].

Единая структура 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. главы 3-7).

Вместе с тем, модульность структуры, её многоуровневость и многоканальность вносят в методы многоальтернативного 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.

Важно отметить, что использование моделей и методов с указанными свойствами, т.е. использование методологии многоальтернативного управления даёт возможность получать высококачественные решения не в результате эвристических процедур или эмпирического способа проб и ошибок, а в результате целенаправленного построения структуры системы и алгоритмов её управления на основе принципов этой методологии.

8.4 Оценка результативности эволюционной методологии многоальтернативного управления

Результативность предложенной методологии многоальтернативного управления будем оценивать по двум критериям:

степень улучшения показателей качества систем регулирования в прикладных задачах;

степень универсальности.

Прикладную результативность методологии представим в виде Таблицы 8.1, в которой кратко указаны: объект управления; характеристики трудностей, связанных с его функционированием в критическом режиме; результат управления на основе предлагаемой методологии. Даны также ссылки на раздел диссертации, в котором приведены соответствующая модель системы и способы оценки качества этой системы в сравнении с базовым, известным решением.

Таблица 8.1 – Оценка прикладной результативности методологии
многоальтернативного управления

Объект или система управления	Характеристика недостатков, связанных с функционированием объекта	Характеристики результативности применения методологии многоальтернативного управления
Детерминированные системы		
Процесс тепловлажностной обработки бетонных изделий, п. 3.1	Низкая точность соблюдения температурного режима. Низкий ресурс паровых клапанов из-за большого числа переключений	Снижение средней ошибки регулирования температуры в 5 раз и числа переключений основного клапана в 6 раз за счёт многоканального управления
Нестационарный колебательный объект с модальным управлением, п. 3.2.2	Принципиальная несовместимость требований к робастности модального управления и требований к заданным показателям качества регулирования	Устранение указанной несовместимости. Раздельное обеспечение свойства грубости регулятора (при 10-кратном изменении частоты резонанса) и требуемого качества управления с нулевым перерегулированием и нулевой установившейся ошибкой

Объект или система управления	Характеристика недостатков, связанных с функционированием объекта	Характеристики результативности применения методологии многоальтернативного управления
Система электроснабжения орбитального космического аппарата, п. 3.3	Сложность одновременного управления большим числом (n) солнечных батарей в широком диапазоне регулирования. Возможность каскадного нарастания отказов	Сокращение зоны активного регулирования в n раз и исключение возможности каскадного нарастания отказов в системе путём обеспечения её многоуровневости, модульности строения и разделения функций управления
Система адаптивной идентификации нелинейных объектов, п. 3.4	Сложность реализации. Низкая точность идентификации параметров нелинейных объектов	Понижение размерности рассмотренной системы идентификации с 7 до 5. Уменьшение среднего квадратического значения ошибки идентификации в 3 раза
Система с сигнальной адаптацией для управления нестационарным объектом, п.3.5	Неработоспособность в рассматриваемом диапазоне изменения параметров нестационарного объекта	В рассмотренном примере обеспечивается работоспособность системы при среднегеометрическом отклонении её параметров в 5,5 раз за счёт блочного представления структур объекта и эталонной модели
Многоагентная система с магистральной траекторией движения, п. 3.6	Неэффективность конкурсного управления в состояниях системы, далёких от магистральной траектории (медленное приведение системы к магистрали)	Сокращение в 5 раз времени вывода системы на магистральную траекторию и последующее движение по ней за счёт двухуровневого иерархического управления
Стохастические и хаотические системы		
Система с замкнутым циклом использования материальных ресурсов, п. 4.2	Трудность обеспечения высокой вероятности полного выполнения системой своих функций	Обеспечение практически единичной вероятности полного выполнения системой своих функций путём введения дополнительного канала управления в виде резерва ресурсов

Объект или система управления	Характеристика недостатков, связанных с функционированием объекта	Характеристики результативности применения методологии многоальтернативного управления
Хаотическая система связи, п. 4.3.3	Невозможность обеспечения синхронизации хаотических колебаний передатчика и приёмника	Обеспечение синхронизации путём формирования в передающем узле заданного многообразия типов аттракторов, и их восстановления в приёмном узле с помощью наблюдателя
Теплообменник с внутренним источником энергии, п. 4.3.4	Сложность и низкая эффективность конструктивных способов увеличения коэффициента теплопередачи	Увеличение коэффициента теплопередачи на 15% путём построения системы управления с переменной структурой, обеспечивающей создание и стабилизацию хаотического режима
Системы с существенно неопределёнными параметрами		
Структурно неустойчивый объект типа подвижного обратного маятника с переменными параметрами, п. 5.1.1	Дефицит управляющих воздействий. Неустойчивость объекта при его перемещении. Высокая чувствительность к изменению своих параметров	Устранение дефицита управляющих воздействий. Обеспечение устойчивости объекта при его перемещении в условиях 10-кратного изменения его массы за счёт создания многоальтернативного управления на основе нечётких правил логического вывода
Процесс противоточного теплообмена с существенно неопределёнными параметрами, п. 5.1.2	Недопустимые отклонения регулируемых величин в заданном диапазоне изменения возмущения (температуры теплоносителя на входе вторичного контура теплообмена)	Уменьшение ошибки регулирования в 6 раз путём реализации многоуровневого нечёткого управления, модульности структуры системы и разделения функций управления между разными регулируемыми величинами
Системы с синергетическими свойствами		
Мобильный самобалансирующийся робот, п. 6.2	Дефицит управляющих воздействий. Потеря вертикальной балансировки робота при его перемещении	Устранение дефицита управляющих воздействий. Обеспечение вертикальной стабилизации робота при его перемещении за счёт введения альтернативного канала нечёткого управления

Объект или система управления	Характеристика недостатков, связанных с функционированием объекта	Характеристики результативности применения методологии многоальтернативного управления
Беспилотный летательный аппарат вертолётного типа, п.6.3	Сложность обеспечения стабилизации аппарата и его движения по заданной траектории в условиях переменной ветровой нагрузки	Упрощение решения указанных задач путём создания многоуровневого регулятора с модульной структурой и динамическим порядком каждого модуля в 3 раза меньше общего порядка объекта
Система перемещения подвешенного груза, п. 6.4	Раскачивание груза при его перемещении по горизонтали	Устранение раскачивания груза за счёт нечёткого многоальтернативного управления по состоянию объекта
Интеллектуальные системы управления		
Система диспетчерского управления электрической сетью, п.7.1.2	Высокая и априорно неопределённая длительность процесса принятия решений диспетчером-человеком с сохранением возможных ошибок в управлении	Безынерционное принятие решений. Исключение ошибок управления, связанных с человеческим фактором, путём создания активной нейросетевой модели принятия решений с перестраиваемой иерархической и модульной структурой
Система принятия решений с комбинаторной неопределённостью, п. 7.3	Низкая вероятность нахождения глобального экстремума в NP-полных задачах высокой размерности	Повышение вероятности нахождения глобального экстремума в 5-8 раз за счёт введения в процедуры поиска эволюционного механизма матричной репликации

Методология многоальтернативного управления использована в следующих практических разработках и производственных процессах:

в системе электроснабжения научно-энергетического модуля Международной космической станции, п.3.3;

в системах диверсной защиты и предотвращения аварийных ситуаций на Нововоронежской атомной станции;

для оценки влияния на надёжность работы автоматизированной системы радиоконтроля при интеграции новых компонентов на предприятии «ИРКОС»;

в подсистемах диспетчерского контроля электрической сети Россети центр Воронежэнерго, п. 7.1.2;

в технологическом процессе тепловлажностной обработки железобетонных изделий на предприятии «СТК-Бетон», п. 3.1;

при разработке прямохаотических систем широкополосной связи с защищёнными каналами на предприятии АО ВЦКБ «Полюс», п. 4.3.3.

Высокая степень универсальности методологии многоальтернативного управления в теоретическом плане обеспечивается общностью эволюционных механизмов, воспроизводимых живыми организмами и экосистемами любого вида, и в практическом плане подтверждается обширностью перечня различных классов объектов – детерминированных, со случайными и хаотическими процессами, с существенной неопределенностью состояния, систем интеллектуальной поддержки принятия решений, на которых была продемонстрирована результативность методологии.

8.5 Методология многоальтернативного управления и кибернетические принципы

Обсуждая в работе [130] эволюционные свойства природы, В.А. Красилов, задаваясь вопросом: «Есть ли в природе общая идея?», – обосновывает вывод о том, что эта идея включает в себя борьбу за существование на основе общих эволюционных закономерностей. К числу таких закономерностей относятся сформулированные выше эволюционные принципы многоальтернативности: принцип иерархичности в структуре функционирования сложной системы; принцип разделения и многообразия функций, используемых системой в соответствии со своим текущим состоянием или условиями внешней среды; принцип модульности (дискретности), реализующий комбинаторное многообразие структурных вариантов строения системы в процессе её самоорганизации. Поскольку с точки зрения кибернетики борьба за существование представляет собою совокупность процессов управления в

системе при её взаимодействии с внешней средой, то правомерно определить место перечисленных принципов многоальтернативности в ряду других кибернетических парадигм [229,424].

1. Принцип обратной связи. Безраздельное использование обратной связи как основного метода построения и устойчивого функционирования самоорганизующихся систем тесно связано с использованием кибернетического понятия «чёрного ящика», позволявшего долгое время ставить и решать задачи управления естественными и искусственными системами небольшой сложности безотносительно биологического или физического содержания их внутренних процессов. С ростом сложности объектов и выполняемых ими задач концепция «чёрного ящика», охватываемого обратной связью по его выходу, привела к кризису этого подхода к управлению [295], выражающемуся в отрыве построенных на его основе теоретических разработок от физического содержания реальных практических задач и, соответственно, в неспособности их решения.

Изложенные в главе 2 результаты исследования процессов эволюции показывают, что объяснение устойчивого функционирования сложной открытой системы исключительно на основе концепции «чёрного ящика» невозможно, и возникает необходимость раскрытия внутренней структуры объектов управления и происходящих в них процессов адаптации. Перечисленные выше принципы многоальтернативности в существенной мере отражают содержание этих внутренних процессов. Можно сказать, что синтез сложных систем с учётом реализуемых в них принципов многоальтернативности соответствует переходу к новым, синергетическим методам управления объектами, опирающимся на использование внутренних закономерностей их строения и функционирования [117].

2. Принцип критической сложности. Дж. фон Нейман в своих работах по самовоспроизводящимся автоматам вводит понятие критической сложности автомата, начиная с которой последний приобретает свойства самоорганизации и усложнения, а не достигнув этого критического уровня (так называемой «точки невозврата»), склонен к деградации. Указанный кибернетический принцип

критической сложности самоорганизующейся системы является прямой аналогией рассмотренного выше эволюционного принципа многообразия и разделения функций, требующего такого уровня многоальтернативности структур функционирования системы, который будет не ниже критического значения, необходимого для её устойчивого существования и развития.

3. Принцип дискретности информации. Важным кибернетическим принципом является дискретность количества информации, содержащейся в некотором объекте [121]. Принцип модульности строения системы, обеспечивающий комбинаторное многообразие её структур, непосредственно отражает механизм реализации указанного кибернетического принципа как в живых так и в искусственных системах.

4. Принцип магистрального развития. Необходимо упомянуть также о кибернетическом принципе магистрального развития (открытого управления), указывающем на возможность реализации в сложной многоагентной системе некоторой траектории её максимального сбалансированного роста, отклонение от которой невыгодно ни одному из агентов системы, несмотря на то, что частные цели функционирования этих агентов не совпадают [155,172,387]. Существование такой траектории подтверждается проведённым в главе 2 моделированием процессов в иерархически развитых биологических системах, наглядно демонстрирующем ключевую роль разнообразия функций и многоуровневости строения системы в её удержании на магистральной траектории развития в условиях внешних возмущений.

5. Принцип необходимого разнообразия. Кибернетический принцип необходимого разнообразия, сформулированный У. Эшби, утверждает, что для парирования многообразия внешних возмущений на систему, последняя должна обладать соответствующим разнообразием своих возможных управлений или состояний. Очевидно онтологическое единство принципа необходимого разнообразия и концепции многоальтернативности.

Таким образом, эволюционная методология многоальтернативного управления отражает конструктивное содержание базовых кибернетических

принципов функционирования самоорганизующихся живых систем, т.е. указывает на практические способы реализации их свойств в системах, создаваемых человеком.

Выводы по главе 8

1. Обобщение изложенных в предыдущих главах результатов работы позволяет сформулировать на их основе научно обоснованную, эволюционную методологию построения систем многоальтернативного управления сложными объектами, обеспечивающую повышение надёжности и качества функционирования этих объектов в критических режимах.

2. В основании этой методологии лежит кибернетическая идея воспроизведения в искусственных системах механизмов эволюции живых систем, которые обеспечивают последним успешную приспособительную реакцию и развитие в существенно неопределённых условиях внешней среды, включая кризисные (критические) состояния.

3. Указанные механизмы эволюции сформулированы в виде методологических принципов многоуровневости и иерархии, многообразия и разделения функций, модульности.

4. На основе анализа способов функционирования, рассмотренных в предшествующих главах объектов с различным характером отношений между переменными, сформирована общая структурная схема систем многоальтернативного управления, и дано формальное описание элементов этой схемы, к которым относятся:

– процедуры принятия решений (решающие правила), используемые при выборе необходимого соответствия между текущим состоянием объекта и вариантом алгоритма управления;

– выбор варианта управления из множества альтернатив по текущему состоянию объекта, а также при программном назначении режима работы системы с помощью функциональных взаимосвязей;

– контур параметрической настройки альтернативных 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, достигаемого на множестве альтернатив.

5. На примерах решения прикладных задач управления сложными объектами с критическими режимами, показана практическая результативность применения методологии многоальтернативного управления. Использование в качестве примеров объектов различной физической природы указывает на высокую степень универсальности предлагаемой методологии.

6. Эволюционные принципы методологии многоальтернативного управления продолжают ряд общих принципов построения открытых 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.

Основные материалы данной главы изложены в работах [206,229,243,424].

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 1–19, совокупность которых составляет научно обоснованную методологию построения систем управления сложными объектами, обеспечивающую повышение надёжности и качества функционирования этих объектов в критических режимах.

1. 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.

2. Разработаны модели эволюции ряда биологических объектов – от макромолекул до экосистем, с помощью которых показано, что открытые живые системы достигли высокой степени приспособительного, 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. 3. 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.

В живой природе указанные эволюционные механизмы дополняют собою механизм естественного отбора.

- 3.** 4. 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 (результаты 1,2);

общие конструктивные принципы этого подхода, указывающие на конкретные пути его воплощения в системах многоальтернативного управления: принцип многоуровневости, принцип многообразия и разделения функций, принцип модульности (результаты 3,4);

общая структура 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 (результаты 5-19).

4. 5. Разработаны следующие модели и алгоритмы многоальтернативного управления детерминированными системами с критическими режимами:

– 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 и метод синтеза робастного модального регулятора нестационарного объекта с использованием принципа многоальтернативного разделения функций, который позволяет разделить собственные числа характеристической матрицы системы на части, одна из которых формирует требуемый характер переходного процесса в системе, а другая обеспечивает свойство грубости модальному регулятору. На примере тестовой системы с нестационарным колебательным объектом обеспечена грубость регулятора при 10-кратном изменении частоты резонанса объекта, и переходный процесс с нулевым перерегулированием и нулевой установившейся ошибкой;

– модель сложной системы автономного электроснабжения космической станции, живучесть которой достигается в результате применения эволюционных алгоритмов многоальтернативного управления. На основе этих алгоритмов реализуется активное перенаправление энергетических и информационных потоков системы и изменение стратегии функционирования её подсистем в критических ситуациях. В результате

такого управления достигается, в частности, сокращение общего диапазона активного регулирования в системе до рабочей зоны одной солнечной батареи, и исключается возможности каскадного нарастания отказов в системе;

– модель системы адаптивной идентификации нелинейных нестационарных объектов, построенной на основе принципов многоальтернативности, которая даёт возможность воспроизвести в модели внутреннюю структуру нелинейного объекта, 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;

– модель многоагентной экономической системы, содержащей два альтернативных уровня управления: нижний уровень, соответствующий конкурентному распределению инвестиций, и верхний уровень, определяемый директивным введением инвестиций. На нижнем уровне ставится цель сбалансированного развития отраслей вдоль критической – магистральной траектории в процессе их конкурентного взаимодействия, а в тех случаях, когда это развитие отклоняется от магистрального, осуществляется переход к директивному управлению с целью возвращения к магистрали. По результатам тестового моделирования время вывода системы на магистральную траекторию сократилось в 5 раз.

5. 6. Построена тестовая модель стохастической четырёхмерной системы шестнадцатого порядка с неопределёнными параметрами и трёхуровневым случайным управлением. Продемонстрировано возникновение в таких системах свойства ультрастабильности как аналога гомеостазиса живых систем, удерживающего систему в пределах области допустимых состояний. Указанное свойство реализуется путём иерархически поочерёдного использования альтернативных ресурсов системы по мере приближения объекта к критическому состоянию. Это обстоятельство подтверждает существование робастно-адаптивного поведения стохастических систем многоальтернативного управления как их принципиального свойства.

7. 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 нормального – критического функционирования системы значительно превосходит возможности её параметрических изменений – интенсивности восстановления ресурсов и числа каналов этого восстановления, и позволяет обеспечить практически единичное значение этой вероятности.

6. 8. 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 и обеспечить непрерывную синхронизацию хаотических колебаний передатчика и приёмника.

9. Построена система с переменной структурой для многоальтернативного управления критическими режимами процесса теплообмена с внутренним источником энергии. Система содержит два замкнутых контура по отклонению регулируемой величины, и предусматривает их переключение для выбора и поддержания конвективного или хаотического режима теплообмена с отличающимися коэффициентами теплопередачи. В результате моделирования построенной системы управления показано, что переход к хаотическому режиму обеспечивает увеличение коэффициента теплопередачи на 15%.

7. 10. 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.

11. Разработана гомеостатическая система многомерного нечёткого управления процессом противоточного теплообмена с существенно неопределёнными параметрами. Показано, что высокое качество регулирования этого процесса, в частности, уменьшение ошибки регулирования в 6 раз, достигнуто благодаря использованию принципов многоальтернативного управления:

– многоуровневости – формированию в каждом канале управления нескольких уровней, передача управления между которыми осуществляется по мере приближения регулируемых величин к критическим значениям;

– модульности – созданию управления как результата объединения компонент нескольких простых управляющих модулей, вклад каждого из которых определяется текущим состоянием объекта;

– многообразия и разделения функций – автономному управлению каждой регулируемой величиной независимыми регуляторами, синтез которых, в силу их автономности, существенно упрощается.

8. 12. Проведено сопоставление многоальтернативных принципов многоуровневости, многообразия, модульности и принципов синергетической теории управления. Раскрыто их методологическое единство, объясняемое тем, что обе концепции обращаются к внутреннему содержанию процессов, характерных для функционирования сложных систем и строят управление такими системами сообразно с их физическим содержанием.

13. 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. При этом управление верхнего уровня обладает малой мощностью, и вызывает движение системы, обусловленное исключительно её собственными кинематическими свойствами.

14. Разработана система синергетического управления структурно неустойчивым беспилотным летательным аппаратом, использующая принципы многоальтернативности:

– 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.

15. Представлен алгоритм многоальтернативного управления перемещением слабодемпфированного подвешенного груза, который позволяет:

– формировать управление, в максимальной степени использующее собственные невозмущённые траектории движения объекта с текущими значениями его нестационарных параметров;

– решить проблему дефицита управляющих воздействий.

Результаты моделирования системы управления с предложенным алгоритмом подтверждает устранение раскачивания груза.

9. 16. 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.

Моделирование системы управления реального прототипа распределительной электрической сети подтвердило её обобщающие свойства и исключение ошибок управления, связанных с человеческим фактором.

17. Представлен пример многоальтернативного подхода к построению фасетной нейросетевой модели принятия решений для задач классификации объектов с не полностью известными значениями признаков. Продемонстрирована многоуровневость структуры модели и её свойство активности, т.е. способность к структурной перестройке при введении нового объекта в обучающую выборку.

18. 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 19. 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абакумов, А. И.** Модели Неймана-Гейла / А. И. Абакумов. – Владивосток : Изд-во ДВГУ, 2004. – 44 с.
2. **Абакумов, А. М.** Системы управления электромеханическими преобразователями и электротехнологическими установками / А. М. Абакумов, В. И. Котенев. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 182 с.
3. **Акимов, Л. В.** Особенности синтеза наблюдателей состояния, воздействующих на идентифицируемую часть объекта регулирования / Л. В. Акимов, П. Х. Коцегуб, О. И. Толочко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Луганськ. – 2002. – № 1(47). – С. 158–163.
4. **Алгоритмы подавления колебаний грузов** подъемно-транспортных механизмов с использованием нечеткой логики функционирования / О. А. Шведова, А. С. Шмарловский, А. В. Марков, Т. В. Тарасевич // Доклады БГУИР. – 2014. – № 1(79). – С. 65–71.
5. **Александров, А. Ю.** Об устойчивости и стабилизации механических систем с переключениями / А. Ю. Александров, А. А. Косов, Я. Чэнь // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 6. – С. 5–17.
6. **Алексеев, А. С.** Эволюция таксономического разнообразия / А. С. Алексеев, В. Ю. Дмитриев, А. Г. Пономаренко. – М. : Геос, 2001. – 126 с.
7. **Алещенко, Г. М.** Двухуровневая иерархическая модель оптимизации биологического разнообразия / Г. М. Алещенко, Е. Н. Букварева // Известия РАН. Серия биологическая. – 2010. – №1. – С. 5–15.
8. **Алпеев, А. С.** Диверсные защиты. Обеспечение разнообразия при проектировании аварийных защит атомных станций / А. С. Алпеев // Ядерная и радиационная безопасность. – 2015. – №2(76). – С. 11–14.
9. **Алтухов, Ю. П.** Генетические процессы в популяциях / Ю. П. Алтухов. – М. : Академкнига, 2003. – 431 с.
10. **Альсевич, В. В.** Введение в математическую экономику. Конструктивная теория / В. В. Альсевич. – М. : Едиториал УРСС, 2005. – 256 с.

11. **Андерсон, Т.** Введение в многомерный статистический анализ / Т. Андерсон. – М. : Физматлит, 1963. – 500 с.
12. **Андреев, Ю. Н.** Управление конечномерными линейными объектами / Ю. Н. Андреев. – М. : Наука, 1976. – 424 с.
13. **Андреева, С. И.** Эволюционные преобразования двустворчатых моллюсков Аральского моря в условиях экологического кризиса / С. И. Андреева, Н. И. Андреев – Омск : Изд-во Омского гос. педагогического ун-та, 2003. – 382 с.
14. **Андриевский Б. Р.** Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MatLab / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков. – СПб. : Наука, 1999. – 467 с.
15. **Андронов, А. А.** Теория колебаний / А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин. – М. : Наука, 1981. – 568 с.
16. **Андропов, Е. В.** Алгоритмизация управления диверсной системой комплексной защиты блоков АЭС / Е. В. Андропов, И. Р. Коган, В. П. Поваров, Л. П. Павлов // Вестник ВГТУ. – 2015. – Т. 11, № 5. – С. 51–58.
17. **Анисимов, А. А.** Особенности синтеза параметрически грубых систем модального управления с наблюдателями состояния / А. А. Анисимов, С. В. Тарарыкин // Известия РАН. Теория и системы управления.– 2012.– № 5.– С. 3-14.
18. **Ашманов, С. А.** Математические модели и методы в экономике / С. А. Ашманов. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1980.– 199 с.
19. **Баканов, А. И.** О некоторых методологических вопросах применения системного подхода для изучения структур водных экосистем / А. И. Баканов // Количественные методы экологии и гидробиологии : сб. науч. тр. – Тольятти : СамНЦ РАН, 2005. – С. 10–21.
20. **Бакланов, А. С.** Робастные самонастраивающиеся линейные и нелинейные системы управления динамическими объектами с сигнальной адаптацией / А. С. Бакланов, В. Е. Вохрышев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 6. – С. 66-70.
21. **Барабанов, А. В.** Структурное моделирование непрерывных процессов многоцентровой полимеризации / А. В. Барабанов, С. Л.

Подвальный // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – № 2.2. – С. 216–218.

22. **Башарин, А. В.** Управление электроприводами / А.В. Башарин. В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.

23. **Белов, М. В.** Модели деятельности (основы математической теории деятельности) / М. В. Белов, Д. А. Новиков – М. : Ленанд, 2021.–216 с.

24. **Белотелов, В. Н.** Управление пространственным движением перевернутого маятника, установленного на колесной паре / В. Н. Белотелов, Ю. Г. Мартыненко // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2006. №6. – С. 10–28.

25. **Березовский, Б. А.** Теория выбора и задача об оптимальной остановке на лучшем объекте / Б. А. Березовский, А. В. Гнедин. // Автоматика и телемеханика. – 1981. – Вып. 9. – С. 105–110.

26. **Берже, П.** Порядок в хаосе / П. Берже, И. Помо, К. Видаль. – М. : Мир, 1991. – 368 с.

27. **Берни, Д.** Большая иллюстрированная энциклопедия живой природы / Д. Берни – М. : Махаон, 2006. – 320 с.

28. **Берталанфи, Л.** Общая теория систем – критический обзор / Л. Берталанфи // В кн. Исследования по общей теории систем / под общ. ред. В.Н. Садовского и Э.Г. Юдина. – М. : Прогресс, 1969. – С. 23–82.

29. **Бигон, М.** Экология. Особи, популяции и сообщества : В 2-х т. Т. 1. / М. Бигон, Дж. Харпер, К. Таунсенд – М. : Мир, 1989. – 667 с.

30. **Бигон, М.** Экология. Особи, популяции и сообщества : В 2-х т. Т. 2. / М. Бигон, Дж. Харпер, К. Таунсенд – М. : Мир, 1989. – 477 с.

31. **Биоинспирированные методы в оптимизации** / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик, П. В. Сороколетов. – М. : Физматлит, 2009. – 384 с.

32. **Бобцов, А. А.** Развитие методов робастного управления в задачах адаптации / А. А. Бобцов, С. А. Холунин // Науч.-техн. вестник СПб ГИТМО. Вып. 6. – СПб. : ГИТМО, 2002. – С. 223–228.

33. **Богданов, А. В.** Модели адаптивно-подражательного поведения : I. Связь с равновесиями Нэша и решениями по доминированию / А. В. Богданов, А.

А. Васин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2002. – №1. С. 102–111.

34. **Борцов, Ю. А.** Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением / Ю. А. Борцов, Н. Д. Поляхов, В. В. Путов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 216 с.

35. **Большаков, А. А.** Повышение безопасности полёта воздушного судна с использованием методов искусственного интеллекта / А. А. Большаков, А. А. Кулик // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. международ. науч. конф. «ММТТ-32». – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2019. – Т. 11. С. 87–99.

36. **Большаков, А. А.** Алгоритм поддержания принятия решений по парированию угрозы авиационного происшествия / А. А. Большаков, А. А. Кулик, И. В. Сергушов, Е. Н. Скрипаль // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. международ. науч. конф. «ММТТ-32». – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2019. – Т. 1. С.58–63.

37. **Бреер, В. В.** Микро– и макромоделли социальных сетей / В. В. Бреер, Д. А. Новиков, А. Д. Рогаткин // Проблемы управления. Часть 1 : Теория. – 2014. – № 5. – С. 28–33. Часть 2 : Идентификация и имитационные эксперименты. – 2014. – № 6. – С. 45–51.

38. **Бурков, В. Н.** Механизмы функционирования организационных систем / В. Н. Бурков, В. В. Кондратьев. – М. : Наука, 1981. – 384 с.

39. **Бурков, В. Н.** Теория активных систем : состояние и перспективы / В. Н. Бурков, Д. А. Новиков. – М. : Синтег, 1999. – 128 с.

40. **Бурков, В. Н.** Введение в теорию управления организационными системами / В. Н. Бурков, Н.А. Коргин, Д. А. Новиков.– М. : Либроком, 2009.– 264 с.

41. **Бурковский, В. Л.** Математические методы системного анализа : учебное пособие. Рекомендовано УМО вузов РФ по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации / В. Л. Бурковский, Е. М. Васильев. – Воронеж : Научная книга, 2011. – 184 с.

42. **Вавилов, Н. И.** Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости / Н. И. Вавилов. – Л. : Наука, 1987. – 256 с.

43. **Вальд, А.** Последовательный анализ / А. Вальд. – М. : Физматлит, 1960. – 328 с.
44. **Васильев, Е. М.** Теория систем и системный анализ: учебное пособие. Рекомендовано УМО вузов РФ по образованию в области прикладной информатики / Е. М. Васильев, О. Я. Кравец. – Воронеж: Научная книга, 2007. – 180 с.
45. **Васильев, Е. М.** Синтез адаптивных промышленных регуляторов / Е. М. Васильев, О. Ю. Таратынов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2008. – №3. – С. 54–58.
46. **Васильев, Е. М.** Модальное управление нестационарными системами / Е. М. Васильев, К. Ю. Гусев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2008. – № 8. – С.46–54.
47. **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.
48. **Васильев, Е. М.** Разрывное управление в дифференцирующих наблюдателях / Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5, № 11. – С. 48-50.
49. **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.
50. **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.
51. **Васильев, Е. М.** Эволюционные алгоритмы с матричной репликацией / Е. М. Васильев, И. В. Крутских // Вестник ВГТУ. – 2011. – Т. 7, № 2. – С. 21–23.
52. **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.

53. **Васильев, Е.М.** Система оптимального управления подвешенным грузом / Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 1. – С. 25–30.

54. **Васильев, Е. М.** Синтез модальных регуляторов методом доминирующих корней / Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 1. – С. 46–48.

55. **Васильев, Е. М.** Алгоритмы управления тепловлажностной обработкой бетонных изделий / Е. М. Васильев, О. Ю. Таратынов // Вестник ВГТУ. – 2012. – Т. 8, № 2. – С. 13–16.

56. **Васильев, Е. М.** RS-анализ нестационарных динамических систем Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 4. – С. 71-74.

57. **Васильев, Е. М.** Хаотические движения в системах низкого порядка / Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 6. – С. 104–108.

58. **Васильев, Е. М.** Управление критическими режимами хаотических систем / Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 9. – С. 32–39.

59. **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.

60. **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.

61. **Васильев, Е. М.** Многоальтернативное управление в хаотических системах связи / Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 11. – С. 155–158.

62. **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.

63. **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.
64. **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.
65. **Васильев, Е. М.** Гомеостатическое управление динамическими системами на основе нечётких регуляторов / Е. М. Васильев, А. С. Одношивкин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 11. – С. 732–740.
66. **Васильев, С. Н.** Анализ динамики гибридных систем с помощью общих функций Ляпунова и множественных гомоморфизмов / С. Н. Васильев, А. А. Косов // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 6. – С. 27–47.
67. **Вентцель, Е. С.** Теория случайных процессов и её инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Высш. шк., 2000. – 383 с.
68. **Вентцель, Е. С.** Исследование операций : задачи, принципы, методология / Е. С. Вентцель. – М. : Кнорус, 2013. – 192 с.
69. **Вернадский, В. И.** Научная мысль как планетное явление / В. И. Вернадский. – М. : Наука, 1991. – 271 с.
70. **Вернадский, В. И.** Биосфера и ноосфера / В. И. Вернадский. – М. : Айрис-пресс, 2012. – 576 с.
71. **Веселов, Г. Е.** Синергетический подход в теории управления: истоки, развитие, результаты / Г. Е. Веселов, А. Н. Попов, А. А. Кузьменко // Тр. X Всероссийской науч. конф. «Системный синтез и прикладная синергетика». – Ростов–на-Дону, Таганрог : Изд-во ЮФУ, 2021. – С. 12-18.
72. **Винер, Н.** Кибернетика, или управление и связь в животном и машине / Н. Винер. – М. : Наука, 1983. – 344 с.
73. **Вольтерра, В.** Математическая теория борьбы за существование / В. Вольтера. – М. : Наука, 1976. – 286 с.

74. **Воронов, К. В.** Робастное управление нелинейными объектами с функциональными неопределенностями / К. В. Воронов, О. И. Королева, В. О. Никифоров // Автоматика и телемеханика. – 2001. – №2. – С. 112–121.

75. **Выбор структуры систем электроснабжения** низкоорбитальных космических аппаратов / Ю. А. Шиняков, А. С. Гуртов, К. Г. Гордеев [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2010. – №1. – С.103–113.

76. **Гайдук, А. Р.** Синтез автономных и связанных многомерных систем управления / А. Р. Гайдук, Е. А. Плаксиенко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 1. – С. 13–20.

77. **Галимов, Э. М.** Феномен жизни : между равновесием и нелинейностью. Происхождение и принципы эволюции / Э. М. Галимов – М. : Едиториал УРСС, 2006. – 256 с.

78. **Герасимьяк, Р. П.** Управление электроприводом поворотного механизма с подвешенным грузом / Р. П. Герасимьяк, Л. В. Мельникова, А. Г. Тепляков // Электротехника. – 2004. – №4. – С. 63–66.

79. **Герасимьяк, Р. П.** Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р. П. Герасимьяк, В. А. Лещёв. – Одесса : СМИЛ, 2008. – 192 с.

80. **Гомеостатика живых, технических, социальных и экологических систем** / под ред. Ю. М. Горского. – Новосибирск : Наука, 1990. – 350 с.

81. **ГОСТ Р-МЭК 62340-2011.** Атомные станции. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Требования по предотвращению отказов по общей причине. – М. : Стандартинформ, 2012. – 24 с.

82. **Гринин, Л. Е.** Макроэволюция в живой природе и обществе / Л. Е. Гринин, А. В. Марков, А. В. Коротаев – М. : Либрокком, 2009. – 248 с.

83. **Гришин, В. А.** Классическая теория управления и методы искусственного интеллекта. Проклятие размерностей / В. А. Гришин // Некоторые аспекты современных проблем механики и информатики. – 2018. – С. 19–26.

84. **Громов, Ю. Ю.** Нечеткая оптимизационная задача распределения элементов в сетевой информационной системе и процедура ее решения / Ю. Ю.

Громов, Ю. В. Минин, С. А. Копылов, Н. А. Карева // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2020. – № 7. – С. 47-54.

85. **Губанов, Д. А.** Социальные сети : модели информационного влияния, управления и противоборства / Д. А. Губанов, Д. А. Новиков, А. Г. Чхартишвили. – М. : Изд-во физико-математической литературы. – 2010. – 228 с.

86. **Губко, М. В.** Теория игр в управлении организационными системами / М. В. Губко, Д. А. Новиков. – М. : СИНТЕГ, 2002. – 139 с.

87. **Гукенхеймер, Дж.** Нелинейные колебания, динамические системы и бифуркации векторных полей / Дж. Гукунхеймер, Ф. Холмс. – Москва-Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2002. – 560 с.

88. **Дарвин, Ч.** Происхождение видов путём естественного отбора, или Сохранение благоприятных рас в борьбе за жизнь / Ч. Дарвин. – СПб : Наука, 2001. – 568 с.

89. **Деменков, Н. П.** Нечёткое управление в технических системах / Н. П. Деменков. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 200 с.

90. **Динамическая модель информационного управления в социальных сетях** / И. Н. Барабанов, Н. А. Коргин, Д. А. Новиков, А. Г. Чхартишвили // Автоматика и Телемеханика. – 2010. – № 11. – С. 172–182.

91. **Дли, М. И.** Нечёткая логика и искусственные нейронные сети / М. И. Дли, В. В. Круглов. – М. : Физматлит, 2001. – 224 с.

92. **Дмитриев, А. С.** Динамический хаос как парадигма современных систем связи / А. С. Дмитриев, А. И. Панас, С. О. Старков // Успехи современной радиоэлектроники (Зарубежная радиоэлектроника). – 1997. – №10. – С. 4–26.

93. **Докинз, Р.** Эгоистичный ген / Р.Докинз.– М.: Изд-во АСТ, 2013.– 512 с.

94. **Дорофеев, Д. В.** Синтез многомерного модального регулятора в АСУТП полимеризации бутадиен-стирольных каучуков / Д. В. Дорофеев, С. Л. Подвальный // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2002. – №6. – С. 24–26.

95. **Дружинина, М. В.** Методы адаптивного управления нелинейными объектами по выходу / М. В. Дружинина, В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков // Автоматика и телемеханика. – 1996. – №2. – С. 3–33.
96. **Друкер, П. Ф.** Менеджмент. Вызовы XXI века / П. Ф. Друкер. – М. : Манн, Иванов и Фербер, 2012. – С. 256.
97. **Дынкин, Е. Б.** Теоремы и задачи о процессах Маркова / Е. Б. Дынкин, А. А. Юшкевич. – М. : Наука, 1967. – 232 с.
98. **Емельянов, С. В.** Системы автоматического регулирования с переменной структурой / С. В. Емельянов. – М. : Наука, 1967. – 336 с.
99. **Ерёмин, Д. М.** Искусственные нейронные сети в интеллектуальных системах управления / Д. М. Ерёмин, И. Б. Гарцев. – М. : МИРЭА, 2004. – 75 с.
100. **Еськов, К. Ю.** Удивительная палеонтология : история Земли и жизни на ней / К. Ю. Еськов. – М. : ЭНАС, 2014. – 312 с.
101. **Жмудь, В. А.** Адаптивные системы автоматического управления с единственным основным контуром / В.А. Жмудь // Автоматика и программная инженерия. – 2014, № 2(8). – С. 106-122.
102. **Заде, Л.А.** Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений / Л.А. Заде. – М. : Знание, 1974. – 64 с.
103. **Заславский, Б. Г.** Управление экологическими системами / Б. Г. Заславский, Р. А. Полуэктов. – М. : Наука, 1988. – 296 с.
104. **Зверков, В. В.** Автоматизированная система управления технологическими процессами АЭС : монография / В. В. Зверков. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2014. – 560 с.
105. **Зубов, В. И.** Математические методы исследования систем автоматического регулирования / В. И. Зубов. – Л. : Машиностроение, 1974. – 336 с.
106. **Интрилигатор, М.** Математические методы оптимизации и экономическая теория / М. Интрилигатор. – М. : Айрис-пресс, 2002. – 565 с.
107. **Иорданский, Н. Н.** Эволюция жизни / Н. Н. Иорданский. – М. : Академия, 2001. – 425 с.

108. **Исследование устойчивости и стабилизация** нелинейных переключаемых механических систем на основе декомпозиции / А. Ю. Александров, А. П. Жабко, И. А. Жабко, А. А. Косов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – Т. 16, № 12. – С. 807-812.

109. **Карманов, В. Г.** Математическое программирование / В. Г. Карманов. – М. : Физматлит, 2001. – 263 с.

110. **Кастлер, Г.** Возникновение биологической организации / Г. Кастлер . – М. : Мир, 1967. – 90 с.

111. **Катрахова, А. А.** Вариационные методы оптимального управления: учебное пособие / А. А. Катрахова, Е. М. Васильев, В. С. Купцов, А. В. Купцов. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. техн. ун-та, 2012. – 225 с.

112. **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.

113. **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.

114. **Кимура, М.** Молекулярная эволюция : теория нейтральности / М. Кимура. – М. : Мир, 1985. – 394 с.

115. **Колемаев, В. А.** Математическая экономика / В. А. Колемаев. – М. : ЮНИТИ, 1998. – 240 с.

116. **Колесников, А. А.** Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 334 с.

117. **Колесников, А. А.** Синергетическая теория управления : концепция, методы, тенденции развития / А. А. Колесников // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2001. – Т. 23, № 5. – С. 7–27.

118. **Колесников, А. А.** Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза/А.А. Колесников.– М.: КомКнига, 2006.– 240 с.

119. **Колесников, А. А.** Новые нелинейные методы управления полетом / А. А. Колесников. – Москва : Физматлит, 2013. – 193 с.

120. **Колесников, А. А.** Методы АКАР и АКОР в задачах синтеза нелинейных систем управления / А. А. Колесников, А. А. Колесников, А. А. Кузьменко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. №17(10). – С. 657–669.

121. **Колмогоров, А. Н.** Три подхода к определению понятия «количество информации» / А. Н. Колмогоров // Проблемы передачи информации. – 1965. – Т. 1, вып. 1. – С. 3–11.

122. **Колмогоров, А. Н.** Качественное изучение математических моделей популяций / А. Н. Колмогоров // В кн. Проблемы кибернетики. Вып. 25. – М. : Наука, 1972. – С. 100–106.

123. **Корн, Г.** Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Лань, 2003. – 832 с.

124. **Корнилков, А. Н.** Разработка системы управления “сегвей” на базе адаптивного нечеткого регулятора / А. Н. Корнилков, Н. Г. Липатников, Ю. Н. Хижняков // Вестник Пермского национального исследовательского университета. – 2016. – № 19. – С. 69–79.

125. **Коровин, С. К.** Наблюдатели состояния для линейных систем с неопределенностью / С. К. Коровин, В. В. Фомичев. – М.: Физматлит, 2007. – 224 с.

126. **Коростышевский, М. А.** О некоторых стохастических закономерностях эволюционного процесса / М. А. Коростышевский, М. Р. Штабной, В. А. Ратнер // В кн. Вопросы математической генетики. – Новосибирск : Ин-т цитологии и генетики СО АН СССР, 1974. – С. 5–32.

127. **Короткова, Е. А.** Основные направления и разработки безотходной и малоотходной технологии в металлургии / Е. А. Короткова, Е. В. Бабакова // Экология и безопасность в техносфере : современные проблемы и пути решения : сб. тр. Всероссийской науч.-практ. конф. – Томск : Изд-во ТПУ, 2017. – С. 26–29.

128. **Косов, А. А.** О построении стабилизирующего управления для одной механической системы с переключениями / А. А. Косов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – №12. – С. 23–26.
129. **Красилов, В. А.** Теория эволюции : необходимость нового синтеза / В. А. Красилов // Эволюционные исследования. Макроэволюция.– Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1984.– С. 4–17.
130. **Красилов, В. А.** Нерешённые вопросы теории эволюции / В. А. Красилов. – Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1986. – 138 с.
131. **Краснова, С. А.** Каскадный синтез наблюдателей состояния для нелинейных систем при наличии внешних возмущений / С. А. Краснова // Автоматика и телемеханика. – 2003. – №1. – С. 3–26.
132. **Красовский, А. А.** Проблемы физической теории управления / А. А. Красовский // Автоматика и телемеханика. – 1990. – № 11. – С. 3–28.
133. **Круглов, В. В.** Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов. – М. : Горячая линия-Телеком, 2001.–382 с.
134. **Крутова, И. Н.** Робастность систем управления с нелинейной параметрической коррекцией к некоторым видам возмущений / И. Н. Крутова, В. Ю. Рутковский // Автоматика и телемеханика. – 1991. – № 9. – С. 145–159.
135. **Кузнецов, С. П.** Динамический хаос / С. П. Кузнецов. – М. : Физматлит, 2001. – 296 с.
136. **Кузовков, Н. Т.** Модальное управление и наблюдающие устройства / Н. Т. Кузовков. – М. : Машиностроение, 1976. – 184 с.
137. **Кунинин, П. Н.** Системы с эталонной моделью и сигнальной адаптацией / П. Н. Кунинин., А. Р. Романов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника : труды IV Всероссийской науч.-практ. конф. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2010. – С. 60-68.
138. **Курдюков, А. П.** Основы робастного управления / А. П. Курдюков. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1995. – 220 с.
139. **Кэрролл, Ш. Б.** Закон «джунглей». В поисках формулы жизни / Ш. Б. Кэрролл. – СПб. : Питер, 2017. – 304 с.

140. **Ламарк, Ж. Б.** Философия зоологии. Т. 1. / Ж. Б. Ламарк. – М. : ОГИЗ-Биомедгиз, 1935. – 330 с.
141. **Ламарк, Ж. Б.** Философия зоологии. Т. 2. / Ж. Б. Ламарк. – М. : ОГИЗ-Биомедгиз, 1937. – 483 с
142. **Ландау, Л. Д.** Теоретическая физика. Т.6. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1986. – 736 с.
143. **Левченко, В. Ф.** Биосфера : этапы жизни / В. Ф. Левченко. – СПб. : Своё издательство, 2012. – 264 с.
144. **Леденёва, Т.М.** Моделирование оценочных систем на основе принципа многоальтернативности / Т. М. Леденёва, С. Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – Т. 57, № 3-1.– С. 155–161.
145. **Леонтьев, В. В.** Экономическое эссе. Теории, исследования, факты и политика / В. В. Леонтьев. – М. : Политиздат, 1990. – 415 с.
146. **Лётов А. М.** Условно устойчивые регулируемые системы (об одном классе оптимальных регулируемых систем) / А. М. Лётов // Автоматика и телемеханика. – 1957. – № 7. – С. 601–604.
147. **Лоскутов, А. Ю.** Очарование хаоса / А. Ю. Лоскутов // Устойчивое развитие. Наука и практика. – 2003. – №2. – С. 13–21.
148. **Макаров, В. В.** Моделирование и исследование рекуррентных алгоритмов идентификации нестационарных параметров объектов управления / В. В. Макаров, М. В. Жиров, В. А. Куроткин // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. – М. : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С.2679–2684.
149. **Макконел, К. Р.** Экономикс : Принципы, проблемы и политика. Т.2 / К. Р. Макконел, С.П. Брюс. – М. : ИНФРА-М, 2001.
150. **Мандельброт, Б.** Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – Москва : Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
151. **Математические модели организаций** / А. А. Воронин, М. В. Губко, С. П. Мишин, Д. А. Новиков. – М. : Ленанд, 2008. – 360 с.

152. **Мендель, Г.** Опыты над растительными гибридами / Г. Мендель. – М. : Наука, 1965. – 159 с.
153. **Методы автоматического проектирования нелинейных систем** / под ред. Ю. И. Топчиева. – М. : Машиностроение, 1993. – 576 с.
154. **Методы классической и современной теории автоматического управления.** В 5 томах. Том 3. Синтез регуляторов систем автоматического управления / под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. – М : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004. – 616 с.
155. **Механизмы управления** / под ред. Д. А. Новикова. – М. : Ленанд, 2011. – 192 р.
156. **Мирошник, И. В.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И. В. Мирошник, В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков. – СПб. : Наука, 2000. – 549 с.
157. **Морозов, А. Д.** Введение в теорию фракталов / А. Д. Морозов. – Москва-Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2002. – 160 с.
158. **Мун, Ф.** Хаотические колебания / Ф. Мун. – М.: Мир, 1990. – 312 с.
159. **Нейман, Дж.** Теория самовоспроизводящихся автоматов / Дж. Нейман. – М. : URSS, 2010. – 384 с.
160. **Неймарк, Ю. И.** Стохастические и хаотические колебания / Ю. И. Неймарк, П. С. Ланда. – М. : Наука, 1987. – 424 с.
161. **Нелинейные корректирующие устройства в системах автоматического управления** / под ред. Ю. И. Топчиева. – М. : Машиностроение, 1971. – 467 с.
162. **Неспирный, В. Н.** Стабилизация колебаний маятника с подвижной точкой подвеса относительно наклонного равновесия / В. Н. Неспирный, В. А. Королев // Механика твердого тела. – 2009. – Вып. 39. – С. 195–206.
163. **Никифоров, В. О.** Схемы адаптивного управления с расширенной ошибкой / В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 9. – С. 3–22.

164. **Никифоров, В. О.** Робастное управление линейным объектом по выходу / В. О. Никифоров // Автоматика и телемеханика.– 1998.– № 9.– С. 87–99.
165. **Никифоров, В. О.** Интеллектуальное управление в условиях неопределенности / В. О. Никифоров, О. В. Слита, А. В. Ушаков. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2011. – 226 с.
166. **Николенко, С.** Глубокое обучение / С. Николенко, А. Кадурин, Е. Архангельская. – СПб. : Питер, 2018. – 480 с.
167. **Новиков, А. М.** Методология / А. М. Новиков, Д. А. Новиков. – М.: Синтег, 2007. – 668 с.
168. **Новиков, Д. А.** Механизмы стимулирования в динамических и многоэлементных социально-экономических системах / Д. А. Новиков // Автоматика и телемеханика. – 1997. – № 6. – С. 3–26.
169. **Новиков, Д. А.** Механизмы функционирования многоуровневых организационных систем / Д. А. Новиков. – М. : Фонд «Проблемы управления», 1999. – 150 с.
170. **Новиков, Д. А.** Механизмы управления динамическими активными системами / Д. А. Новиков, И. М. Смирнов, Т. Е. Шохина. – М. : ИПУ РАН, 2002. – 124 с.
171. **Новиков, Д. А.** Методология управления / Д. А. Новиков. – М. : Либроком, 2011. – 128 с.
172. **Новиков, Д. А.** Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. – М. : Физматлит, 2012. – 604 с.
173. **Новиков, Д. А.** Кибернетика : Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития / Д. А. Новиков. – М. : Ленанд, 2021. – 160 с.
174. **Новиков, С. П.** Вторая половина XX века и ее итог: кризис физико-математического сообщества в России и на Западе / С. П. Новиков // Вестник ДВО РАН. – 2006. – Вып. 4. – С. 3–22.
175. **Новосельцев, В. Н.** Теория управления и биосистемы. Анализ сохрнительных свойств / В. Н. Новосельцев. – М. : Наука, 1978 – 320 с.

176. **Новые концепции общей теории** управления: Сборник научных трудов / под ред. А.А. Красовского. – М.: Таганрог: ТРТУ, 1995. – 183 с.

177. **Овсиенко, Ю. В.** Устойчивое развитие : концепция и стратегические ориентиры / Ю. В. Овсиенко, Е. Н. Бизяркина, Н. Н. Сухова // Экономика и математические методы. – 2007. – Т. 43, № 4. – С. 57–71.

178. **Одум, Ю. П.** Экология. Т. 2. / Ю. П. Одум. – М. : Мир, 1986. – 376 с.

179. **Олейникова, С. А.** Математические модели и методы оптимизации функционирования сложных обслуживающих систем со стохастическими параметрами : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук / Олейникова Светлана Александровна ; Воронежский государственный технический университет.– Воронеж, 2016.– 354 с.

180. **Опыт автоматизации тепловлажностной обработки бетона** / А. Деркач, В. Красных, В. Литвиненко [и др.] // Системная интеграция. Промышленность стройматериалов. – 2009. – №4. – С. 48–54.

181. **Павленко, В. Д.** Методы детерминированной идентификации нелинейных систем в виде моделей Вольтерра / В. Д. Павленко, С. В. Павленко // тр. XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. – М. : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 2830–2841.

182. **Павлов, Д. С.** Биоразнообразие, экосистемные функции и жизнеобеспечение человечества / Д. С. Павлов, Е. Н. Букварева // Вестник РАН. – 2007. – Т. 77, № 11. – С. 974–986.

183. **Патент № 2152069 Российская Федерация, МПК G05F1/59, H02J7/34, H02J9/00.** Автономная система электропитания : № 98119125/09 : заявл. 21.10.1998 : опубл. 27.06.2000 / Тищенко А. К., Ганкевич П. Т., Савенков В. В., Лившин Г. Д. ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Орбита». – 6 с.

184. **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., Вишневикий 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.

185. 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.

186. Патент № 2211479 Российская Федерация, МПК G05F1/66, H02J7/34. Автономная система электропитания : № 2001100777/09 : заявл. 09.01.2001 : опубл. 27.08.2003 / Тищенко А. К., Ганкевич П. Т., Савенков В. В., Лившин Г. Д. ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Орбита». – 5 с.

187. Патент № 2235054 Российской Федерации, МПК7 B66 C 13/06. Устройство для гашения колебаний груза, подвешенного на рабочих ветвях грузового каната стрелового крана : № 2002109487/11 : заявл. 11.04.2002 : опубл. 27.08.2004 / Шкрабак В. С., Власов А. В., Голдобина Л. А., Шкрабак В. В., Шкрабак Р. В. ; заявитель С.-Петербур. гос. аграр. ун-т. – 11 с.

188. Пащенко, А. Ф. Идентификация нелинейных систем в классе блочно-ориентированных моделей / А. Ф. Пащенко // Адаптивные и робастные системы. – 2010. – №4(26). – С. 149–160.

189. Переработка отработавшего ядерного топлива и рециклирование ядерных материалов в двухкомпонентной ядерной энергетике / Е. О. Адамов, Ю. С. Мочалов, В. И. Рачков [и др.] // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130, № 1. – С. 28–34.

190. Петров, Б. Н. Избранные труды. Т. 1 / Б. Н. Петров. – М. : Наука, 1983. – 429 с.

191. **Петров, Ю. П.** Новые главы теории управления и компьютерных вычислений / Ю. П. Петров. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 192 с.

192. **Петровичев, М. А.** Система энергоснабжения бортового комплекса космических аппаратов / М. А. Петровичев, А. С. Гуртов. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. университета, 2007. – 88 с.

193. **Повышение надёжности** эксплуатации АЭС на основе реализации принципа разнообразия / Е. В. Андропов, И. Р. Коган, В. П. Поваров, Л. П. Павлов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – №3. – С. 33–44.

194. **Подвальный, С. Л.** Адаптация и оптимизация при построении АСУТП с использованием методов имитационного моделирования / С. Л. Подвальный // Структурная адаптация сложных систем управления : сб. науч. тр. : науч. ред. Л. А. Растринин. – Воронеж : Воронежский политехнический институт, 1977. – С. 114–116.

195. **Подвальный, С. Л.** Моделирование промышленных процессов полимеризации / С. Л. Подвальный. – М. : Химия, 1979. – 256 с.

196. **Подвальный, С. Л.** Эволюционные принципы формирования структуры вычислительных систем / С. Л. Подвальный // Адаптация в сложных системах управления : сб. науч. тр. : науч. ред. Я. З.Цыпкин. – Воронеж : Воронежский политехнический институт, 1979. – С. 60–63.

197. **Подвальный, С. Л.** Эволюционные структуры специального математического обеспечения интегрированных систем моделирования / С. Л. Подвальный // в кн. «Проблема оптимального выбора в прикладных задачах». – Воронеж : Воронежский государственный университет, 1980. – С. 90–139.

198. **Подвальный, С. Л.** Информационно-управляющие системы мониторинга сложных объектов / С. Л. Подвальный. – Воронеж : Научная книга, 2010. – 164 с.

199. **Подвальный, С. Л.** Многоальтернативные системы с переменной структурой автоматического управления процессами непрерывной полимеризации / С. Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. – 2011. – № 4.1. – С. 175–179.

200. **Подвальный, С. Л.** Многоальтернативные системы : обзор и классификация / С. Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – №2. – С.4–13.

201. **Подвальный, С. Л.** Многоальтернативность как основа обеспечения интеллектуальности систем управления / С. Л. Подвальный, Т. М. Леденёва // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №11. – С. 17–23.

202. **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.

203. **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.

204. **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.

205. **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.

206. **Подвальный, С. Л.** Многоальтернативное управление в критических ситуациях / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство : материалы XI Всерос. науч.-практ. конф. с межд. участием. – Старый Оскол : СТИ НИТУ МИСиС, 2014. – Т. 2. – С. 289–294.

207. **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.

208. **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.

209. **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.

210. **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.

211. **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.

212. **Подвальный, С. Л.** Эволюционное управление открытыми системами в критических ситуациях / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий : сб. тр. VIII Международ. конф. «ПМТУКТ-2015». – Воронеж : Научная книга, 2015. – С. 269–272.

213. **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.

214. **Подвальный, С. Л.** Многоальтернативная стабилизация структурно неустойчивых объектов / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Устойчивость и

процессы управления : материалы III международ. конф., посвящ. 85-летию В.И. Зубова. – СПб. : Изд. дом Фёдоровой Г.В., 2015. – С. 143–144.

215. **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.

216. **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.

217. **Подвальный, С. Л.** Информационные технологии многоальтернативности в технических системах аварийной защиты / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Вопросы кибербезопасности, моделирования и обработки информации в современных социотехнических системах : сб. науч. тр. II Международной науч.-техн. конф.–Курск: Курский гос. ун-т, 2016.– С. 166–168.

218. **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.

219. **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.

220. **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.

221. **Подвальный, С. Л.** Синтез неминимально-фазовых систем управления на основе переключаемых структур / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Моделирование и наукоёмкие информационные технологии в

технических и социально-экономических системах : труды IV Всероссийской науч.-практ. конф. с международным участием. В 2 ч. Ч. 2. Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2016. – С. 272–276.

222. **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.

223. **Подвальный, С. Л.** Моделирование эволюционных процессов биологических систем / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий : сб. тр. IX международ. конф. – Воронеж : Научная книга, 2016. – С. 271–274.

224. **Подвальный, С. Л.** Многоальтернативное управление объектами с критическими режимами / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Современные сложные системы управления : материалы XII международ. науч.-практ. конф. Ч. 1. – Липецк : Липецкий государственный технический университет, 2017. – С. 119–123.

225. **Подвальный, С. Л.** Каскадная идентификация нелинейных систем / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Системный анализ, управление и обработка информации : сб. тр. VIII Международ. науч. конф. Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2017. – С. 122–125.

226. **Подвальный, С. Л.** Концепция многоальтернативности в синергетической теории управления / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. международ. науч. конф. «ММТТ-30». – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – Т.7. – С. 13–16.

227. **Подвальный, С. Л.** Синергетические свойства принципов многоальтернативности / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // В кн. Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий : сб. тр. X международ. науч. конф. «ПМТУКТ-2017». – Воронеж : Изд-во «Научная книга», 2017. – С. 289–292.

228. **Подвальный, С. Л.** Влияние биологического разнообразия на эволюционную устойчивость экологических систем / С. Л. Подвальный, Е. М.

Васильев // Комплексные проблемы техносферной безопасности : материалы Международ. науч.-практ. конф. – Воронеж : ВГТУ, 2017. – С. 4–7.

229. **Подвальный, С. Л.** Эволюционная концепция многоальтернативности и кибернетические принципы управления / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий : сб. тр. XI международ. конф. – Воронеж : Научная книга, 2018. – С. 196–199.

230. **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.

231. **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.

232. **Подвальный, С. Л.** Принцип необходимого разнообразия в стратегиях последовательного принятия решений / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий : сб. тр. XII международ. конф. «ПМТУКТ-2019». – Воронеж : ВГУИТ, 2019. – С. 255–259.

233. **Подвальный, С. Л.** Синергетическое управление мобильным самобалансирующимся роботом / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : труды XXI межд. конф. – Самара : ООО Офорт, 2019. – Т. 2. – С. 96–101.

234. **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.

235. **Подвальный, С. Л.** Анализ устойчивости многоуровневых биологических систем / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Интеллектуальные

информационные системы : труды Международ. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1. – Воронеж : Изд-во ВГТУ, 2019. – С. 54–58.

236. **Подвальный, С. Л.** Многоальтернативность : эволюционная стратегия биологических систем / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Управление большими системами. – 2019. Вып. 77. – С. 125–170.

237. **Подвальный, С. Л.** Фасетные нейросети в задачах распознавания образов / С. Л. Подвальный, В. М. Мугатина, Е. М. Васильев // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. международ. науч. конф. В 12 т. Т. 6 : под общ. ред. А. А. Большакова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2020. – С. 90–95.

238. **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.

239. **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.

240. **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.

241. **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.

242. **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.

243. **Подвальный, С. Л.** Системы многоальтернативного управления : Эволюционный подход : монография / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев. – Старый Оскол : Изд-во ТНТ, 2023. – 376 с.
244. **Половко, А. М.** Основы теории надёжности / А. М. Половко, С.В. Гуров. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
245. **Поляк, Б. Т.** Развитие теории автоматического управления / Б. Т. Поляк // Проблемы управления. – 2009. – № 3.1. – С. 2–18.
246. **Поляк, Б. Т.** Робастная устойчивость и управление / Б. Т. Поляк, П. С. Щербаков – М. : Наука, 2002. – 303 с.
247. **Пономаренко, А. Г.** Эволюция разнообразия и устойчивость экосистем / А. Г. Пономаренко, В. Ю. Дмитриев // В кн. Проблемы доантропогенной эволюции биосферы. – М : Наука, 1993. – С. 54–59.
248. **Пригожин, И.** Порядок из хаоса : новый диалог с природой / И. Пригожин, И. Стенгерс. – М. : Прогресс, 1986. – 432 с.
249. **Прикладная статистика** : классификация и снижение размерности. Том 3. / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
250. **Протасов, И. Д.** Теория игр и исследование операций / И. Д. Протасов. – М. : Гелиос АРВ, 2006. – 368 с.
251. **Пятницкий, Е. С.** Принцип декомпозиции в управлении механическими системами / Е. С. Пятницкий // Докл. АН СССР. – 1988. – Т. 300, № 2. – С. 300–303.
252. **Разработка системы стабилизации** угла отклонения балансирующего робота / Д. С. Федоров, А. Ю. Ивойлов, В. А. Жмудь, В. Г. Трубин // Автоматика и программная инженерия. – 2015. – № 2(12). – С. 16–34.
253. **Ратнер, В. А.** Математическая популяционная генетика / В. А. Ратнер. – Новосибирск : Наука, 1977. – 128 с.
254. **Ратнер, В. А.** Блочно-модульный принцип организации и эволюции молекулярно-генетических систем управления / В. А. Ратнер // Генетика. – 1992. – № 2. – С. 5–23.

255. **Ратнер, В. А.** Сайзеры : моделирование фундаментальных особенностей молекулярно-биологических организаций. Соответствие общих свойств и конструктивных особенностей коллективов макромолекул / В. А. Ратнер, В. В. Шамин // Журнал общей биологии. – 1983. – Т. 44, № 1. – С. 51–61.

256. **Ратнер, В. А.** Молекулярно-генетическая система управления / В. А. Ратнер // Природа. – 2001. – № 3. – С. 16–22.

257. **Редько, В. Г.** Эволюция, нейронные сети, интеллект. Модели и концепции эволюционной кибернетики / В. Г. Редько. – М. : Либроком, 2013. – 224 с.

258. **Редько, В. Г.** Проблемы интеллектуального управления – общесистемные, эволюционные и нейросетевые аспекты / В. Г. Редько // Проблемы интеллектуального управления – общесистемные, эволюционные и нейросетевые аспекты : тр. Науч.-техн. конф. «Нейроинформатика-2002». – М. : МИФИ, 2003. – С. 8–39.

259. **Редько, В. Г.** Эволюционная кибернетика / В. Г. Редько. – М. : Наука, 2003. – 155 с.

260. **Рогова, Н. С.** Разработка алгоритмов управления для перемещения груза порталным краном / Н. С. Рогова, В. Д. Юркевич // сб. науч. трудов НГТУ. – 2015. – № 3(81). – С. 43–54.

261. **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.

262. **Саймон, Д.** Алгоритмы эволюционной оптимизации / Д. Саймон. – М. : ДМК Пресс, 2020. – 940 с.

263. **Сакрутина, Е. А.** Идентификация систем на основе вейвлет-анализа / Е. А. Сакрутина, Н. Н. Бахтадзе // тр. XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. – М. : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 2868–2889.

264. **Самарский, А. А.** Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищев. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.

265. **Сви́режев, Ю. М.** Устойчивость биологических сообществ / Ю. М. Сви́режев, Д. О. Логофет. – М. : Наука, 1978. – 352 с.
266. **Сейдж, Э.** Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Э. Сейдж, Дж. Мелс. – М. : Связь, 1976. – 496 с.
267. **Серков, В. М.** Динамика концентрации ионов натрия и кальция в крови у восьмилинейного терпуга *Hexagrammos octogrammus Pallas* (Scorpaeniformes, Hexagrammidae) при изменении солености среды / В. М. Серков, М. С. Корниенко // Вопросы ихтиологии. – 2003. – № 1. – С. 139–141.
268. **Серков, В. М.** Структурные и функциональные особенности хлоридных клеток жаберного эпителия дальневосточной красноперки *Trybolodon brandti* (сем. Cyprinidae), адаптированных к воде различной солености / В. М. Серков, М. С. Корниенко // науч. тр. I Съезда физиологов стран СНГ. – М. : Медицина-здоровье, 2005. – С. 97.
269. **Сигнально-адаптивная система** управления асинхронным электроприводом / Е. С. Кучер, А. А. Блинов, Г. С. Сидоров, Н. С. Попов // Электротехника. – 2022. – № 5. – С. 24-29.
270. **Сиора, А. А.** (n,m)-версионные системы : таксономия, модели и технологии / А. А. Сиора, В. В. Скляр, В. С. Харченко // Вісник Харківського національного університету Серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2008. – № 833. – С. 231–246.
271. **Скляр, Б.** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.
272. **Смирнов, Ю.** Система управления тепловлажностной обработкой железобетонных изделий / Ю. Смирнов // Системная интеграция. Промышленность стройматериалов. – 2005. – №1. – С. 42–46.
273. **Современная прикладная теория управления.** Ч.1 : оптимизационный подход в теории управления / А. А. Колесников, А. А. Красовский, В. Н. Буков [и др.] ; под общ. ред. А. А. Колесникова. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. – 400 с.

274. **Тарасевич, Л. С.** Макроэкономика / Л. С. Тарасевич, П. И. Гребенников, А. И. Леусский. – М. : Высшее образование, 2006. – 654 с.

275. **Теория автоматического управления.** В 2-х ч. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова [и др.] ; под ред. А. А. Воронова. – Москва : Высшая школа, 1986. – 367 с

276. **Теория управления** (дополнительные главы) / под ред. Д. А. Новикова. – М. : Ленанд, 2019. – 552 с.

277. **Терехов, В.** Нейросетевые системы управления / В. А. Терехов, Д. В. Ефимов, И. Ю. Тюкин. – М. : Высшая школа, 2002. – 184 с.

278. **Техническая кибернетика. Теория автоматического управления.** Книга 1. Математическое описание, анализ устойчивости и качества систем автоматического регулирования / под ред. В.В. Солодовникова. – М. : Машиностроение, 1967. – 770 с.

279. **Тимофеев-Ресовский, Н. В.** Краткий очерк теории эволюции / Н. В. Тимофеев-Ресовский, Н. Н. Воронцов, А. В. Яблоков. – М. : Наука, 1977. – 303 с.

280. **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.

281. **Тищенко, А. К.** Унифицированная система энергоснабжения для космических аппаратов / А. К. Тищенко, П. Т. Ганкевич, Г. Д. Лившин // Энергия. Науч.-практ. вестник. – 1999. – №3. – С. 34–51.

282. **Толочко, О. И.** Анализ линейных систем с наблюдателями состояния / О. И. Толочко, П. Х. Коцегуб, Р. В. Федоряк // Вестник Харьковского государственного политехнического университета : сб. науч. тр. Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Харьков : ХГПУ, 2000. – Вып. 113. – С. 78–82.

283. **Толочко, О. И.** Сравнительный анализ методов гашения колебаний груза, подвешенного к механизму поступательного движения мостового крана /

О. И. Толочко, Д. В. Бажутин // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2010. – № 75. – С. 22–28.

284. **Турчин, В. Ф.** Феномен науки. Кибернетический подход к эволюции / В. Ф. Турчин. – М. : ЭТС, 2000. – 368 с.

285. **Уткин, В. И.** Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой / В. И. Уткин. – М. : Наука, 1974. – 272 с.

286. **Уткин, В. И.** Метод разделения движений в задачах наблюдения / В. И. Уткин // Автоматика и телемеханика. – 1990. – №3. – С. 27–37.

287. **Уткин, В. И.** Условно устойчивая система с переменной структурой в работе А. М. Лётова / В. И. Уткин // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 11. – С. 140–142.

288. **Файзрахманов, Р. А.** Математическое, алгоритмическое и программное обеспечение задачи расчета управляющих воздействий на основе нечеткой логики при моделировании перемещения груза в тренажере порталного крана / Р. А. Файзрахманов, А. А. Тютюных, И. С. Полевщиков // Инженерный вестник Дона. – 2022. – №1. – 11 с.

289. **Файстель, Р.** Эволюция гиперциклов Эйгена, протекающих в коацерватах / Р. Файстель, Ю. М. Романовский, В. А. Васильев // Биофизика. – 1980. – Т. 25, № 5. – С. 882–887.

290. **Федер, Е.** Фракталы / Е. Федер. – М. : Мир, 1991. – 254 с.

291. **Филимонов, Н. Б.** Гомеостатические системы и автомат ограничений состояния управляемых динамических объектов / Н. Б. Филимонов // Изв. вузов. Приборостроение. 1998. № 1–2. С. 17–34.

292. **Филимонов, А. Б.** Метод динамической коррекции и автономизация каналов управления в многосвязных системах на основе формализма линейно-квадратичной оптимизации / А. Б. Филимонов, Н. Б. Филимонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 12. – С. 2–6.

293. **Филимонов, А. Б.** Автомат ограничений управляемых динамических процессов / А. Б. Филимонов, Н. Б. Филимонов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3(140). – С. 155–161.

294. **Филимонов, Н. Б.** Проблема гомеостатического управления динамическими системами / Н. Б. Филимонов // Устойчивость и процессы управления : материалы III международной конференции. – СПб. : Изд. дом Федоровой Г. В. – 2015. – С. 97–98.

295. **Филимонов, Н. Б.** Методологический кризис «всепобеждающей математизации» современной теории управления / Н. Б. Филимонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 5. – С. 291–300.

296. **Фомин, В. Н.** Адаптивное управление динамическими объектами / В. Н. Фомин, А. Л. Фрадков, В. А. Якубович. – М. : Наука, 1981. – 448 с.

297. **Хайкин, С.** Нейронные сети : полный курс / С. Хайкин. – М. : Вильямс, 2006. – 1104 с.

298. **Хакен Г.** Синергетика / Г. Хакен. – М. : Мир, 1980. – 404 с.

299. **Хакен, Г.** Информация и самоорганизация : макроскопический подход к сложным системам / Г. Хакен. – М. : УРСС, 2014. – 320 с.

300. **Хаяси, Т.** Нелинейные колебания в физических системах / Т. Хаяси. – М. : Мир, 1968. – 432 с.

301. **Хорн, Р.** Матричный анализ / Р. Хорн, Ч. Джонсон. – М. : Мир, 1989. – 656 с.

302. **Царев, Р. Ю.** Минимизация межмодульного интерфейса при формировании мультиверсионного программного обеспечения / Р. Ю. Царев, О. И. Завьялова, Д. В. Капулин // Системы управления и информационные технологии. – 2011. – № 3.1. – С.140–143.

303. **Цветков, В. А.** Кибер-физические системы / В. А. Цветков // Международ. журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 6. – С. 64-65.

304. **Цыкунов, А. М.** Робастное управление нестационарными объектами / А. М. Цыкунов // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 2. – С. 117–125.

305. **Чадеев, В. М.** Цифровая идентификация нелинейных динамических объектов / В. М. Чадеев // Автоматика и телемеханика. – 2004. – № 12. – С. 85–93.

306. **Черемных, Ю. Н.** Качественное исследование оптимальных траекторий динамических моделей экономики. Вопросы магистральной теории / Ю. Н. Черемных. – М. : Изд-во Моск. университета, 1975. – 183 с.

307. **Черноусько, Ф. Л.** Мобильные роботы : проблемы управления и оптимизации движения / Ф. Л. Черноусько, Н. Н. Болотник, В. Г. Градецкий // XII Всероссийское совещание по проблемам управления. – М. : ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 67–78.

308. **Четвериков, С. С.** Проблемы общей биологии и генетики / С. С. Четвериков – Новосибирск : Наука, 1983. – 273 с.

309. **Чуличков, А. И.** Математические модели нелинейной динамики / А. И. Чуличков. – М. : Физматлит, 2003. – 296 с.

310. **Шалфеев, В. Д.** Хаотические колебания – генерация, синхронизация, управление / В. Д. Шалфеев, Г. В. Осипов, А. К. Козлов, А. Р. Волковский // Успехи современной радиоэлектроники (Зарубежная радиоэлектроника). – 1997. – №10. – С. 27–49.

311. **Шиняков, Ю. А.** Энергетический анализ структурных схем электроснабжения автоматических космических аппаратов / Ю. А. Шиняков // Изв. Томского политехнического университета. – 2006. – Т.309, №8. – С.152–155.

312. **Ширяев, А. Н.** Статистический последовательный анализ. Оптимальные правила остановки / А. Н. Ширяев. – М. : Наука, 1976. – 272 с.

313. **Ширяев, А. Н.** Вероятностно-статистические методы в теории принятия решений / А. Н. Ширяев. – М. : МЦНМО, 2014. – 144 с.

314. **Шустер, Г.** Детерминированный хаос / Г. Шустер. – М. : Мир, 1988. – 240 с.

315. **Щербаков, В. С.** Система пространственного гашения колебаний груза, перемещаемого мостовым краном / В. С. Щербаков, М. С. Корытов, Е. О. Вольф // Вестник СибАДИ. – 2014. – Вып.6(40). – С. 56–61.

316. **Эбелинг, В.** Физика процессов эволюции. Синергетический подход / В. Эбелинг, А. Энгель, Р. Файстель. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 328 с.

317. **Эйген, М.** Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул / М. Эйген. – М. : Мир, 1973. – 224 с.
318. **Эйген, М.** Игра жизни / М. Эйген, Р. Винклер. – М. : Наука, 1979. – 99 с.
319. **Эйкофф, П.** Основы идентификации систем управления / П. Эйкофф. – М. : Мир, 1975. – 680 с.
320. **Элтон, Ч.** Экология нашествий животных и растений / Ч. Элтон. – М. : Изд-во иностр. лит., 1960. – 231 с.
321. **Эльсгольц, Л. Э.** Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л. Э. Эльсгольц. – М. : Эдиториал УРСС, 2000. – 319 с.
322. **Эшби, У. Р.** Введение в кибернетику / У. Р. Эшби. – М. : Изд-во иностр. лит., 1959. – 432 с.
323. **Эшби, У. Р.** Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения / У. Р. Эшби. – М. : Изд-во иностр. лит., 1962. – 397 с.
324. **Яблоков, А. В.** Популяционная биология / А. В. Яблоков. – М. : Высш. шк., 1987. – 303 с.
325. **Abbott D.** The reasonable ineffectiveness of mathematics / D. Abbot // *Proc. of the IEEE*. –2013. – Vol. 101, no. 10. – P. 2147–2153.
326. **A historical survey of algorithms** and hardware architectures for neural-inspired and neuromorphic computing applications / C. D. James, J. B. Aimone, N. E. Miner [et al.] // *Biologically Inspired Cognitive Architectures*. – 2017. – Vol. 19. – P. 49–64.
327. **Anderson, P. W.** Suggested model for prebiotic evolution : the use of chaos / P. W. Anderson // *Proc. of the National Academy of Sciences of the USA*. – 1983. – Vol. 80, no. 11. – P. 3386–3390.
328. **Anti-sway techniques in feedback control loop** of a gantry crane system a comparative assessment of PD and PD-type fuzzy logic controller / M. A. Ahmad, A. N. K. Nasir, M. S. Najib, H. Ishak // *4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Xi'an. – 2009. – P. 2483–2487.

329. **Åström, K. J.** Feedback systems : an introduction for scientists and engineers / K.J . Åström, R. M. Murray. – New Jersey : Princeton University Press, 2021. – 528 p.
330. **Barabanov, I.** Dynamic models of informational control in social networks / I. Barabanov, N. Korgin, D. Novikov, A. Chkhartishvili // Automation and Remote Control. – 2010. – Vol. 71, no 11. – P. 2417–2426.
331. **Barker, G. R. I.** Multi-level analyses of associative recognition memory : the whole is greater than the sum of its parts / G. R. I. Barker, E. C. Warburton // Current Opinion in Behavioral Sciences. –2020. – Vol. 32. – P. 80–87.
332. **Barrett, D. G. T.** Analyzing biological and artificial neural networks : challenges with opportunities for synergy? / D. G. T. Barrett, A. S. Morcos, J. H. Macke // Current Opinion in Neurobiology. – 2019. – Vol. 55. – P. 55–64.
333. **Behe, M. J.** Darwin's black box / M. J. Behe // The Biochemical Challenge to Evolution. – N.Y. : Simon & Shuster, 1998. – 307 p.
334. **Benitez, V. H.** Pattern Classification and Its Applications to Control of Biomechatronic Systems / V. H. Benitez // In : Artificial Neural Networks for Engineering Applications. – London : Academic Press, Elsevier Ltd. – 2019. – P. 139–154.
335. **Bornhold, S.** Handbook of Graphs and Networks : From the Genome to the Internet / S. Bornhold, H. G. Shuster. – Weinheim : Wiley-VCH Gmbh & Co. KGaA, 2003. – 417 p.
336. **Bruss, F. T.** Sum the odds to one and stop / F. T. Bruss // The Annals of Probability. – 2000. – Vol. 28, no. 3. – P. 1384–1391.
337. **Burkov, V.** Introduction to theory of control in organizations / V. Burkov, M. Goubko, N. Korgin, D. Novikov. – New York : CRC Press, 2015. – 352 p.
338. **Cichy, R.M.** Deep neural networks as scientific models / R. M. Cichy, D. Kaiser // Trends in Cognitive Sciences. – 2019. – Vol. 23, no. 4. – P. 305–317.
339. **Command shaping for nonlinear crane dynamics** / D. Blackburn, W. Singhose, J. Kitchen, V. Patrangenaru, J. Lawrence // Journal of Vibration and Control. – 2010. – No. 16. – P. 477–501.

340. **Control of overhead crane based** on lyapunov approach to fuzzy controller synthesis / A. B. Sharkawy, K. A.F. Moustafa, H. El-Awady [et al.] // 23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD). Smolenice, Slovakia. – 2014. – P. 1–6.
341. **Convention on Biological Diversity** // Treaty Series. NY : United Nations. – 2001. – Vol. 1760. – I. Nos. 30690. – P. 79–307.
342. **Cope, E. D.** The primary factors of organic evolution / E. D. Cope. – Sydney : Wentworth Press, 2016. – 588 p.
343. **Crick, F. H.** The origin of the genetic code / F. H. Crick // J. of Molecular Biology. – 1968. – Vol. 38, No. 3. – P. 367–379.
344. **Criteria for diverse** actuation systems for nuclear power plants // International Atomic Energy Agency. – Vienna: IAEA ,2018. – P. 98.
345. **Cyber-Physical Systems: Foundations, Principles and Applications** / Ed. by H. Song, D. Rawat, S. Jeschke, C. Brecher. – N.Y. : Academic Press, 2017. – 514 p.
346. **Cyber-physical systems: industry 4.0 challenges** / Ed. by A. G. Kravets, A. A. Bolshakov, M. V. Shcherbakov // Studies in Systems, Decision and Control. – Cham, Switzerland : Springer Nature Switzerland AG. – 2020. – Vol. 260. –349 p.
347. **Davies, E. R.** Face detection and recognition : the impact of deep learning / E. R. Davies // In : V. Ferrari, M. Hebert, C. Sminchisescu, Y. Weiss (eds.) Computer Vision-ECCV 2018, 15th European Conference. – Munich, Germany. – 2018. – P. 631–662.
348. **Deep learning with conformal prediction** for hierarchical analysis of large-scale whole-slide tissue images / H. Wieslander, P.J. Harrison, G. Skogberg [et al.] // IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics. 2021. – No. 25(2). – P. 371–380.
349. **Di Carlo, J. J.** How does the brain solve visual object recognition? / J. J. Di Carlo, D. Zoccolan, N. C. Rust // Neuron. – 2012. –Vol. 73, no. 39. – P. 415–434.
350. **Diniz, P. S. R.** Adaptive filtering algorithms and practical implementation / P. S. R. Diniz – New York : Springer Science, Business Media, 2013. – 230 p.

351. **Dyson, F. J.** A model for the origin of life / F. J. Dyson // *J. of Molecular Evolution*. – 1982. – Vol. 18, No. 5. – P. 344–350.

352. **Effects of biodiversity** on ecosystem functioning : a consensus of current knowledge and needs for future research / D. U. Hooper, F. S. Chapin Iii, J. J. Ewel [et al.] // *Ecol. Monographs*. – 2005. – Vol. 75. – P. 3–35.

353. **Ennaceur, A.** Object novelty recognition memory / A. Ennaceur // *Handbook of Behavioral Neuroscience*. – 2018. – Vol. 27. – P. 1–22.

354. **Feedback limitations in nonlinear systems** : from Bode integrals to cheap control / M. M. Seron, J. H. Braslavsky, P. V. Kokotovic, D. Q. Mayne // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 1999. – Vol. 44, Iss. 4. – P. 829—833.

355. **Fisher, R. A.** The genetical theory of natural selection / R. A. Fisher. – Oxford : Oxford University Press, 1999. – 318 p.

356. **Forrest, J.** Modern trends in control theory: net-works, hierarchies and interdisciplinarity / J. Forrest, D. Novikov // *Advances in Systems Science and Application*. – 2012. – Vol. 12, no 3. – P. 1–13.

357. **Frazão, X.** Weighted convolutional neural network ensemble / X. Frazão, L. A. Alexandre // In : E. Bayro-Corrochano, E. Hancock (eds.) *Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications. CIARP 2014. Lecture Notes in Computer Science*. – Cham : Springer Nature Switzerland AG. – 2014. – Vol. 8827. – P.674–681.

358. **Freddi, A.** Model-based diagnostics and control of unmanned aerial vehicles : application to the quadrotor system / A. Freddi // *Ph. D. Dissertation. Universita Politecnica delle Marche Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze deiringegneria, Italy*. – 2012. – 95 p. 358.

359. **Galin, R. R.** Human-Robot Interaction Efficiency and Human-Robot Collaboration / R. R. Galin, R. V. Meshcheryakov // In: Kravets, A. (eds) *Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms. Studies in Systems, Decision and Control* – Cham: Springer, 2020. – Vol. 272. – P. 55-63.

360. **Garcia, C.** Model predictive control : theory and practice / C. Garcia, M. Prett // *Automatica*. 1989. – Vol. 25, Iss. 3. – P. 335–348.

361. **Giri, F.** Block-oriented nonlinear system identification / F. Giri, E.W. Bai. – Heidelberg : Springer, 2010. – 431 p.
362. **Golub, G. H.** Matrix computations / G. H. Golub, C. F. Van Loan. – Baltimore : The Johns Hopkins University Press, 2013. – 780 p.
363. **Gorbenko, A.** Using inherent service redundancy and diversity to ensure web services dependability / A. Gorbenko, V. Kharchenko, A. Romanovsky // In M. Butler, C. Jones, A. Romanovsky, E. Troubitsyna (Eds.) Methods, Models and Tools for Fault Tolerance, LNCS 5454, Springer. 2009. – Pp. 324–341.
364. **Goyal, A.** Recent named entity recognition and classification techniques : a systematic review / A. Goyal, V. Gupta, M. Kumar // Computer Science Review. – 2018. – Vol. 29. – P. 21–43.
365. **Hasler, M.** Synchronization of chaotic systems and transmission of information / M. Hasler // Int. Journ. Bifurcation and Chaos. – 1998. – Vol. 8, № 4. – P. 647–660.
366. **Hsu, L.** Bursting phenomena in continuous-time adaptive systems with a σ -modification / L. Hsu, R. R. Costa // Automatica. – 1998. – No. 1. – P. 429–435.
367. **Ioannou, P. A.** Instability analysis and improvement of robustness of adaptive control / P. A. Ioannou, P. V. Kokotović // Automatica. – 1984. – No. 5. – P. 583–594.
368. **Jackson, E. A.** Perspectives of nonlinear dynamics / E. A. Jackson. – Cambridge : Cambridge Univ. Press. Vol. I, 1989. – 495 p. Vol. II, 1990. – 633 p.
369. **Jacobs, G. H.** The evolution of primate color vision / G. H. Jacobs, J. Nathans // Scientific American. – 2009. – April. – P. 32–39.
370. **Jandel, M.** Biologically relevant neural network architectures for support vector machines / M. Jandel // Neural Networks. – 2014. – No. 49. – P. 39–50.
371. **Kandel, E. R.** The molecular and systems biology of memory / E. R. Kandel, Y. Dudai, M. R. Mayford // Cell. – 2014. – Vol. 157, no. 127. – P.163–186.
372. **Kanellakopoulos, I.** A toolkit for nonlinear feedback design / I. Kanellakopoulos, P. V. Kokotović, A. S. Morse // System and Control Letters. – 1992. – Vol. 18. – P. 83–92.

373. **Katopodes, N. D.** Turbulent flow / N. D. Katopodes // Free-Surface Flow. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2019. – P. 566–650.
374. **Kessler C.** Ein beitrag zur theorie mehrschleifiger regelungen // at-Automatisierungstechnik. – 1960. – Vol. 8, no. 1-12. – C. 261-266.
375. **Kharchenko, V. S.** Diversity-scalable decisions for FPGA-based safety-critical I&Cs : from theory to implementation / V. S. Kharchenko, A. A. Siora, E. S. Bakhmach // Proceedings of NPIC&HMIT 2009. – Knoxville, USA. – 2009. – V. 3. P.1494–1505.
376. **Kolesnikov, A. A.** Introduction of synergetic control / A. A. Kolesnikov // Proceedings of the American Control Conference ACC-2014. Portland, OR, USA. – 2014. – P. 3013—3016.
377. **Kolhe, P.** Dynamic pushing strategies for dynamically stable mobile manipulators / P. Kolhe, N. Dantam, M. Stilman // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010. – P. 3745–3750.
378. **Lacey, S.** Visuo-haptic object perception / S. Lacey, K. Sathian // In : Multisensory Perception. – London : Academic Press, Elsevier Ltd. – 2020. – P. 157–178.
379. **Landa, P. S.** Regular and chaotic oscillations / P. S. Landa. – Berlin : Springer-Verlag, 2001. – 397 p.
380. **Lee, E. A.** Introduction to embedded systems – a cyber-physical systems approach / E. A. Lee, S.A. Seshia. – Cambridge : MIT Press. – 2017 (Second Edition). – 564 p.
381. **Li, J.** Alternative approach to solving computer vision tasks using graph structures / J. Li, M. Makarychev, A. Popov // In : A. Kravets, A. Bolshakov, M. Shcherbakov (eds) Cyber-Physical Systems : Industry 4.0 Challenges. Studies in Systems, Decision and Control. – Cham : Springer Nature Switzerland AG. – 2020. – Vol. 260. – P. 63–78.
382. **Lion, P. M.** Rapid identification of linear and nonlinear systems / P. M. Lion // AIAA. – 1967. – No. 5. – P. 1835–1842.

383. **Loreau, M.** Biodiversity and ecosystem functioning : current knowledge and future challenges / M. Loreau, S. Naeem, P. Inchausti et al. // *Science*. – 2001. – Vol. 294. – P. 804–808.

384. **Mandelbrot, B. B.** Fractional brownian motions, fractional noises and application / B. B. Mandelbrot, J. W. Van Ness // *SIAM Rev.* – 1968. – No. 10. – Pp. 422–437.

385. **Manneville, P.** Dissipative structures and weak turbulence / P. Manneville. – London : Academic Press, 1990. – 448 p.

386. **Mauricio, V.** Modelamiento, simulacion y hallazgo de modelos linealizados a partir de tecnicas de identificacion de un cuatrirrotor / V. Mauricio // Presentado al departamento de ingenieria electrica en cumplimiento de los requisitos para el grado de Master en ingenieria electrica. – 2009. – Vol. 2, no. 2. – P. 23–26. [In Spanish]

387. **Mechanism design and management** : mathematical methods for smart organizations / Ed. by Prof. D. Novikov. – New York : Nova Science Publishers, 2013. – 163 p.

388. **Meshalkin, V.** Deep neural networks application in models with complex technological objects / V. Meshalkin, A. Puchkov, M. Dli, Y. Lobaneva // In : A. Kravets, A. Bolshakov, M. Shcherbakov (eds) *Cyber-Physical Systems : Advances in Design & Modelling. Studies in Systems, Decision and Control*. – Cham : Springer Nature Switzerland AG. – 2020. – Vol. 259. – P. 291–300.

389. **Multilayer in-place learning networks** for modeling functional layers in the laminar cortex / J. Weng, T. Luwang, H. Lu, X. Xue // *Neural Networks*. – 2008. – No. 21. – P. 150–159.

390. **Morar, I.** Model simplification of an un-manned aerial vehicle / I. Morar, I. Nascu // *Proceeding of the IEEE International Conference on Automation Quality and Testing Robotics (AQTR)*, Cluj-Napoca. – 2012. – P. 591– 596.

391. **Nagarajan, U.** Integrated planning and control for graceful navigation of shape-accelerated underactuated balancing mobile robots / U. Nagarajan, G.A.

Kantor, R. Hollis // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2012. – P. 136–141.

392. **Nikolaos, D.** Turbulent mixing and dispersion / D. Nikolaos, N. D. Katopodes // Free-Surface Flow. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2019. – P. 840–907.

393. **Nixon, M. S.** Distance, classification and learning / M. S. Nixon, A. S. Aguado // In : Feature Extraction and Image Processing for Computer Vision. – London : Academic Press, Elsevier Ltd. – 2020. – P. 571–604.

394. **Novikov, D.** Control Methodology / D. Novikov. – New York : Nova Science Publishers, 2013. – 76 p.

395. **Novikov, D.** Theory of control in organizations / D. Novikov. – New York : Nova Science Publishers, 2013. – 341 p.

396. **Ott, E.** Controlling chaos / E. Ott, C. Grebogi, J. Yorke // Physical Review Letters. – 1990. – Vol. 64, № 11. – P. 1196–1199.

397. **Pecora, L.** Synchronization in chaotic systems / L. Pecora, T. Carroll // Physical Review Letters. – 1990. – Vol. 64, № 9. – P. 821–824.

398. **Pena, M.** Identification of an unstable nonlinear system : quadrotor / M. Pena, A. Luna, C. Rodriguez // International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering. – 2014. – Vol. 8, no 2. – Pp. 307–315.

399. **Perceptual Phenomena in Destructured Sensory Fields** : Probing the Brain's Intrinsic Functional Architectures / V. Miskovic, S. J. Lynn, J. O. Bagg [et al.] // Neuroscience & Biobehavioral Reviews. – 2019. – Vol. 98. – P. 265–286.

400. **Peskir, G.** Optimal stopping and free-boundary problems / G. Peskir, A. Shiryaev. – Basel : Birkhäuser. – 2006. – 500 p.

401. **Pitas, I.** Graph-Based social media analysis / I. Pitas. – Boca Raton, Florida : CRC Press, 2016. – 442 p.

402. **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.

403. **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.

404. **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.

405. **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), 2019. International Conference. 05-09 October 2015. Saint-Petersburg : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). – 2015. – P. 120–122.

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

407. **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. 7–9 November 2016, Krasnoyarsk, Russia. – Krasnoyarsk, London : IOP Publishing. – 2017. – P. 103–110.

408. **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.

409. **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”. 17–19 December 2018, Voronezh, Russian Federation – 2018. – Vol. 1203, 012057. – 10 p.

410. **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). 9-16 September, 2018. Sochi. – 2018, 8501727. – 6 p.

411. **Podvalny, S. L.** Aggregate control of an unmanned aerial vehicle / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // Proceedings of the 6th International Conference on Nonlinear Analysis and Extremal Problems (NLA-2018). 25-30 June 2018, Irkutsk. – Irkutsk : ISDCT SB RAS, 2018. – P. 109–111.

412. **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”. 18-21 April, 2018, St. Petersburg, Russia. – 2018. – Vol. 161, 02023. – 6 p.

413. **Podvalny, S. L.** Adaptive evolution as a biological analogue of sustainable energy technologies / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // E3S Web of Conferences, International Science Conference SPbWOSCE-2018 “Business Technologies for Sustainable Urban Development”. 10-12 December, 2018, St. Petersburg, Russia.– 2019. – Vol. 110, 02076. – 9 p.

414. **Podvalny, S. L.** Analytical synthesis of aggregated regulators for unmanned aerial vehicles / S. L. Podvalny, E. M. Vasiljev // Journal of mathematical sciences. New York (Springer). – 2019. – V. 239, no. 2. – P.135–145.

415. **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. 8-14 September, 2019. Sochi. – 2019. – P. 1–6.

416. **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. 25-29 March 2019, Sochi. –2019, 8742942. – 5 p.

417. **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). 20-22 September 2017, Moscow, Russia. – 2019, 8687074. – 5 p.

418. **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). 16-18 September 2020, Voronezh. – 2020. – Vol. 1035, 012046. – 7 p.

419. **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 Conference Proceedings : 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA-2019). 20-22 November, 2019, Lipetsk – 2020. – P. 169–174.

420. **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 "FarEastCon 2019". 1-4 October 2019, Vladivostok, Russian Federation. Smart Innovation, Systems and Technologies. – Singapore : Springer Verlag, 2020. – Vol. 172. – P. 125–137.

421. **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". 17-20 April 2019, Kursk, Russia. Smart Innovation, Systems and Technologies – Singapore : Springer, 2020. – Vol. 154. – P. 643–654.

422. **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. International scientific conference CYBERPHY-2019, 3-7 June 2019, St. Petersburg, Russia. – Cham : Springer, 2020. – Vol. 259. – P.167–178.

423. **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, 03-06 Sept. – 2019. – IEEE Xplore Proceedings, 2020. – P.316–321.

424. **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.* 11-13 November 2019, Voronezh, Russian Federation. – 2020. – Vol. 1479, 012109. – P. 1–13.

425. **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.* International scientific conference CYBERPHY-2020, 14-18 Sept. 2020, Kazan, Russia.– Cham : Springer. – 2021. – Vol. 350. – P. 237–247.

426. **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.

427. **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), 31 May - 6 June 2021, Divnomorskoe, Russia.* – *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.

428. **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).* Sochi, Russian Federation – Publisher: IEEE, 2022. – P. 520–525.

429. **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). 4-10 Sept. 2022. Sochi, Russian Federation. Publisher: IEEE, p. 69-74.

430. **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.

431. **Proletarsky, A. V.** Adaptive filtering for navigation systems of robot-aerocraft / A. V. Proletarsky, K. A. Neusipin // Science & military. – 2010. – Vol. 5. – P. 75–80.

432. **Rajeev, A.** Principles of Cyber-Physical Systems / A. Rajeev – Massachusetts: The MIT Press, 2017. – 459 p.

433. **Rokhsar, D. S.** Selforganisation in prebiological system : Simulations of model for the origin of genetic information / D. S. Rokhsar, P. W. Anderson, D. L. Stein // J. of Molecular Evolution. – 1986. – Vol. 23, no. 2. – P. 119–126.

434. **Roy, R.** Dynamical control of a chaotic laser : Experimental stabilization of a globally coupled system / R. Roy, E. Hunt, T. W. Murphy // Physical Review Letters. – 1992. – Vol. 68, № 9. – P. 1259–1262.

435. **Samarskii, A. A.** Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics / A. A. Samarskii, P. N. Vabishchevich. – Berlin-New York : Walter de Gruyte, 2007. – 438 p.

436. **Sanes, J. R.** Synaptic specificity, recognition molecules, and assembly of neural circuits / J. R. Sanes, S. L. Zipursky // Cell. – 2020. – Vol. 181, no. 330. – P. 536–556.

437. **Sewards, T. V.** Neural structures and mechanisms involved in scene recognition : a review and interpretation / T. V. Swards // Neuropsychologia. – 2011. – Vol. 49, no. 3. – P. 277–298.

438. **Skiena, S. S.** The algorithm design manual / S. S. Skiena. – London : Springer, 2008. – 730 p. 438.

439. **Smart city: Cyber-physical systems modeling features** / N. A. Fomin, R. V. Meshcheryakov, A. Y. Iskhakov, Y. Y. Gromov // In: A. G. Kravets, A. A.

Bolshakov, M. V. Shcherbakov (eds). *Society 5.0: Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. Studies in Systems, Decision and Control.* – Cham: Springer, 2021. – V. 333. – P. 75-90.

440. **Smith, M. J.** *Evolution and the theory of games* / M. J. Smith. – Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1982. – 234 p.

441. **Stilman, M.** *Golem krang : dynamically stable humanoid robot for mobile manipulation* / M. Stilman, J. Olson, W. Gloss // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation.* – 2010. – P. 3304–3309.

442. **Structural asymmetry and the stability** of diverse food webs / N. Rooney, K. McCann, G. Gellner, J. C. Moore // *Nature.* – 2006. –V. 442. – P. 265–269.

443. **Taillard, E. D.** *Comparison of iterative searches for the quadratic assignment problem* / E. D. Taillard // *Location Science.* – 1995. – № 3. – P. 87–105.

444. **Taillard, E. D.** *Robust tabu search for the quadratic assignment problem* / E. D. Taillard // *Parallel Computing.* – 1991. – No. 17. – P. 443–455.

445. **Tanimoto, J.** *Fundamentals of evolutionary game theory and its applications* / J. Tanimoto. – Tokyo, Japan : Springer Verlag, 2016. – 214 p.

446. **The origin of genetic information** / M. Eigen, W. Gardiner, P. Schuster, R. Winkler-Oswatich // *Scientific American.* – 1981. – Vol. 244, no. 4. – P. 88–118.

447. **The system for operational monitoring** and analytics of industry cyber-physical systems security in fuel and energy domains based on anomaly detection and prediction methods / N. V. Nashivochnikov, Alexander A. Bolshakov, A. A. Lukashin, M. Popov // In : A. Kravets, A. Bolshakov, M. Shcherbakov (eds) *Cyber-Physical Systems : Industry 4.0 Challenges. Studies in Systems, Decision and Control* – Cham : Springer Nature Switzerland AG. – 2020. – Vol. 260. – P. 277–288.

448. **Tilman D.** *Causes, consequences and ethics of biodiversity* / D. Tilman // *Nature.* – 2000. – Vol. 405. – P. 208–211.

449. **Tishchenko, A. K.** *Analysis and synthesis of control systems for spacecraft solar arrays* / A. K. Tishchenko, E. M. Vasiljev, A. O. Tishchenko // *Machines.* – 2020. – Vol. 8, no. 4. – P. 1-24.

450. **Vincent, T. L.** Evolutionary game theory, natural selection and Darwinian dynamics / T. L. Vincent, J. S. Brown. – Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2005. – 382 p.
451. **Wang, W. X.** Data based identification and prediction of nonlinear and complex dynamical systems / W. X. Wang, Y-C. Lai, C. Grebogi // *Physics Reports*. – 2016. – No. 644. – P. 1–76.
452. **Weibull, J.** Evolutionary game theory / J. Weibull. – Cambridge, UK : The MIT Press, 1995. – 265 p.
453. **White, D. H.** A theory for the origin of a self-replicating chemical system. Natural selection of the autogen from short random oligomers / D. H. White // *J. of Molecular Evolution*. – 1980. – Vol. 16, no. 2. – P. 121–147.
454. **Wichterle, K.** Extension of balances to turbulent flows / K. Wichterle, M. Večeř // *Transport and Surface Phenomena. Chapter Sixteen*. – Amsterdam : Elsevier, 2020. – P. 211–218.
455. **Wichterle, K.** Solutions of the Navier-Stokes equation / K. Wichterle, M. Marek // *Transport and surface phenomena*. – Amsterdam : Elsevier, 2020. – P. 109–119.
456. **Yao, B.** Adaptive robust control of SISO nonlinear system in a semi-strict feedback form / B. Yao, M. Tomizuka // *Automatica*. – 1997. – № 5. – P. 893–900.
457. **Zhou, Y.** Rayleigh–Taylor and Richtmyer–Meshkov instability induced flow, turbulence, and mixing. I. / Y. Zhou // *Physics Reports*. – 2017. – Vol. 720–722. – P. 1–136.
458. **Zinchuk, V. M.** Synthesis and analysis of algorithms for multi-alternative detection and estimation of signal under the conditions of a priory uncertainty / V. M. Zinchuk, Yu. G. Sosulin, O. A. Krynina // *Theory and Methods of Signal Processing*. – 2010. – Vol. 55, no 5. – P. 577–588.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Акты об использовании результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «Орбита», г. Воронеж

Романов О.П.



«03» 2023 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
на соискание учёной степени доктора технических наук

Васильева Евгения Михайловича

«Модели и методы многоальтернативного управления сложными объектами
в критических режимах на основе эволюционного подхода»

Результаты диссертационной работы Васильева Евгения Михайловича в части моделирования и исследования системы электроснабжения научно-энергетического модуля Международной космической станции внедрены в практическую деятельность АО «Орбита» (г. Воронеж), используются при отладке существующих и разработке перспективных систем электроснабжения космических аппаратов, и позволяют повысить качество и надёжность систем управления указанными системами.

Начальник отдела систем электропитания

A handwritten signature in blue ink, likely belonging to A.K. Tishchenko.

А.К. Тищенко

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель Генерального директора
директор филиала АО "Концерн Росэнергоатом"
"Нововоронежская атомная станция",
доктор технических наук



В.П. Поваров

«29» 03 2023 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
на соискание учёной степени доктора технических наук
Васильева Евгения Михайловича

Результаты диссертационной работы Васильева Е.М. «Модели и методы многоальтернативного управления сложными объектами в критических режимах на основе эволюционного подхода», могут быть использованы для разработки внутриотраслевого стандарта построения диверсных систем защиты и предотвращения аварийных ситуаций.

К этим результатам относятся методология построения высоконадёжных систем управления на основе эволюционных принципов многоальтернативности, в рамках которой разработаны:

– 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 гомеостазиса;

– 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;

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

Ожидаемый эффект от реализации перечисленных принципов в системах защиты состоит в предотвращении каскадного нарастания аварийных ситуаций в критических режимах технологических систем и в обеспечении их живучести при частичных отказах.

Зам. главного инженера
по электротехническому
оборудованию

Начальник цеха тепловой
автоматики и измерений

Д.А. Ширяев

А.А. Самодеенко



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО **ИРКОС**

Почта: Россия, 129626, Москва, а/я 30
 Офис: Россия, 129085, Москва,
 Звездный б-р, д. 21

Телефоны: (495) 615-7302, 615-0838 (тел/факс)
 E-mail: info@ircos.ru
 Интернет: www.ircos.ru

УТВЕРЖДАЮ

Директор ОСП АО «ИРКОС»,

г. Воронеж



 А. В. Ашихмин

03 2023 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
 «Модели и методы многоальтернативного управления сложными объектами
 в критических режимах на основе эволюционного подхода»
 Васильева Евгения Михайловича
 на соискание учёной степени доктора технических наук

Результаты диссертационной работы Васильева Е. М., в том числе представленные в диссертации эволюционные принципы многоальтернативного строения и функционирования сложных систем:

принцип разделения функций подсистем, позволяющий повысить качество работы каждой подсистемы и декомпозицию управления общей сложной системы по её частям;

принцип модульности, обеспечивающий комбинаторное разнообразие структурных вариантов системы;

принцип многоуровневости, обеспечивающий автоматическую передачу управления между иерархическими уровнями сложной системы в зависимости от текущего состояния системы, предоставляет методологию разработки крупных автоматизированных систем радиоконтроля и её компонентов.

Результаты работы используются в ОСП АО «ИРКОС» для оценок влияния на надёжность работы автоматизированной системы радиоконтроля при интеграции новых компонентов. Данная возможность способствует уменьшению затрат на обеспечение надёжности функционирования системы в условиях её постоянного эволюционного развития.

Директор по научной работе АО «ИРКОС», к.т.н.  В. А. Козьмин

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «Новые информационные
системы-21», г. Воронеж

М.И. Чудинов

2023 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
Васильева Евгения Михайловича
на соискание учёной степени доктора технических наук

Результаты диссертационной работы Васильева Е.М. «Модели и методы многоальтернативного управления сложными объектами в критических режимах на основе эволюционного подхода», в том числе, предложенные автором:

модель активной нейросети фасетного типа, воспроизводящая последовательность возбуждений ансамблей нейронов в биологической нервной системе;

алгоритм обучения активной нейросети, обеспечивающий расширение структуры сети без искажения сформированной ранее системы связей;

нейросетевая модель системы управления распределённой энергосистемой в критических режимах её функционирования;

используются в разработках подсистем диспетчерского контроля электрической сети Россети центр Воронежэнерго, и позволяют повысить надёжность обеспечения электроэнергией потребителей в сети и снизить влияние человеческого фактора на процесс принятия решений в нештатных ситуациях.

Главный инженер

Меркулов В.И.

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «СТК-Бетон»

 Фошин А.М.

«12» мая 2023 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы

Васильева Евгения Михайловича

«Модели и методы многоальтернативного управления сложными объектами
в критических режимах на основе эволюционного подхода»

Результаты исследований, полученные в диссертационной работе Васильева Е.М., в частности, предложенный многоальтернативный подход к управлению сложными объектами с критическими режимами работы, предусматривающий многоканальную передачу управления с разделением функций между каналами, принят для реализации в технологическом процессе тепловлажностной обработки железобетонных изделий.

Использование многоальтернативной структуры системы управления этим процессом позволяет снизить эксплуатационные расходы на содержание и ремонт исполнительных механизмов, регулирующих подачу пара, и повысить точность поддержания технологических параметров указанного процесса.

Главный инженер



Звягин А.В.

АО «Концерн «Созвездие»



Акционерное общество
«Воронежское центральное
конструкторское бюро «Полус»

394019, г. Воронеж,
ул. Красnodонская, 16 Б
тел./факс (473) 276-24-60
E-mail: polus@vckb.vsi.ru

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор
АО «ВЦКБ «Полус»

А. В. Кузнецов

30.10.2023 № 661/4582

На _____ от _____ г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
на соискание учёной степени доктора технических наук
Васильева Евгения Михайловича

Комиссия в составе: председателя – заместителя генерального директора Рожненко Сергея Николаевича, членов комиссии: и. о. начальника научно-тематического отдела Федулова Романа Викторовича, начальника конструкторского отдела Гайворонского Сергея Александровича, составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Васильева Е.М. «Модели и методы многоальтернативного управления сложными объектами в критических режимах на основе эволюционного подхода» такие, как структура, математическая и имитационная модели хаотической системы связи, имеют перспективу применения для разработки высоконадёжных прямохаотических систем широкополосной связи с защищёнными каналами, функционирующих в условиях помех.

В частности, практический интерес представляют разработанные автором модели генератора хаотических колебаний с разными видами аттракторов, модель приёмника хаотического сигнала в виде наблюдателя координат состояния системы с сигнальной адаптацией, а также результаты экспериментального исследования предложенной системы связи на имитационной модели.

Председатель комиссии:

Члены комиссии:

С. Н. Рожненко

Р.В. Федулов

С. А. Гайворонский

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор по науке
ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет»

доктор технических наук, профессор
Дроздов Игорь Геннадьевич



2023 г.

АКТ

об использовании в учебном процессе материалов докторской диссертации
«Модели и методы многоальтернативного управления сложными объектами
в критических режимах на основе эволюционного подхода» к.т.н., доцента
кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах
Васильева Евгения Михайловича

Результаты исследований, полученные Васильевым Е.М. и изложенные в
диссертационной работе, внедрены в учебный процесс при реализации
образовательных программ по подготовке бакалавров по направлению 27.03.04 –
«Управление в технических системах» и магистров по направлению 27.04.04 –
«Управление в технических системах» в рамках дисциплин:

- «Математические методы системного анализа»;
- «Исследование операций»;
- «Теория автоматического управления»;
- «Интеллектуальные технологии управления»;
- «Управление в условиях неопределённости»,

используются при курсовом и дипломном проектировании по указанным
направлениям, а также отражены в учебных пособиях «Теория систем и
системный анализ» (рекомендовано УМО вузов РФ), «Математические методы
системного анализа» (рекомендовано УМО вузов РФ), «Вариационные методы
оптимального управления».

Начальник учебно-методического управления ВГТУ

Мышовская Л.П.

Заведующий кафедрой электропривода, автоматики
и управления в технических системах ВГТУ
доктор технических наук, профессор

Бурковский В.Л.