

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

На правах рукописи

Агапов Александр Андреевич

Синтез интеллектуальных алгоритмов управления транспортными системами
с использованием квазиоптимальных законов и нечеткого логического
вывода

2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Костоготов Андрей Александрович

Ростов-на-Дону – 2023

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Состояние вопроса и постановка задачи исследования.....	15
1.1 Анализ применения алгоритмов управления в интеллектуальных транспортных системах.....	15
1.2 Современные методы синтеза алгоритмов управления в интеллектуальных транспортных системах.....	19
1.3 Математическая постановка задачи синтеза интеллектуальных алгоритмов управления.....	26
1.4 Выводы по главе	28
2 Синтез квазиоптимальных законов управления.....	29
2.1 Метод синтеза квазиоптимальных законов управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности	29
2.2 Структурный синтез квазиоптимальных законов на основе условия максимума функции обобщенной мощности	34
2.3 Выводы по главе	46
3 Синтез интеллектуальных алгоритмов управления	48
3.1 Синтез интеллектуального алгоритма управления с нечетким логическим выводом	48
3.2 Синтез интеллектуального алгоритма управления нелинейными системами с несколькими степенями свободы.....	57
3.3 Синтез интеллектуального алгоритма на основе интеллектуализации многорежимного алгоритма управления	64
3.4 Выводы по главе	70
4 Анализ эффективности синтезированных интеллектуальных алгоритмов.....	71

4.1 Анализ эффективности интеллектуального алгоритма управления угловым движением беспилотного летательного аппарата.....	71
4.2 Анализ эффективности синтезированного интеллектуального алгоритма в системе автоматического управления скорости пассажирского электровоза	76
4.3 Выводы по главе	88
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	89
Список сокращений и условных обозначений	92
Список литературы	93
Приложение А. Листинги программ	115
A1 Программа настройки параметров системы управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности для объекта типа «обратный маятник на тележке»	115
A2 Программа настройки параметров многорежимного нелинейного регулятора на основе условия максимума функции обобщенной мощности для квазиоптимальных режимов работы и анализа их эффективности	119
A3 Программа обработки экспериментальных данных изменения состояния нелинейного объекта управления типа «квадрокоптер» под действием системы управления.....	124
A4 Программа моделирования системы типа двойной маятник	128
A5 Программа моделирования системы типа маятник на тележке .	136
A6 Программа моделирования интеллектуального алгоритма управления динамической системой.....	142
Приложение Б. Акты реализации	146

ВВЕДЕНИЕ

В мировой практике интеллектуальные транспортные системы признаны как общая транспортная идеология интеграции достижений телематики во все виды транспортной деятельности для решения проблем экономического и социального характера – сокращения аварийности, повышения эффективности общественного транспорта и грузоперевозок, обеспечения общей транспортной безопасности, улучшения экологических показателей.

Интеллектуальная транспортная система (ИТС) – система, интегрирующая современные информационные, коммуникационные и телематические технологии, технологии управления и предназначенная для автоматизированного поиска и принятия к реализации максимально эффективных сценариев управления транспортно-дорожным комплексом региона, конкретным транспортным средством или группой транспортных средств с целью обеспечения заданной мобильности населения, максимизации показателей использования дорожной сети, повышения безопасности и эффективности транспортного процесса, комфорта для водителей и пользователей транспорта [1].

Определение требований к функциональной и физической архитектурам интеллектуальных транспортных систем позволяет обеспечивать их построение в соответствии с реальными потребностями пользователей ИТС, снизить капитальные затраты и повысить эффективность системы в целом, определить оптимальный набор необходимых решений для первоначального внедрения и разработать план последующего развития или модернизации системы.

Развитие интеллектуальных транспортных систем становится одним из важнейших инструментов повышения конкурентоспособности транспортного комплекса и экономики в целом. Сегодня именно технологии транспортных процессов становятся основным инструментом в повышении эффективности работы транспортного комплекса. ИТС активно развиваются в России в последние годы, активизирована работа в данном направлении Министерством транспорта Российской Федерации, разработана Концепция развития

интеллектуальных транспортных систем в Российской Федерации. Формируется нормативная база создания и функционирования ИТС, прежде всего стандарты по ИТС [2].

Так, в «Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» указано, что внедрение интеллектуальных транспортных систем является необходимым условием развития магистральной инфраструктуры агломераций. Достижение цели, предусматривающей цифровую трансформацию отрасли и ускоренное внедрение новых технологий, обеспечит повышение качества транспортно-логистических услуг (повышение доступности и скорости, снижение стоимости), развитие бесшовных внутрироссийских и международных перевозок, их безопасность и надежность (устойчивость к особым внешним условиям), а также снизит нагрузку на окружающую среду. Кроме того, ряд инициатив в рамках цифровой трансформации способствует развитию таких импортозамещающих производств, как машиностроение, электроника, разработка программного обеспечения. Это позволит стимулировать экономическое развитие, а также повысить качество жизни населения.

Помимо прочего, достижение указанной цели, согласно «Транспортной стратегии», создаст условия для роста производительности труда минимум в 2 раза к 2035 году, в первую очередь за счет технологий автономного вождения, автоматизации процессов управления на основе прогнозной аналитики, построенной на применении искусственного интеллекта. Внедрение новых транспортных и информационных технологий, систем автоматического вождения, автоматизированных систем управления, контроля и позиционирования также является одной из рассматриваемых мер по снижению объема выбросов углекислого газа.

Одной из важнейших отраслей, в которой идет процесс формирования интеллектуальных транспортных систем, интегрирующих комплекс научных направлений, которые включают в себя теорию управления, системный анализ и др. [3], является железная дорога, что отражено в нескольких документах,

подтверждающих актуальность данной задачи и включающих в себя планы развития данной области.

В «Транспортной стратегии» указано, что в транспортных стратегиях стран с высокоразвитыми транспортными системами в качестве одного из приоритетов выбрана задача развития новых технологий и решений: развитие инновационной железнодорожной инфраструктуры, подвижного состава и систем управления.

Другой бурно развивающейся отраслью, в которой идет процесс формирования ИТС, является отрасль беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) как для доставки грузов, так и для автономного перемещения съемочного оборудования в задаче мониторинга функционирования транспортных систем и инфраструктуры [4]. В «Транспортной стратегии до 2030 года» отмечена необходимость внедрения технологий систем управления автономными БПЛА для доставки грузов. Данное направление считается особо значимым, о чем также свидетельствует значительный рост мирового объема продаж гражданских беспилотных воздушных судов с 2,5 млн в 2016 году до 7 млн в 2020 году. К 2030 году (а также в прогнозе до 2035 года) ожидается дальнейшее повышение скорости, качества и удобства грузовых отправок за счет расширенного применения современных технологий, в том числе рост доли беспилотных воздушных средств для перевозок в направлении удаленных и труднодоступных территорий до 50 процентов, и перевод существенной доли доставки в рамках онлайн-торговли на дроны (БПЛА) и роботов-курьеров. При этом существует проблема сохранения устойчивости БПЛА при резких внешних воздействиях, что было отмечено на совещании компании РЖД «Новое звено 2020», в связи с чем экспертами отрасли была определена необходимость реализации возможности управления угловым движением БПЛА для обеспечения повышения устойчивости к резким внешним воздействиям.

Применение беспилотных технологий на транспорте позволит повысить безопасность и эффективность процессов, реализуемых в составе интеллектуальной транспортной системы [2], что в свою очередь требует совершенствования бортовых средств автоматического управления отдельными

транспортными элементами ИТС [5]. Однако темпы развития ИТС в нашей стране явно не соответствуют потребностям экономики и населения. Следует отметить, что работы по созданию отечественных ИТС пока существенно отстают от ситуации в Евросоюзе, США и Японии [2].

Вышесказанное позволяет определить следующую **практическую проблему**: формирование полноценной ИТС требует наличия интеллектуальных алгоритмов управления, позволяющих быстро реагировать на изменения условий функционирования управляемого объекта и обеспечивающих высокую эффективность с учетом современных требований.

К тому же указанная проблема осложняется наличием зарубежных систем автоматического управления (САУ) БПЛА и САУ скоростью поезда, что в современных условиях импортозамещения требует разработки отечественного программного обеспечения таких систем. Например, в локомотиве ЭП20 «Олимп» система автоматического управления скоростью разработана специалистами французской компании Alstom в формате «черного ящика», что исключает возможность свободного использования данной системы в других локомотивах. ЭП20 является частью масштабной программы разработки электровозов нового поколения с тяговым асинхронным двигателем, что свидетельствует о важности решения задач автоматического управления с применением отечественного программного обеспечения.

Современная теория управления развивается в условиях повсеместного внедрения автоматических систем управления. Расширение области применения этих систем, а также усложнение объектов управления приводят к необходимости учета новых требований к системам управления [6].

На сегодняшний день представлены работы по разработке систем управления в различных областях, среди которых можно выделить управление летательными аппаратами [7–23], системы управления на железной дороге, включая управление поездом и управление системами электроснабжения [24–27], управление водным транспортом [28–30], управление роботами [31–35] и др. [36–46].

Во многих областях техники и промышленности в качестве объектов управления рассматриваются электромеханические системы, динамика которых описывается дифференциальными уравнениями Лагранжа 2-го рода. Очень часто параметры системы (массы, геометрические характеристики и т. д.) неизвестны или определены лишь с некоторой погрешностью. Кроме того, система может испытывать действие неконтролируемых возмущений [47]. К таким объектам можно отнести, например, мультироторные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) – квадрокоптеры, для которых значительный интерес представляют задачи оптимального управления [48].

Вопросы разработки интеллектуальных алгоритмов рассматривали Ф.Ф. Пащенко, Ю.И. Кудинов, С.В. Жанказиев, И.Н. Розенберг, В.Я. Цветков, Jienan Chen, Yue-Jiao Wang, Zhong Ma, Jose F. Gomez, Mo M. Jamshidi и др. Нечеткие системы рассматривали Ю.Н. Хижняков, С.А. Агеев, И.Б. Саенко, И.В. Котенко, С.М. Ковалев, А.И. Долгий, А.Е. Колоденкова, М.С. Голосовский, Nizam Uddin Ahamed, Carolina Nicolas, Rufaida Hussain, Rasha Massoud и др. Вопросы оптимального и квазиоптимального управления рассматривали Е.С. Пятницкий, Н.Н. Красовский, А.М. Формальский, Ф.Л. Черноусько, И.М. Ананьевский, С.А. Решмин и др. Теория оптимального управления базируется на работах А.А. Фельдбаума, Л.С. Понтрягина, Л.И. Розоноэра, результатом которых стало создание общей теории оптимального управления в форме «принципа максимума Л.С. Понтрягина» [49].

Однако, как указано в [50], практическое использование принципа максимума Л.С. Понтрягина при создании оптимальных систем требует решения двухточечной краевой задачи, в общем случае она аналитически неразрешима, а ее численное решение связано с вычислительными трудностями, с помощью принципа максимума решаются задачи программного управления, а результаты синтеза оптимальных управлений известны лишь для редких случаев. Для снижения сложности задачи нелинейного синтеза могут быть использованы методы квазиоптимального синтеза [50].

Функционирование объектов управления в различных режимах движения требует адаптации закона управления под каждый режим, что в совокупности с наличием различного вида неопределенности вызывает необходимость применения методов построения интеллектуальных алгоритмов управления, одним из которых является аппарат нечеткой логики [51].

Вышесказанное позволяет сделать вывод об **актуальности научной задачи** – синтеза интеллектуальных алгоритмов управления транспортными системами с использованием квазиоптимальных законов и нечеткого логического вывода.

Объект исследования – управляемые динамические транспортные системы.

Предмет исследования – интеллектуальные алгоритмы управления на основе квазиоптимальных законов управления и нечеткого логического вывода.

Цель исследования – повышение эффективности систем управления транспортными системами за счет синтезированных интеллектуальных алгоритмов на основе применения научно обоснованного подхода квазиоптимального синтеза и нечеткого логического вывода.

Частные задачи исследования:

1. Анализ применения алгоритмов управления и методов их синтеза в интеллектуальных транспортных системах, постановка задачи исследования.
2. Установление структуры квазиоптимального закона с использованием метода синтеза на основе условия максимума функции обобщенной мощности, который может быть использован в интеллектуальных алгоритмах управления.
3. Синтез интеллектуального алгоритма управления с использованием установленной структуры квазиоптимального закона на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода.
4. Синтез интеллектуального алгоритма управления угловым движением беспилотной транспортной системы типа квадрокоптер.
5. Построение системы автоматического управления скоростью электровоза с асинхронным тяговым двигателем с применением синтезированного интеллектуального алгоритма управления.

Новые научные результаты, выдвигаемые для защиты:

1. Синтезирован интеллектуальный алгоритм управления, с использованием нечеткого логического вывода Такаги-Сугено и метода синтеза квазиоптимальных законов на основе условия максимума функции обобщенной мощности, структура синтезирующей функции установлена на основе анализа обобщенного кинетического потенциала с учетом выполнения условий трансверсальности в соответствии с принципом освобождаемости и условием обращения в ноль скобок Пуассона.

2. Синтезирован интеллектуальный алгоритм управления нелинейной динамической системой с несколькими степенями свободы с использованием нечеткого логического вывода Такаги-Сугено. Заключение продукционных правил алгоритма получены на основе квазиоптимального по быстродействию закона и закона, обеспечивающего максимизацию области притяжения.

3. Синтезирован интеллектуальный алгоритм управления беспилотным летательным аппаратом с применением разработанной модели движения при управлении угловым движением по крену на основе данных, полученных в ходе натурального эксперимента с макетом БПЛА в стенде.

4. Построена система автоматического управления скоростью электровоза с использованием синтезированного интеллектуального алгоритма управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода в различных режимах работы локомотива с асинхронным тяговым двигателем в условиях влияния основного и дополнительного сопротивлений движению в соответствии с данным профилем пути.

Новые научные положения, выдвигаемые для защиты:

1. Синтезированный интеллектуальный алгоритм с использованием метода синтеза квазиоптимальных законов на основе условия максимума функции обобщенной мощности позволяет получить выигрыш по показателю быстродействия при управлении нелинейной динамической системой в сравнении с известными решениями. Полученный алгоритм является интеллектуальным в

том смысле, что является робастным к изменению параметров управляемой системы, а также обеспечивает адаптацию гиперповерхности переключения в процессе управления.

2. Синтезированный интеллектуальный алгоритм обеспечивает достижение окрестности терминальной точки подсистем за время, близкое к оптимальному, при этом в сравнении с известным квазиоптимальным по быстродействию законом управления предлагаемый закон не входит в учащающихся переключений вблизи терминальной точки, а также не имеет точек разрыва на траектории движения нелинейной динамической системы в сравнении с известным многорежимным законом.

3. Синтезированный алгоритм на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода Такаги-Сугено позволяет повысить эффективность управления угловым движением транспортной системы типа квадрокоптер по показателю быстродействия в сравнении с известными решениями.

4. Построенная система автоматического управления скоростью электровоза с применением синтезированного интеллектуального алгоритма управления позволяет обеспечить выигрыш по показателю быстродействия достижения заданной скорости электровоза нового поколения с асинхронным тяговым двигателем в различных режимах работы локомотива в сравнении с известным решением.

Теоретическая значимость. Развита математический аппарат синтеза интеллектуальных алгоритмов управления динамическими системами с использованием метода синтеза квазиоптимальных законов на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода, предложены варианты построения алгоритмов управления, обеспечивающих повышение эффективности управления по показателю быстродействия в условиях априорно неизвестных возмущений и параметров системы.

Практическая значимость подтверждается свидетельствами на программы для ЭВМ и определяется возможностью применения разработанного

математического аппарата синтеза интеллектуальных алгоритмов управления, полученных на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода, для разработки динамических нелинейных систем управления в условиях внешних возмущений, что позволяет обеспечить повышение быстродействия для различных нелинейных объектов в заданных областях фазового пространства за счет адаптации параметров управляющей системы; исключить появление режима учащающихся переключений, в результате чего обеспечивается снижение энергетических затрат на управление. С использованием полученных интеллектуальных алгоритмов построена система управления беспилотной транспортной системой типа квадрокоптер и разработана система автоматического управления скоростью электровоза с асинхронным тяговым двигателем.

Обоснованность и достоверность полученных в работе результатов подтверждается достаточной полнотой анализа области исследования, непротиворечивостью полученных результатов компьютерного моделирования и известных теоретических положений, положительным заключением экспертов на работы автора, включая заключения на отчет по исследованиям, финансируемым РФФИ «Аспиранты» и грантом ФГБОУ ВО РГУПС, а также опубликованные работы в журналах, рекомендованных ВАК для кандидатских диссертаций и доклады на Всероссийских и Международных конференциях.

Личный вклад автора в получении результатов, полученных в диссертации, заключается в проведении теоретических исследований и практического компьютерного моделирования, что определило защищаемые положения и результаты. Автору принадлежат системный анализ области исследования, обоснование и выбор методов построения интеллектуальных алгоритмов управления, развитие метода синтеза на основе условия максимума функции обобщенной мощности с использованием аппарата нечеткой логики, построение структур интеллектуальных алгоритмов управления, а также формулировка выводов и интерпретация полученных с применением методов компьютерного моделирования результатов.

Реализация результатов работы. Основные результаты диссертации использованы при подготовке отчета по НИР «Исследование методов структурной адаптации моделей движения в задачах обработки радиолокационной информации», в РГУПС в рамках НИР «Разработка элементов беспилотных технологий на базе методов объединенного принципа максимума» в рамках договора о предоставлении гранта ФГБОУ ВО РГУПС от 02 июля 2018 г. № 328, при подготовке отчета по результатам исследования, финансируемого грантом РФФИ № 19-31-90134 Аспиранты «Синтез интеллектуальных алгоритмов управления на основе построения гиперповерхности переключения с учетом динамических свойств управляемых объектов», элементы диссертационного исследования были использованы при подготовке отчета по результатам исследования, финансируемого грантом РФФИ 18-01-00385 А «Разработка методов синтеза интеллектуальных алгоритмов управления и оценки состояния нелинейных динамических систем с использованием объединенного принципа максимума». Получены акты реализации разработанных решений в НИР, НИОКТР, учебном процессе, которые представлены в Приложении Б.

Область исследования. Тематика работы соответствует паспорту научной специальности 2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы; технические науки:

1. Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач управления транспортными системами, процессами и транспортными средствами.

6. Средства и методы проектирования технического, математического, лингвистического, информационного и других видов обеспечения интеллектуальных транспортных систем, систем управления транспортными технологическими процессами и транспортными средствами.

7. Теоретические основы и методы моделирования транспортных технологических процессов с целью автоматизированного поиска эффективных решений и интеллектуальных алгоритмов управления транспортными системами,

объектами транспортной инфраструктуры, одиночными транспортными средствами.

Публикации и апробация. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 32 работах (общим объемом 27,29 п.л., вклад соискателя 11,22 п.л.), из них работ, опубликованных в рецензируемых научных журналах (из перечня ВАК), – 10; изданиях, включенных в наукометрические базы данных Scopus, – 5; 17 публикаций в материалах всероссийских и международных конференций; программ для ЭВМ – 3 [52–54]; методических материалов, внедренных в учебном процессе Ростовского государственного университета путей сообщения, – 2 [55; 56].

Диссертационное исследование поддержано стипендией Губернатора Ростовской области, грантом ФГБОУ ВО РГУПС от 02 июля 2018 г. № 328 «Разработка элементов беспилотных технологий на базе методов объединенного принципа максимума» и грантом РФФИ № 19-31-90134 Аспиранты «Синтез интеллектуальных алгоритмов управления на основе построения гиперповерхности переключения с учетом динамических свойств управляемых объектов». Была получена положительная экспертная оценка отчета об исследованиях в рамках проекта. Элементы диссертационного исследования были представлены на VIII, IX и X Всероссийских конкурсах научных работ среди студентов и аспирантов по транспортной проблематике, по результатам которых были заняты 3, 1 и 1 места соответственно, а также в научно-техническом конкурсе «Первый шаг 2022», по результатам которого был получен диплом победителя.

Структура работы. Диссертация из 150 страниц машинописного текста включает в себя введение, четыре главы, заключение, список условных обозначений, библиографический список из 160 наименований и 2 приложения, в том числе 2 таблицы и 42 рисунка.

1 Состояние вопроса и постановка задачи исследования

1.1 Анализ применения алгоритмов управления в интеллектуальных транспортных системах

Область применения алгоритмов управления развивается благодаря массовому применению информационных технологий, внедряющихся во все сферы жизни человека, развитие отрасли микропроцессорной техники позволяет реализовать новые возможности применения систем автоматического управления (САУ), интеграция отдельных алгоритмов управления в комплексные интеллектуальные транспортные системы требует обеспечения быстродействия микропроцессорных систем и наличия большого объема памяти. В этих условиях возрастает роль теории, позволяющей создавать технически реализуемые законы управления, применение которых диктуются высокими требованиями к качеству работы систем управления [24].

На сегодняшний день представлены работы по разработке алгоритмов управления множества объектов, которые могут быть интегрированы в интеллектуальные транспортные системы, например, управление летательными аппаратами [7–23], алгоритмы управления на железной дороге, включая управление поездом и управление системами электроснабжения [24–27], управление водным транспортом [28–30], управление роботами [31–35]. Также вопросы разработки систем управления рассматриваются в таких задачах, как задачи управления процессами в промышленной химии, включая нанесение гальванического покрытия [36] и алкилирование [37], задача терморегулирования [38; 39], задача управления генератором [40; 41] и инвертором [42], задача управления в эргатических системах [43], задача управления реакторными системами [44] и др. [45; 46; 57].

Важное направление развития современной теории автоматического управления составляют задачи управления такими транспортными системами, как беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [15], от которых зачастую требуется

выполнение агрессивных маневров в сложных условиях, таких как внешние возмущения ветра или изменение массогабаритных характеристик в случае несения полезной нагрузки.

Изменение динамики системы из-за изменения массы, момента инерции и аэродинамики в некоторых случаях вызывает нестабильность. При этом учет этих изменений является сложной задачей из-за зависимости от многих факторов, таких как нелинейная связь со скоростью, индуктивное сопротивление из-за двигательной установки и другие сложные явления [16; 58]. К тому же гораздо сложнее достичь желаемых характеристик при высоких скоростях и ускорениях из-за повышенных аэродинамических эффектов, которые трудно смоделировать и компенсировать из-за их сложности. [59].

В процессе движения на БПЛА действуют ветровые порывы, струйные воздушные течения, турбулентность атмосферы, внешние воздействия от разрывов снарядов, параметрические возмущения, возникающие вследствие нестационарности характеристик и параметров самого аппарата, исполнительных механизмов, функциональных устройств САУ [8], что в совокупности с необходимостью реализации различных режимов функционирования системы вызывает значительные трудности при синтезе САУ, и требует применения интеллектуальных алгоритмов, способных адаптироваться к изменяющимся условиям и «обеспечивать инвариантность к заданному конечному множеству возмущений». Решение задач повышения качества управления, устойчивости требует совершенствование методов и технических решений. Некоторые исследователи отмечают острую необходимость создания опережающих научных и практических положений с учетом максимального охвата совокупности реальных условий [8].

Одной из практических проблем использования БПЛА в контексте комплексной интеллектуальной транспортной системы является наличие значительных ветровых влияний проходящего поезда на объекты вблизи железнодорожного полотна. Данное обстоятельство по замечанию ведущих специалистов компании ОАО «РЖД» ограничивает применение БПЛА, например,

в задаче мониторинга инфраструктуры. На конкурсе «Новое звено 2021» было сформулировано возможное решение проблемы, которое заключается в превентивном изменении угла крена БПЛА в случае прохождения поезда вблизи, что может обеспечить необходимую устойчивость к внешним ветровым влияниям.

Развитие железнодорожной отрасли как комплексной интеллектуальной транспортной системы осуществляется в процессе развития цифровой экономики в целом, что является стратегическим приоритетом и должно обеспечить необходимый инфраструктурный и технологический базис. На железнодорожном транспорте направление развития закреплено в таких документах, как «Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» до 2020 и на перспективу до 2025 года» («Белая книга») и «Концепция реализации комплексный научно-технического проекта «Цифровая железная дорога»».

Согласно «Белой книге» железнодорожный транспорт России столкнется с глобальными вызовами, среди которых можно выделить недостаток инвестиций, снижение конкурентоспособности из-за инфраструктурных ограничений, повышение сложности наращивания объемов и скорости перевозок в крупных узлах. В этих условиях холдинг «РЖД» определяет стратегические цели, включающие в себя в первую очередь реализацию проектов развития скоростных и высокоскоростных перевозок, на долю которых к 2030 году должно прийти до 20 % пассажирооборота, при этом должен сохраниться высокий уровень безопасности движения. Реализация указанных целей опирается в том числе и на развитие систем автоматического управления.

Согласно концепции «Цифровой железной дороги» ключевым технологическим элементом эксплуатационной деятельности железнодорожного транспорта в долгосрочной перспективе станет «интеллектуальный» поезд, интегрирующий в себе проекты «умный локомотив» и «умный вагон». Реализация такого комплексного научно-технического проекта будет осуществляться с применением средств автоматического ведения состава, учитывающие заданный график движения, возможности инфраструктуры, команды диспетчерских

центров и статусы ближайших участников движения, и современные решения для автоматизации деятельности терминалов, грузовых дворов, складов, специализированной техники [60].

На заседании объединенного ученого совета открытого акционерного общества «Российские железные дороги» от 26 июля 2018 г. было отмечено, что интеллектуальный железнодорожный транспорт может быть реализован только в качестве комплексного проекта и включает в себя интеллектуальные алгоритмы, обеспечивающие беспилотное управление и обеспечение безопасности поезда [60].

И.о. главного инженера Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» Павел Анатольевич Третьяк в своем докладе «Задачи по внедрению перспективных отечественных технических средств и технологий эксплуатации железнодорожной инфраструктуры, требующие научной поддержки» обозначил, что одним из вызовов на данный момент является обеспечение пропускных и провозных способностей железнодорожной инфраструктуры в условиях существующего роста объемов перевозок, что включает в себя задачу повышения пропускных и провозных способностей железнодорожной инфраструктуры. Одним из решений данной задачи может быть уменьшение интервала движения поездов и повышение скорости движения, что связано с решением задачи создания интеллектуальных скоростью движения поездов [61].

Внедрение интеллектуальных систем автоматического управления позволит улучшить условия труда локомотивных бригад, снизить число нарушений безопасности, связанных с человеческим фактором, повысить точность соблюдения графика движения и уменьшить расход топливных и энергоресурсов. На сегодняшний день за счет повышенного внимания к этим вопросам эксплуатационных служб ОАО «РЖД», ученых и специалистов отраслевых вузов, предприятий и научно-исследовательских организаций достигнуты определенные успехи: локомотивный парк оснащен системами автоведения поездов, достаточно успешно показавшие себя в эксплуатации [24; 25; 62].

Однако практическая проблема эффективного автоматического управления скоростью поезда окончательно не решена, что связано с априорной неопределённостью поездной обстановки и условий функционирования, наличием случайных воздействий внешней среды, а также вариаций параметров и характеристик объекта управления. Развитие согласно «Белой книге» скоростного и высокоскоростного, а также тяжеловесного и длинносоставного движения требует совершенствования существующих методов и технических решений, что говорит об актуальности исследований этой научной проблемы [24].

1.2 Современные методы синтеза алгоритмов управления в интеллектуальных транспортных системах

Разные требования к САУ и разные условия их применения породили множество различных подходов к построению алгоритмов управления. Наибольшее распространение получили алгоритмы на основе линейных законов управления, а также различные алгоритмы на основе методов оптимального синтеза линейных систем. Зачастую интеллектуальные алгоритмы управления строят за счет комбинации линейных законов и правил нечеткой логики, добавления нескольких режимов работы и др. Тем не менее, основой таких регуляторов остаются линейные законы, при этом самые распространенные из них не являются научно обоснованными, следовательно, нет возможности говорить об их оптимальности.

Известны следующие методы решения оптимальной проблемы: метод динамического программирования, чисто вариационный метод (т.е. метод, предполагающий варьирование оптимального управления и соответствующей оптимальной траектории); метод функционального анализа; метод функций Беллмана-Ляпунова [63], методы синтеза релейных оптимальных систем, которые были развиты в работах А.А. Фельдбаума, методы синтеза систем с переменной структурой, разработанные С.В. Емельяновым [64].

В задаче управления скоростью поезда применялись различные методы: принцип максимума Л.С. Понтрягина (на железной дороге наиболее глубоко развит [25]), дискретный вариант метода динамического программирования и др. [24; 65]. Для ускорения поиска оптимальной траектории движения поезда метрополитена в работе [66] был предложен метод оптимизации режимов ведения поезда с одновременным использованием метода динамического программирования и принципа максимума. Однако применение метода динамического программирования сопряжено с использованием неопределенных множителей Лагранжа для понижения размерности задачи, что в некоторых случаях вызывает большие трудности [24].

Достоинством аналитических методов является достаточная быстрота расчетов, что позволяет использовать их на борту подвижного состава, а их недостатком является отсутствие возможности точного моделирования объекта управления ввиду наличия параметрической неопределенности и внешних возмущений. Использование численных методов позволяет устранить указанные недостатки аналитических методов, но при этом требуется большее время для решения задачи на ЭВМ [24]. При этом требуется учитывать ограничения на сигнал управления, без чего можно получить неработоспособную на практике САУ. Широко используются пропорционально-интегральный и пропорционально-интегрально-дифференциальный алгоритмы (ПИД-регуляторы), однако данные алгоритмы эффективны, если известны параметры объекта управления и возмущения, а относительная степень модели объекта не превышает двух [67]. Так, в работах [67; 68] рассматривалась задача управления в условиях параметрической неопределенности и ограничений на сигнал управления, но работоспособность предложенных алгоритмов при насыщении сигнала управления не доказана. Доказательства работоспособности рассмотрены в [69], однако схема работоспособна только при условии, если доступен измерению вектор состояния объекта и справедлива исключительно для устойчивых объектов [67].

Принцип максимума Л.С. Понтрягина и методы аналитического конструирования оптимальных регуляторов А.М. Летова и Р. Калмана представляют наиболее важный раздел теории и практики синтеза систем оптимального управления. Однако эти методы применяются по большей части для линейных объектов, данная проблема является основополагающей и наиболее трудноразрешимой. При решении задачи синтеза управления линейными объектами возникает необходимость решения уравнений Риккати, а решение для нелинейных объектов связано с нахождением решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, что вызывает принципиальные трудности, что усугубляется затруднением подбора весовых коэффициентов оптимизирующих функционалов, так как для нелинейных систем несправедлив принцип суперпозиции, а их поведение существенным образом зависит от начальных условий [70].

В настоящее время развитие теории происходит во многих направлениях, так, в работе [71] управление предлагается строить на основе прогнозирующих моделей, а в [72] для дискретных систем управления удается решить многие задачи оптимального управления на основе полиэдральной методологии. В работе [73] рассматривается один из возможных подходов на основе метода локализации, отмечается общая характерная особенность систем с предложенным линейным алгоритмом, которая заключается в возникновении быстрых составляющих движения на фоне медленных рабочих процессов. В работе [74] рассмотрена методика синтеза линейного регулятора системы управления для объектов второго порядка на основе модального метода для линейных систем с учетом расположения комплексных полюсов. В статье [75] рассматриваются допущения при синтезе САУ, принятие которых препятствует практическому применению алгоритмов. В [76] обсуждаются вопросы применения метода линеаризации обратной связью, анализируется динамическая структура систем управления, синтезируемых на базе данного метода. В [77] рассматривается задача оптимального управления для сетевых систем управления, выводятся

квазиоптимальные регуляторы для общего случая и оптимальные регуляторы для случая, когда все состояния идеально измеряются в одном звене.

Развиваются методы с применением элементов интеллектуализации. В [38] предложен способ управления с нейросетевым настройщиком в совокупности с ПИ-регуляторами. В [67] синтезирован алгоритм управления объектами в условиях параметрической неопределенности, внешних ограниченных возмущений и насыщения регулируемого сигнала. В [78] рассмотрены логико-лингвистические, аналитические, обучающие и нечеткие алгоритмы, основанные на нечеткой логике. В работе [79] рассматривается задача синтеза системы двухрежимного регулирования. В функциональной структуре системы выделяются режимы регулирования в «большом» и «малом». Показаны существенные преимущества схемы двухрежимного регулирования по сравнению с традиционной схемой.

В работе [7; 8] дается краткий обзор решений некоторых задач по формированию законов управления БПЛА, в совокупности охватывающих комплекс задач управления и стабилизации, в том числе часто противоречивых, но позволяющих при определенных условиях добиться компромисса в смысле выполнения требований, предъявляемых к системе управления. Проектирование БПЛА и синтез его системы управления проводятся с учетом требований, предъявляемых к его динамическим характеристикам, к которым относятся устойчивость движения и качество переходных процессов в системах стабилизации и управления. Нестационарность математической модели может привести к невозможности выполнения задаваемых требований, если система управления и стабилизации БПЛА будет иметь постоянные параметры и структуру [7]. В [12] предлагается повышать динамические характеристики автопилота за счет использования нелинейных методов коррекции показателей качества систем управления, в частности, были предложены системы с переменной структурой, рассмотренные в работе [64], в соответствии с которой алгоритм управления состоит из двух законов, применяемым к разным областям пространства состояний. В [7; 80] высказана идея целесообразности

проектирования адаптивных систем. В работе [81] предложены структура и алгоритмы прямого адаптивного управления с эталонной моделью в канале крена БПЛА.

Несмотря на обилие методов построения алгоритмов управления, наиболее широко распространены в технических системах и используются в 90–95% регулирующих контуров ПИД-регуляторы [57; 82], в которых ключевым вопросом является вопрос настройки коэффициентов. При этом один раз настроенный регулятор не может обеспечить достижение цели управления в процессе всего функционирования объекта управления. Решение этой проблемы достигается с помощью адаптивного управления, которое достигается разными способами, например, с помощью метода управления на основе прогнозирующей модели (MPC) или нечеткого логического вывода (fuzzy inference). MPC-алгоритмы хорошо подходят к медленно текущим техническим процессам и при наличии значительных вычислительных ресурсов. Нечеткое управление используется при отсутствии точной математической модели, либо ее сложности для аналитического синтеза регулятора. Массовое использование в промышленности алгоритмов управления на основе линейных законов свидетельствует о наличии разрыва между теорией и практикой [57].

Конструктивным решением практических задач управления с применением аналитических методов синтеза может являться известный метод синтеза квазиоптимальных законов на основе условия максимума функции обобщенной мощности [50; 83; 84], который позволяет получить структуру обратной связи с точностью до синтезирующей функции. Данный метод может находить применение при построении управления для лагранжевых систем. Так, с его помощью разработан многорежимный алгоритм управления, легко применимый к многосвязным нелинейным системам [83; 85]; синтезирован нелинейный квазиоптимальный многорежимный алгоритм управления, позволяющий повысить эффективность по показателям быстродействия и Фуллера с исключением скользящего режима в сравнении с линейным законом управления [84; 86; 87] в условиях ограничения на управляющее воздействие [88]. В

некоторых случаях обеспечивается выигрыш по критерию быстродействия и затратам на управление при проигрыше в точности [89]. Кроме того, с использованием метода на основе условия максимума функции обобщенной мощности построен многорежимный алгоритм с элементом нелинейной коррекции, что позволяет обеспечить выигрыш по квадратичному критерию, критерию быстродействия и затратам на управление при управления нелинейным объектом [90–93] в условиях ограничения управляющего воздействия [94] практически на всей заданной области фазовой плоскости [95].

Данный метод на основе условия максимума функции обобщенной мощности целесообразно применять как базу для формирования квазиоптимальных законов, которые с применением нечеткого логического вывода формируют интеллектуальный алгоритм управления.

Нечеткий логический вывод является понятием в одной из ветвей теории интеллектуальных систем [96; 97] – теории нечетких множеств [98–100]. Одним из основателей этой теории является профессор Лотфи Заде, положивший начало в своей работе, опубликованной в 1965 г. [101]. Системы с нечетким логическим выводом (нечеткие системы) успешно применяются в различных областях [97; 102–104]. Практический опыт разработки таких систем свидетельствует о меньших временных и финансовых затратах на их внедрение в сравнении с системами на основе традиционного математического аппарата [105]. По сравнению с последними интеллектуальные алгоритмы с нечетким логическим выводом имеют лучшую помехозащищенность, быстродействие и точность за счет более адекватного описания реальной среды, в которой они функционируют [97]. Нечеткий логический вывод часто используют в совокупности с традиционными законами управления, формируя интеллектуальный алгоритм. Нечеткий логический подход во многом аналогичен вероятностному подходу, но по сравнению с ним позволяет сократить объем вычислений и увеличить быстродействие САУ [106].

Типовая структура системы нечеткого логического вывода показана на рисунке 1. Она содержит модули [100]:

- фаззификатор, преобразующий фиксированный вектор влияющих факторов в вектор нечетких множеств, необходимых для нечеткого вывода;
- нечеткая база знаний, содержащая информацию о зависимости в виде лингвистических правил «если – то»;
- функции принадлежности, используемые для представления лингвистических термов в виде нечетких множеств;
- машина нечеткого логического вывода, которая на основе правил базы знаний определяет значение выходной переменной в виде нечеткого множества, соответствующего нечетким значениям входных переменных;
- дефаззификатор, преобразующий выходное нечеткое множество в четкое число.



Рисунок 1 – Система нечеткого логического вывода

Основные алгоритмы нечеткого логического вывода [100]: композиционное правило нечеткого вывода Заде, нечеткий логический вывод Мамдани, нечеткий логический вывод Такаги-Сугено, вывод по синглтонной базе знаний и нечеткий логический вывод для задач классификации. В работе для синтеза интеллектуальных алгоритмов применяется нечеткий логический вывод Такаги-Сугено как наиболее распространенный и представленный в таких средах численного моделирования, как Matlab.

Таким образом, для решения задачи синтеза интеллектуальных алгоритмов управления транспортными системами в условиях неопределенности модели объекта управления и внешних возмущений можно использовать метод синтеза квазиоптимальных законов управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткий логический вывод.

1.3 Математическая постановка задачи синтеза интеллектуальных алгоритмов управления

Рассматриваемые транспортные системы могут быть описаны с использованием формализма Лагранжа, поэтому задачу синтеза интеллектуального алгоритма управления можно сформулировать следующим образом. Рассматривается совокупность динамических систем, движение которых удовлетворяет уравнению Лагранжа второго рода [107; 108]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_s} = u_s(t) + Q_s(t, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \quad s = \overline{1, n}, \quad t \in [t_0, t_1] \subset R, \quad (1)$$

где $T = T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – кинетическая энергия; $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n]^T \in R^n$ – вектор обобщенных координат; $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n]^T \in R^n$ – вектор обобщенных скоростей; $\mathbf{u}(t) = [u_1(t), \dots, u_n(t)]^T$ – вектор управляющих обобщенных сил; $\mathbf{Q}(t, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = [Q_1(t, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \dots, Q_n(t, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})]$ – вектор остальных обобщенных сил, включающих взаимовлияния между степенями свободы и внешние возмущения, $n = \dim \mathbf{q}$ – число степеней свободы динамической системы; T – знак транспонирования; точкой обозначена производная по времени. Такой случай «играет центральную роль при рассмотрении систем вида (1) и их обобщений» [109]. Кинетическая энергия динамической системы (1) является положительно определенной квадратичной формой обобщенных скоростей $\psi_0 \sum_{s=1}^n \dot{q}_s^2 \leq T \leq \psi_1 \sum_{s=1}^n \dot{q}_s^2$, $\psi_j = \text{const}$, $\psi_j > 0$, $j = \overline{0, 1}$ и коэффициенты матрицы кинетической энергии непрерывно дифференцируемы.

Положим, что управляющие обобщенные силы на конечном замкнутом интервале времени $[t_0, t_1] \subset R$ принимают значения в ограниченной замкнутой области суммируемых функций

$$\mathbf{u} \in \bar{G}, \quad (2)$$

а остальные обобщенные силы $\mathbf{Q}(t, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ не превышают возможностей управления. Для определенности

$$\begin{aligned} \bar{G} &= \{u_s(t) : |u_s| \leq h_s, |Q_s| < h_s, h_s = \text{const}, s = \overline{1, n}\}, \\ h_0 &= \min_{1 \leq s \leq n} h_s > 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Тогда в соответствии с [110] выполняется необходимое и достаточное условие управляемости исследуемого класса лагранжевых динамических систем (1).

Пусть задано начальное состояние системы

$$t = t_0, \mathbf{q}(t_0) = [q_{10}, \dots, q_{n0}]^T, \dot{\mathbf{q}}(t_0) = [\dot{q}_{10}, \dots, \dot{q}_{n0}]^T \quad (4)$$

и терминальное состояние с некоторой окрестностью

$$\begin{aligned} |q_i^* - q_i(t_k)| &< \delta_{i1}, \quad |\dot{q}_i^* - \dot{q}_i(t_k)| < \delta_{i2}, \\ \delta_{i1}, \delta_{i2} &> 0, \quad i = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mathbf{q}^* = [q_1^*, \dots, q_n^*]^T$, $\dot{\mathbf{q}}^* = [\dot{q}_1^*, \dots, \dot{q}_n^*]^T$ – цель управления, δ_{i1}, δ_{i2} – заданные постоянные.

Пусть задан функционал

$$J[\mathbf{q}] = \int_{t_0}^{t_1} F(\mathbf{q}) dt \rightarrow \min_{\mathbf{u} \in \bar{G}}, \quad (6)$$

где $F(\mathbf{q})$ – заданная скалярная непрерывная вместе со своими частными производными определенно-положительная целевая функция.

Задача синтеза интеллектуального алгоритма управления определена в поиске управляющих обобщенных сил на основе квазиоптимальных по целевому функционалу (6) законов и нечеткого логического вывода, приводящих систему (1) из заданных начальных условий (4) в конечное состояние (5) при условиях (3).

1.4 Выводы по главе

1. Для решения проблемы эффективного управления транспортными системами в условиях параметрической неопределенности моделей объектов и внешних возмущений необходимо совершенствовать существующие методы и технические решения построения систем управления, что позволит сгладить противоречия между потребностями практики и теоретическими подходами исследуемой предметной области и синтезировать интеллектуальные алгоритмы управления, удовлетворяющие современным требованиям.

2. Анализ современных методов синтеза управления показал, что эффективным решением поставленной задачи синтеза интеллектуальных алгоритмов может являться применение метода синтеза квазиоптимальных законов на основе условия максимума функции обобщенной мощности в совокупности с нечетким логическим выводом.

3. В соответствии с результатами анализа применения алгоритмов и методов их синтеза сформулирована математическая постановка задачи синтеза интеллектуальных алгоритмов управления транспортными системами с использованием формализма Лагранжа.

2 Синтез квазиоптимальных законов управления

2.1 Метод синтеза квазиоптимальных законов управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности

Решение задач оптимального управления сопряжено с определенными трудностями, например, использование принципа максимума Л.С. Понтрягина требует решения двухточечной краевой задачи, которая в общем случае аналитически неразрешима, при этом численное решение связано с вычислительными трудностями [50]. С помощью принципа максимума решаются задачи программного управления, а результаты синтеза оптимальных управлений известны лишь для редких случаев [80; 111; 112].

Для решения задачи синтеза используют различные допущения, выделяя допустимый класс решений, что снижает сложность и обеспечивает поиск оптимального решения с разумным приближением [80], например, оптимизационная задача решается с использованием функционала обобщенной работы, при этом рассматривается соответствующая изопериметрическая задача, что позволяет свести оптимизационную задачу к необходимости анализа линейного уравнения Ляпунова, такие методы синтеза принято называть квазиоптимальными [50; 80; 109; 110].

Изучение свойств объекта по результатам анализа приращения функционала [113] «позволяет составить определенное представление о характерных особенностях оптимальных условий» [114]. При этом, как правило, вследствие упрощающих допущений реализация подобных процедур возможна не единственным способом, что порождает множество решений. В отдельных случаях удастся установить их связь с известными результатами теории оптимального управления и аналитической механики [115], так, например, в [107] рассматривается «теория оптимальных процессов на основе методов аналитической механики» [50].

В рассматриваемом методе на основе условия максимума функции обобщенной мощности [50] проводится анализ условий оптимальности с применением принципа Гамильтона – Остроградского, в соответствии с которым движению динамической системы можно поставить в соответствие интеграл действия [107], имеющий стационарное значение на экстремали. Его использование как ограничения приводит к изопериметрической задаче отыскания условий минимума целевого функционала [116; 117]. На основе редукции исходной оптимизационной задачи Лагранжа к изопериметрической можно получить метод квазиоптимального структурного синтеза с использованием анализа вариации [107; 108; 113] расширенного функционала – свертки критерия качества с действием по Гамильтону [50; 113; 118–120].

Исследование асинхронной (полной) вариации [107; 108; 115] расширенного целевого функционала позволяет получить краевую задачу, решение которой удовлетворяет требованиям максимума функции обобщенной мощности и энергетического баланса на экстремальной траектории, откуда предложена структура множества квазиоптимальных решений, полученных в форме синтеза [50]. Данный метод может быть использован для построения заключений продукционных правил интеллектуального алгоритма управления, что позволит получить структуру, содержащую квазиоптимальные решения поставленной задачи.

Рассмотрим данный метод подробнее. В соответствие управляемой лагранжевой динамической системе (1), (2) ставится экстремальное значение интеграла действия \tilde{r} [107; 108] и рассматривается вектор обобщенных сил \mathbf{Q} и соответствующая ему траектория $(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))$, $t \in [t_0, t_k]$, проходящая через заданные точки расширенного фазового пространства $(\mathbf{q}(t_0), \dot{\mathbf{q}}(t_0))$ и $(\mathbf{q}(t_k), \dot{\mathbf{q}}(t_k))$, для которого задано значение интеграла действия [50; 107; 108]

$$R[\mathbf{q}, \mathbf{Q}] = \int_{t_0}^{t_k} (T + A) dt = r, \quad r = \text{const}, \quad r > \tilde{r}, \quad (7)$$

где $A = \sum_{s=1}^n \int_{q_s(t_0)}^{q_s(t_k)} Q_s dq_s$ – работа обобщенных сил.

Далее рассматривается изопериметрическая задача, в соответствии с которой необходимо найти такие обобщенные силы \mathbf{Q} , при которых функционал (7) принимает значение r , и обеспечивается минимум целевого функционала (6). В соответствии с [116; 120] решение экстремальной задачи (7) предполагает исследование на экстремум расширенного целевого функционала [50]

$$J_1[\mathbf{q}, \mathbf{Q}] = J[\mathbf{q}] + \lambda R[\mathbf{q}, \mathbf{Q}], \quad (8)$$

где λ – множитель Лагранжа.

В рамках решения поставленной изопериметрической задачи определяются условия [50]

$$J_1[\mathbf{q}, \mathbf{Q}] - J_1[\tilde{\mathbf{q}}, \tilde{\mathbf{Q}}] \geq 0, \quad (9)$$

где $\tilde{\mathbf{q}}$ – соответствующая $\tilde{\mathbf{Q}}$ траектория, $\tilde{\mathbf{Q}}$ определяется через вектор обобщенных сил $\mathbf{Q} = \tilde{\mathbf{Q}} + \delta\mathbf{Q}$, которому соответствует траектория \mathbf{q} , и который получается с использованием игольчатого варьирования по Макшейну [50]:

$$\delta\mathbf{Q}(t) = \begin{cases} \mathbf{C}, & t \in [\tau, \tau + \varepsilon], \\ \mathbf{0}, & t \notin [\tau, \tau + \varepsilon], \end{cases}$$

где \mathbf{C} – произвольный вектор постоянных; $\tau \in [t_0, t_k]$ – момент времени, который задает замкнутый интервал времени $[\tau, \tau + \varepsilon] \subseteq [t_0, t_k]$; $\varepsilon \geq 0$ – малая величина.

Далее принимается, что существуют такие λ , $\tilde{\mathbf{Q}}$ и $\tilde{\mathbf{q}}$, которые удовлетворяют (7) и обеспечивают минимум (6).

Анализ асинхронной вариации расширенного функционала в соответствии с теоремой Эйлера об однородных функциях приводит к соотношению [50]

$$\sum_{s=1}^n \lambda \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \delta \tilde{q}_s \Big|_{\tau}^{t_k} = - \sum_{s=1}^n \lambda \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \dot{q}_s \Delta t' \Big|_{\tau}^{t_k} = -2\lambda T \Delta t' \Big|_{\tau}^{t_k} \quad (10)$$

и с учетом связи синхронной и асинхронной вариаций обобщенных координат позволяет записать [121]

$$\Delta J_1 = -\sum_{s=1}^n \lambda \delta Q_s \dot{q}_s(\tau) \Delta t \varepsilon + \int_{\tau}^{t_k} \sum_{s=1}^n \left[\lambda \left[-\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} + \frac{\partial T}{\partial q_s} + \tilde{Q}_s \right] + \tilde{V}_s \right] \delta q_s dt + \left[\lambda(A-T) + F \right]_{\tau}^{t_k} + o(\varepsilon), \quad (11)$$

откуда с учетом требования (9) и, поскольку по построению траектория является оптимальной, то принимая во внимание принцип динамического программирования Р. Беллмана в силу произвольности момента времени τ [80] получим следующую краевую задачу, стесненную условиями [50]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial T}{\partial q_s} &= \tilde{Q}_s + \lambda^{-1} \tilde{V}_s, \quad s = \overline{1, n}, \\ \tilde{q}_s(t_0) &= \tilde{q}_{s0}, \quad \dot{\tilde{q}}_s(t_0) = \dot{\tilde{q}}_{s0}, \quad \tilde{q}_s(t_k) = \tilde{q}_{sk}, \quad \dot{\tilde{q}}_s(t_k) = \dot{\tilde{q}}_{sk}, \\ \tilde{\Phi} &= \sum_{s=1}^n \tilde{Q}_s(t) \dot{\tilde{q}}_s(t) \rightarrow \max, \quad t \in [t_0, t_k], \\ \left[\lambda(A-T) + F \right]_{t_0}^{t_k} &= 0, \quad t \in [t_0, t_k], \\ \lambda &= \frac{-\sum_{s=1}^n \tilde{V}_s}{\sum_{s=1}^n \left[-\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} + \frac{\partial T}{\partial q_s} + \tilde{Q}_s \right]} \Bigg|_{t \in [t_0, t_k]} = \text{const.} \end{aligned} \quad (12)$$

Первое уравнение системы (12) – уравнение Лагранжа второго рода, полученное варьированием расширенного целевого функционала (8). Условие $\left[\lambda(A-T) + F \right]_{t_0}^{t_k} = 0, t \in [t_0, t_k]$ – требование выполнения энергетического баланса на экстремальной траектории. Условие обеспечения максимума функции обобщенной мощности

$$\tilde{\Phi} = \sum_{s=1}^n \tilde{Q}_s(t) \dot{\tilde{q}}_s(t) \rightarrow \max, \quad t \in [t_0, t_k] \quad (13)$$

которое проистекает из условия, определяющего вариацию обобщенной силы [50]

$$\sum_{s=1}^n \lambda \delta Q_s(t) \dot{\tilde{q}}_s(t) \leq 0, t \in [t_0, t_k].$$

В [121] показано, что для того, чтобы управление $\mathbf{u}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \bar{G}_u$ и соответствующая ему траектория $\mathbf{q}(t)$, доставляли минимум расширенному функционалу (8) при ограничениях (9) необходимо выполнение условия максимума функции обобщенной мощности (13) при $\lambda = \lambda_0 = const$, а на концах траектории $t = t_0, t = t_k$ выполняются условия энергетического баланса [121], что соответствует системе (12).

Разрешение системы (12) и построение программной экстремальной траектории является достаточно сложной задачей, которая может быть решена различными численными методами с текущим поиском максимума функции обобщенной мощности. Но вместе с этим система (12) дает возможность с учетом редукции исходной задачи и решения изопериметрической задачи определить структуру квазиоптимального управления [50]:

$$u_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = Q_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) + \lambda^{-1} V_s(\mathbf{q}(t)), s = \overline{1, n}. \quad (14)$$

Условие максимума функции обобщенной мощности (13) позволяет утверждать, что в квазиоптимальной системе знак обобщенной силы определяется знаком обобщенной скорости, что позволяет установить следующую связь [122]

$$Q_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = \lambda^{-1} \mu_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) \dot{q}_s(t) \quad (15)$$

где $\mu_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))$ – знакопостоянная синтезирующая функция. Имеем следующую структуру управления [50]

$$u_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = \lambda^{-1} (\mu_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) \dot{q}_s(t) + V_s(\mathbf{q}(t))), s = \overline{1, n}. \quad (16)$$

Знак управления определяется в процессе синтеза на основе требований устойчивости управляемого движения [109]. Использование прикладных способов учета ограничений на класс допустимых управлений позволяет записать [67; 123], где sat – это функция насыщения (saturation):

$$u_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = h_s \text{sat}(\lambda^{-1} \Psi_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))) = \begin{cases} h_s, & \lambda^{-1} \Psi_s > h_s, \\ \lambda^{-1} \Psi_s, & |\lambda^{-1} \Psi_s| \leq h_s, \\ -h_s, & \lambda^{-1} \Psi_s < -h_s, \end{cases} \quad (17)$$

где функция

$$\Psi_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = \mu_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) \dot{q}_s(t) + V_s(\mathbf{q}(t))$$

определяет поверхность переключения. При $\lambda \rightarrow 0$ управление (17) имеет релейный характер

$$u_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = h_s \text{sign}(\mu_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) \dot{q}_s(t) + V_s(\mathbf{q}(t))). \quad (18)$$

Таким образом, показано, что на оптимальной траектории синтез управляющей обобщенной силы лагранжевой динамической системы может быть построен на основе условия максимума функции обобщенной мощности [121]. На основе результата работы [120] можно утверждать, что множества квазиоптимальных управлений, синтезированные с использованием рассмотренного метода, содержат оптимальные решения. Описанный метод синтеза квазиоптимальных законов управления дает возможность искать приближенное решение оптимизационной задачи без необходимости решения краевой задачи большой размерности [50].

2.2 Структурный синтез квазиоптимальных законов на основе условия максимума функции обобщенной мощности

Определим синтезирующую функцию $\mu(q, \dot{q})$, для этого рассмотрим систему с одной степенью свободы, для которой определен (6). Анализ вариации расширенного функционала, проведенный в работах [124–126] показывает, что множество траекторий, для которых выполняется (6), удовлетворяет следующей краевой задаче [121]

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) + \frac{\partial T}{\partial q} = \lambda^{-1} \left[\mu(q, \dot{q}) \dot{q} + \frac{\partial F}{\partial q} \right], \\ (A - T) + \lambda^{-1} F \Big|_{t_0}^{t_1} = 0, \end{cases} \quad (19)$$

где λ – множитель Лагранжа.

На линии переключения работа управляющих сил равна нулю, т.е. $A = 0$, тогда из (19) для каждого момента времени с учетом выполнения условий трансверсальности обобщенный кинетический потенциал принимает вид [121]

$$L = T - \lambda^{-1} F = 0, \quad (20)$$

Определим для (20) положительно определенную функцию и кинетическую энергию

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} \lambda^{-1} k q^2, \\ T &= \frac{1}{2} b \dot{q}^2, \end{aligned} \quad (21)$$

где k – некоторый весовой коэффициент.

Подставив (21) в (20), определим кинематические связи

$$\dot{q} = \sqrt{\lambda^{-1} b^{-1} k} |q|. \quad (22)$$

Заменим кинематические связи (22) силами реакции связей в соответствии с принципом освобожденности, работа этих сил на виртуальных перемещениях составит [108]

$$\delta' E = \delta q \cdot \varepsilon r,$$

где ε – множители Лагранжа, или множители связи, r – силы реакции связей.

Расширенный гамильтониан имеет вид [127]

$$H = \lambda T + F + E.$$

Управление на линии переключения равно нулю

$$u_0 = \mu \dot{q} + kq = 0.$$

Для того, чтобы линия переключения функции управления являлась интегралом движения, необходимо, чтобы выполнялось условие обращения в ноль скобок Пуассона [128]

$$[H, u_0] = \frac{\partial H}{\partial q} \cdot \frac{\partial u_0}{\partial p} - \frac{\partial H}{\partial p} \cdot \frac{\partial u_0}{\partial q} = 0,$$

$$\frac{\partial H}{\partial q} = kq + \varepsilon r,$$

$$\frac{\partial u_0}{\partial p} = b^{-1}\mu;$$

$$\frac{\partial u_0}{\partial q} = k.$$

В соответствии с каноническими уравнениями Гамильтона [128]

$$\frac{\partial H}{\partial p} = \lambda \frac{dq}{dt} = \lambda \dot{q}.$$

Подставим получившиеся выражения в скобки Пуассона и получим

$$[H, u_0] = (kq + \varepsilon r)b^{-1}\mu - \lambda \dot{q}k = 0,$$

$$\mu = \dot{q}k \cdot b(kq + \varepsilon r)^{-1} = \lambda bk \frac{\dot{q}}{kq + \varepsilon r},$$

с учетом знакопостоянства синтезирующей функции μ имеем

$$\mu = \lambda b \frac{|\dot{q}|}{|q| + k^{-1}\varepsilon r}. \quad (23)$$

С учетом критерия управления (21), полученной структуры синтезирующей функции (23) и ограничения на управление закон управления (18) примет вид [87; 88]

$$u(q, \dot{q}) = h \operatorname{sign} \left[\alpha_1 q + \alpha_2 \frac{|\dot{q}|\dot{q}}{|q| + \alpha_3} \right], \quad (24)$$

где $\alpha_1 = \lambda^{-1}k$, $\alpha_2 = b$, $\alpha_3 = k^{-1}\varepsilon r$.

Рассмотрим пример использования разработанного закона управления для управления нелинейной неустойчивой системой с определенной структурой возмущающих воздействий Q , которая имеет вид [123]

$$\ddot{x} = u - 0.8\dot{x}^2 \quad (25)$$

при ограничении на управление $h = 1$.

В работе [123] для управления системой (25) предложен закон на основе подхода теории дифференциальных игр, который имеет вид

$$u_{game} = h \cdot \text{sign} \left(-x - \frac{\dot{x}|\dot{x}|}{2h(1-\rho)} \right), \quad (26)$$

где ρ – параметр, определяющий условие $|Q/h| < \rho$, $\rho = 0.5$.

Проведем анализ эффективности закона (24) в сравнении с законом (26) при управлении системой (25). Для оценки эффективности используем показатели быстродействия

$$J_{time} = \int_{t_0}^{t_k} dt \quad (27)$$

и квадратичного отклонения

$$J_x = \int_{t_0}^{t_k} x^2 dt, \quad (28)$$

где $t_0 = 0$, t_k – время, за которое система переходит в некоторую окрестность [67]

$$|x^* - x(t_k)| < \delta_1, \quad |\dot{x}^* - \dot{x}(t_k)| < \delta_2 \quad \text{при } t_k > \tau, \quad (29)$$

где x^*, \dot{x}^* – цель управления, $\delta_1, \delta_2 > 0$, $\tau > 0$ – время, необходимое для окончания переходных процессов.

Моделирование проведено при $x(0) = -1$, $\dot{x}(0) = 0$, $x(t_k) = 0$, $\dot{x}(t_k) = 0$, $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = [2h(1-\rho)]^{-1}$, $\alpha_3 = 2$, шаг дискретизации $\Delta t = 0.001$. Результаты моделирования представлены на рисунках 2–3. Показатели эффективности для рассматриваемых законов представлены в таблице 1. Закон управления (24) доставляет выигрыш 17.4 % по показателю (27) и 2.7 % по показателю (28) в сравнении с законом (26).

Таблица 1 – Показатели эффективности

Закон управления	Показатель функционала быстрогодействия	Показатель квадратичного функционала
Закон (24)	2.0550	0.8026
Закон (26)	2.4880	0.8250

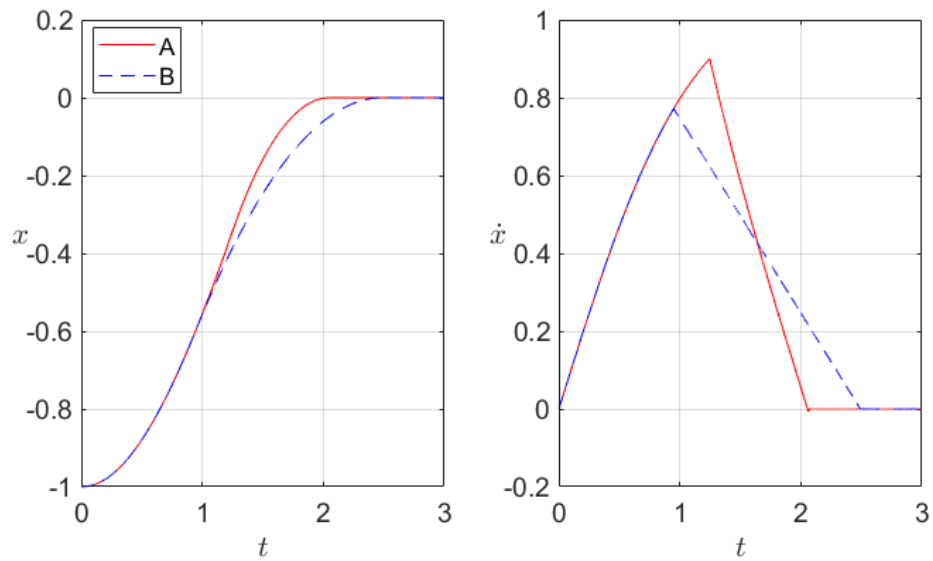


Рисунок 2 – Координата и скорость системы: А – предлагаемый закон (24), В – известный закон (26)

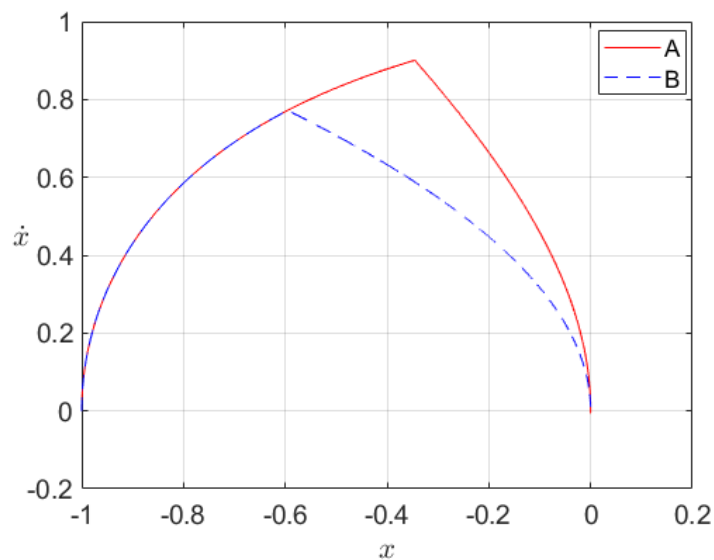


Рисунок 3 – Фазовая плоскость системы: А – предлагаемый закон (24), В – известный закон (26)

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что закон, синтезированный на основе условия максимума функции обобщенной мощности, дает возможность повысить эффективность управления нелинейным объектом в условиях высокой интенсивности возмущений в сравнении с известным нелинейным законом управления, полученным на основе игрового подхода [129].

Рассмотрим систему перевернутого маятника, который управляется приложенным к нему управляющим моментом u^* , ограничен по абсолютной величине [130–133]

$$|u^*| \leq h. \quad (30)$$

Тогда уравнение движения обратного маятника примет вид

$$mr^2\ddot{\varphi} = mgl \sin \varphi + u^*, \quad (31)$$

где φ – угол маятника к нормали, m – масса маятника, r – радиус инерции маятника относительно точки O , l – расстояние от точки подвеса маятника до его центра масс, g – ускорение свободного падения.

Если ввести замену

$$\tau = t\sqrt{gl}/r, \quad u = u^*/mgl,$$

систему (31) можно представить в форме [130]

$$\varphi'' = \sin \varphi + u, \quad (32)$$

где штрих ' означает дифференцирование по безразмерному времени τ , u – управление, ограничено по величине, $|u| \leq h$.

Проведем численное моделирование систем (32), (24) и (32), (26) при параметрах $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = \frac{1}{2h(1-\rho)}$, $\alpha_3 = 2$, $\varphi_0 = 0,5$, $\dot{\varphi}_0 = 0$. Результаты, представлены на рисунке 4.

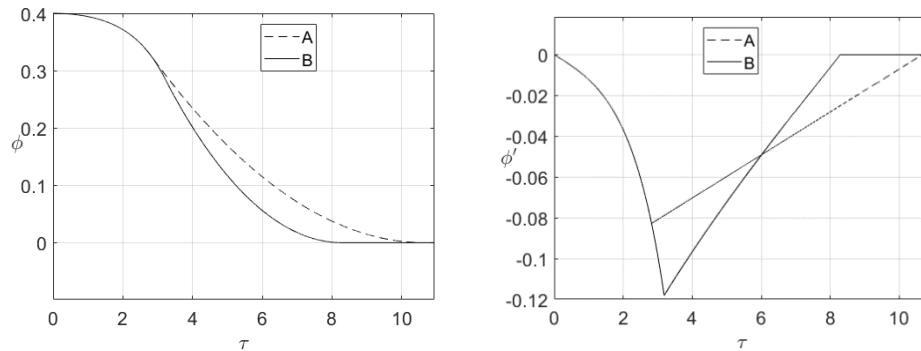


Рисунок 4 – Графики перемещения и скорости: А – (32), (26), В – (32), (24)

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что квазиоптимальный закон на основе условия максимума функции обобщенной мощности позволяет повысить быстродействие (в данном случае выигрыш составил 17,26 %) при управлении нелинейным объектом [131–133].

Рассмотрим эффективность применения законов управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности в виде

$$u_1(\varphi_1, \dot{\varphi}_1) = h_1 \operatorname{sign} \left[\frac{|\dot{\varphi}_1| \dot{\varphi}_1}{|\varphi_1| + \kappa_1} + \varphi_1 \right],$$

$$u_2(\varphi_2, \dot{\varphi}_2) = h_2 \operatorname{sign} \left[\frac{|\dot{\varphi}_2| \dot{\varphi}_2}{|\varphi_2| + \kappa_2} + \varphi_2 \right],$$
(33)

где h_1, h_2 – ограничения на управления, κ_1, κ_2 – параметры, включающие множители Лагранжа.

Проведем анализ эффективности полученных управлений (33) в сравнении с известным управлением, построенным на основе игрового подхода [123; 134; 135]

$$u_1^*(\varphi_1, \dot{\varphi}_1) = h_1 \operatorname{sign} \left[\frac{|\dot{\varphi}_1| \dot{\varphi}_1}{2 \cdot h_1 (1 - \rho_1)} + \varphi_1 \right],$$

$$u_2^*(\varphi_2, \dot{\varphi}_2) = h_2 \operatorname{sign} \left[\frac{|\dot{\varphi}_2| \dot{\varphi}_2}{2 \cdot h_2 (1 - \rho_2)} + \varphi_2 \right],$$
(34)

где $\rho_1 < 1, \rho_2 < 1$.

Уравнения движения двойного маятника разрешенные относительно старшей производной, имеют вид

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_1 = \frac{g}{l}(\varphi_2 - 2\varphi_1) + u_1, \\ \ddot{\varphi}_2 = 2\frac{g}{l}(\varphi_1 - \varphi_2) + u_2. \end{cases} \quad (35)$$

Проведем моделирование системы (35) под управлениями (33), (34) при $\varphi_1(0) = 0.5$, $\dot{\varphi}_1(0) = 0$, $\varphi_2(0) = 0$, $\dot{\varphi}_2(0) = 0$, $h_1 = h_2 = 0.5$, $\rho_1 = \rho_2 = 0.5$, $\kappa_1 = 2$, $\kappa_2 = 5$, шаг дискретизации $\Delta t = 0.001$ с. Окрестность вокруг терминальной точки (29) определена параметрами $\delta_1 = 0.001$, $\delta_2 = 0.001$. Результаты моделирования представлены на рисунках 5–8. Листинг программы моделирования представлен в Приложении А4.

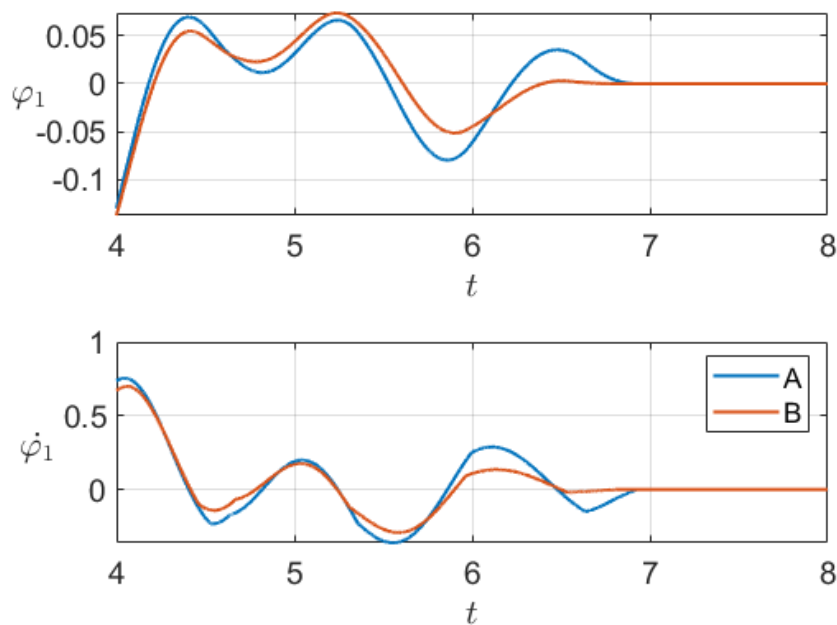


Рисунок 5 – Перемещение и скорость по координате φ_1 , В – под управлением (33),

А – (34)

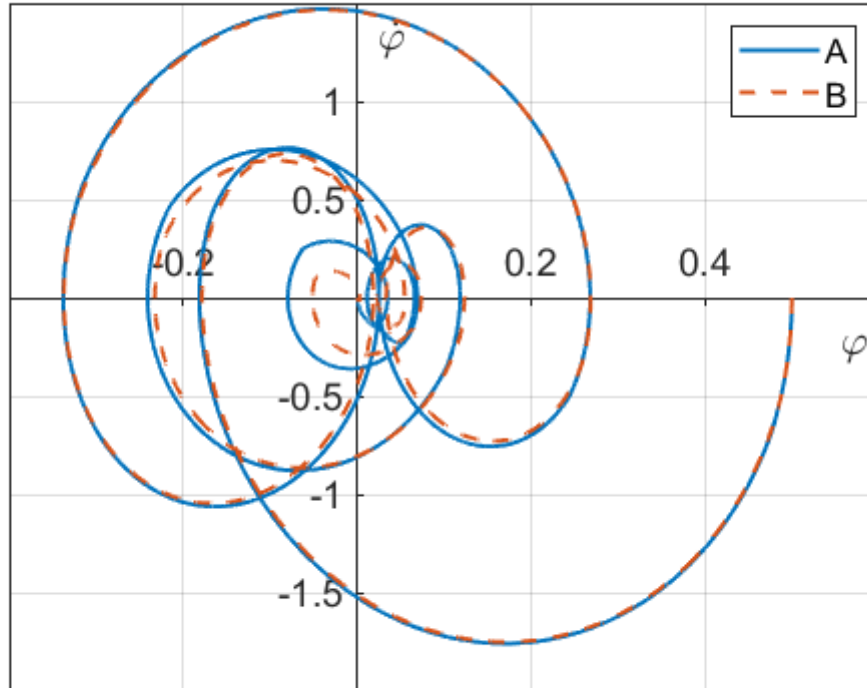


Рисунок 6 – Фазовая плоскость ϕ_1 , B – под управлением (33), A – (34)

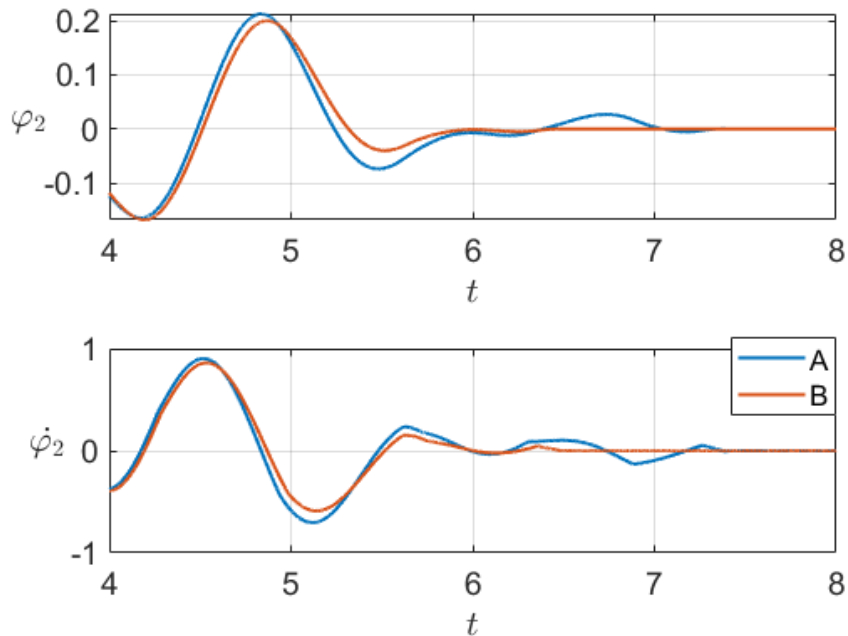


Рисунок 7 – Перемещение и скорость по координате ϕ_2 , B – под управлением (33), A – (34)

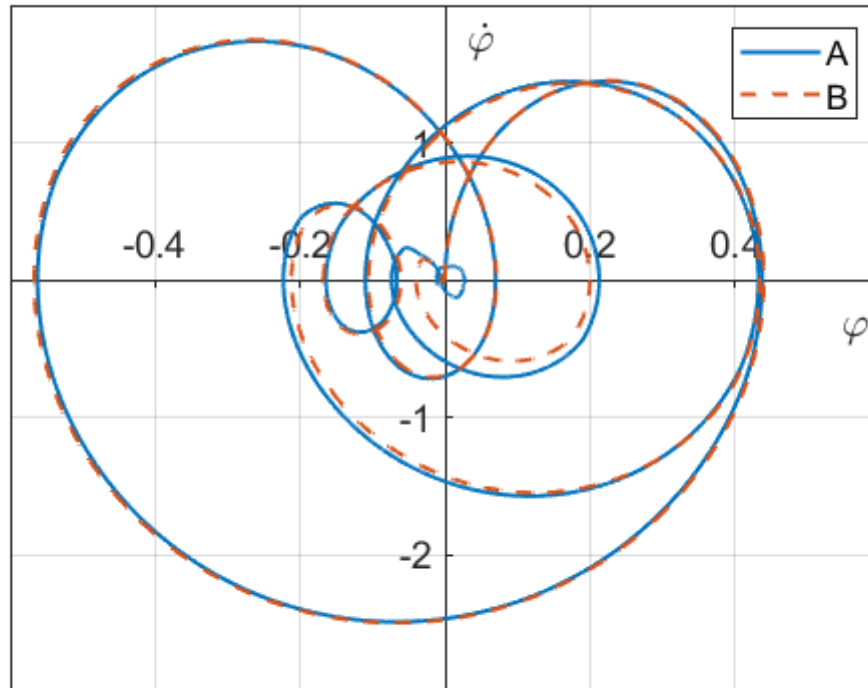


Рисунок 8 – Фазовая плоскость φ_2 , B – под управлением (33), A – (34)

Оценка эффективности по показателю быстродействия: под управлением (33) система попадает в окрестность терминальной точки за 6.824 с, под управлением (34) – за 7.372 с, выигрыш 7.434 %. Оценка эффективности по квадратичному функционалу: 0.443 рад² для управления (33) и 0.444 рад² для управления (34), выигрыш 0.195 %.

Анализ результатов моделирования показывает, что разработанный метод синтеза квазиоптимальных законов управления нелинейной динамической системой с несколькими степенями свободы позволяет получить выигрыш по функционалу быстродействия и по квадратичному функционалу в сравнении с известным управлением, построенным на основе игрового подхода.

Рассмотрим задачу управления обратным маятником на тележке. Кинетическая энергия системы задается матрицей квадратичной формы

$$A = \begin{bmatrix} \frac{(m_c + m_p)}{2} & \frac{m_p l \cos \varphi}{2} \\ \frac{m_p l \cos \varphi}{2} & \frac{m_p l^2}{2} \end{bmatrix}, \quad (36)$$

где m_p – масса маятника, сосредоточенная на конце невесомого стержня, m_c – масса тележки, l – длина стержня маятника.

Уравнения Лагранжа второго рода системы имеют вид

$$\begin{cases} (m_p + m_c) \ddot{s} + m_p l (\ddot{\varphi} \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 \sin \varphi) = \dot{s} / m_c + u_s, \\ m_p l (\ddot{s} \cos \varphi - \dot{s} \dot{\varphi} \sin \varphi) + m_p l^2 \ddot{\varphi} + m_p l \dot{s} \dot{\varphi} \sin \varphi = m_p g l \sin \varphi. \end{cases} \quad (37)$$

где u_s и u_φ – управления по соответствующей координате.

Управление

$$u_s = \text{sat} \left[\lambda^{-1} b_s \Psi_s(s, \dot{s}) + \lambda^{-1} b_\varphi \Psi_\varphi(\varphi, \dot{\varphi}) \right] \quad (38)$$

$$\Psi_s(s, \dot{s}) = \alpha_{s1} s + \alpha_{s2} \frac{|\dot{s}| \dot{s}}{|\dot{s}| + \alpha_{s3}}$$

$$\Psi_\varphi(\varphi, \dot{\varphi}) = \alpha_{\varphi1} \varphi + \alpha_{\varphi2} \frac{|\dot{\varphi}| \dot{\varphi}}{|\dot{\varphi}| + \alpha_{\varphi3}}$$

$$b_s = \frac{\cos \varphi}{m_p \sin^2 \varphi + m_c},$$

$$b_\varphi = \frac{m_p + m_c}{(m_p \sin^2 \varphi + m_c) m_p L^2},$$

где L – эффективная длина маятника

Одной из задач проблемы управления является сохранение устойчивости системы при различных начальных условиях. Линейные законы управления рассчитываются для небольшой области переменных вектора состояния вблизи рабочей точки, в результате чего система может терять устойчивость при увеличении влияния ее нелинейных элементов.

Так, например, рассмотрим полученное управление (38) при управлении системой (37) в сравнении с управлением на основе линейной модели [136]

$$u_{in} = \text{sat}[6.95s + 10.27\dot{s} + 61.1292\phi + 17.9\dot{\phi}], \quad (39)$$

где $\text{sat}(f)$ – ограничение на управление.

Проведем моделирование системы с начальными условиями $s_0 = 0$, $\dot{s}_0 = 0$, $\phi_0 = 0,15$, $\dot{\phi}_0 = 2$, при $h = 10$, $\lambda = 1$, $\alpha_{s1} = 2.5$, $\alpha_{s2} = 10$, $\alpha_{s3} = 0.1$, $\alpha_{\phi1} = 5$, $\alpha_{\phi2} = 10$, $\alpha_{\phi3} = 1$. Результаты моделирования представлены на рисунках 9–11, откуда можно увидеть, что закон управления (38) приводит систему в окрестность терминальной точки за конечное время, а закон (39) не обеспечивает устойчивость системы. Листинг программы моделирования представлен в Приложении А5.

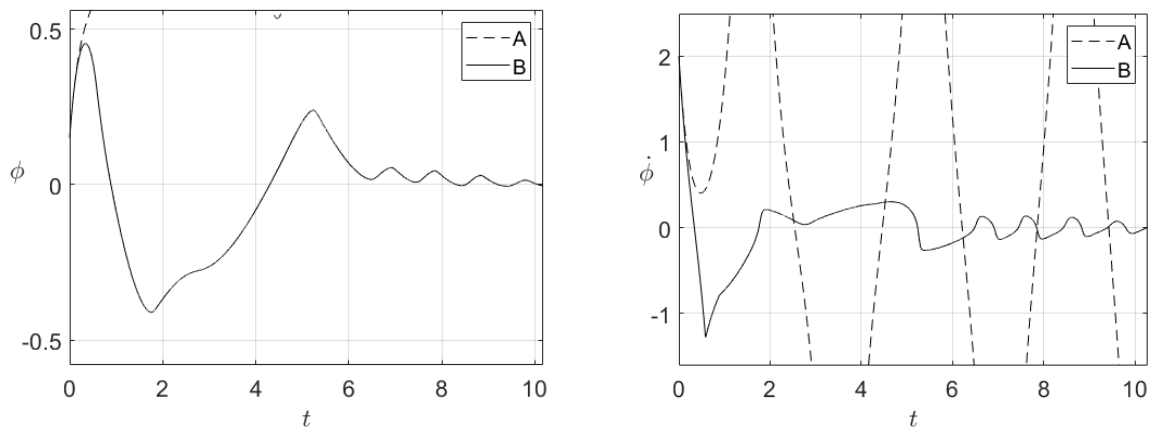


Рисунок 9 – Поведение системы (37) по степени свободы маятника: А – управление (39), В – управление (38)

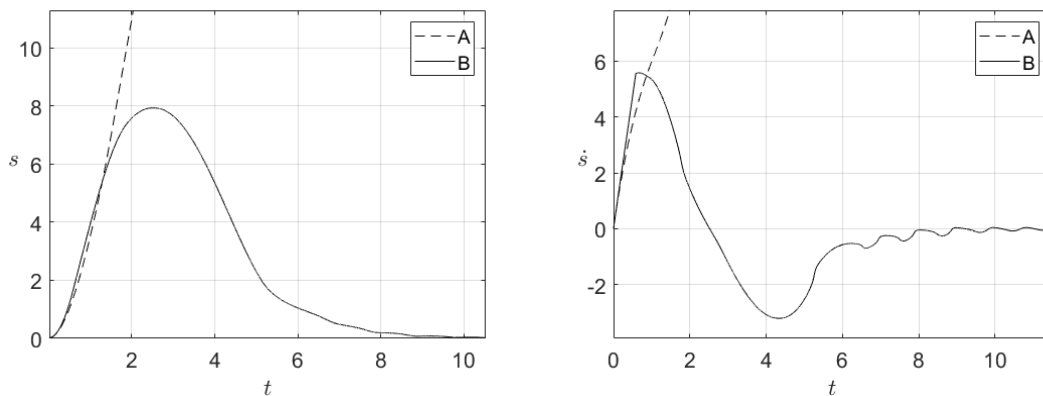


Рисунок 10 – Поведение системы (37) по степени свободы тележки: А – управление (39), В – управление (38)

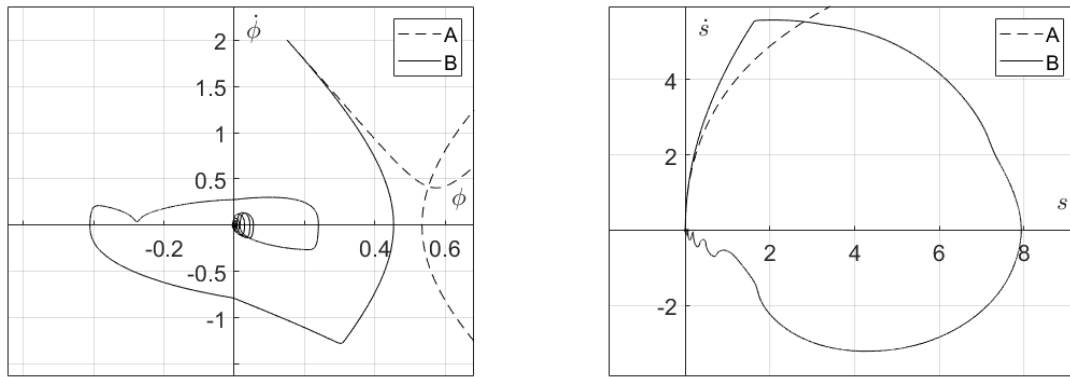


Рисунок 11 – Поведение системы (37) на фазовых плоскостях: А – управление (39), В – управление (38)

Анализ результатов моделирования показывает, что в сравнении с законом управления на основе линейной модели закон управления, разработанный с использованием метода квазиоптимального синтеза на основе условия максимума функции обобщенной мощности для систем с дефицитом управляющих воздействий, позволяет увеличить область начальных условий, при которых нелинейная динамическая система достигает окрестности терминальной точки за конечное время.

Для настройки параметров алгоритма управления и анализа его эффективности в сравнении с известным решением была создана и зарегистрирована программа для ЭВМ «Программа настройки параметров системы управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности для объекта типа «обратный маятник на тележке»» [54], листинг программы представлен в Приложении А1.

2.3 Выводы по главе

1. Рассмотрен метод синтеза квазиоптимальных законов управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности, позволяющий установить структуру управляющей обобщенной силы для лагранжевой динамической системы при стационарных связях с точностью до синтезирующей

функции. Данный метод позволяет синтезировать закон, содержащий оптимальные решения задачи управления, что может быть использовано при построении интеллектуального алгоритма управления транспортными системами.

2. Получена структура квазиоптимального закона с использованием рассмотренного метода на основе условия максимума функции обобщенной мощности. Структура синтезирующей функции установлена на основе анализа обобщенного кинетического потенциала с учетом выполнения условий трансверсальности в соответствии с принципом освобождаемости и условием обращения в ноль скобок Пуассона. Показана возможность применения разработанного метода для систем с несколькими степенями свободы. Результаты моделирования различных нелинейных систем с синтезированным законами управления дают возможность сделать вывод, что полученная структура квазиоптимального закона позволяет повысить эффективность управления нелинейными динамическими системами по показателю быстродействия и квадратичному функционалу в сравнении с известными законами, а в некоторых случаях обеспечить устойчивость в более широком диапазоне начальных условий, и может быть использована для синтеза интеллектуального алгоритма управления.

3 Синтез интеллектуальных алгоритмов управления

3.1 Синтез интеллектуального алгоритма управления с нечетким логическим выводом

Синтезированные в предыдущей главе квазиоптимальные законы управления могут использоваться для формирования САУ транспортной системой с известными параметрами и возмущениями, однако в случае какой-либо неопределенности для эффективного управления требуется возможность адаптации параметров САУ, что можно обеспечить за счет применения нечеткого логического вывода. Рассмотрим задачу построения интеллектуального алгоритма управления на примере нелинейной системы с определенной структурой возмущающих сил, которая в первом приближении описывает динамику движения высокоскоростного транспорта в среде с сопротивлением (схема системы представлена на рисунке 12) [123]

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= Q + u, \\ Q &= -0.8\dot{x}^2. \end{aligned} \quad (40)$$

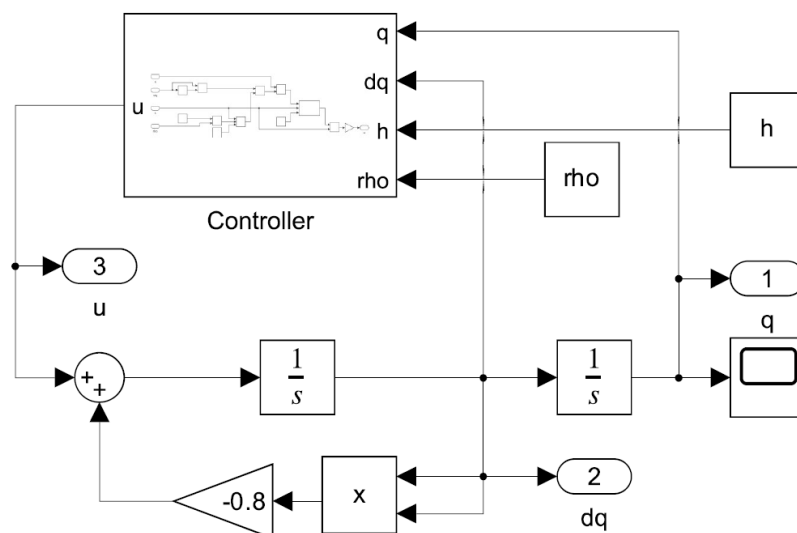


Рисунок 12 – Схема в MATLAB Simulink системы (40)

Управление системой (40), предложенное в [123], имеет вид

$$\begin{aligned}
 u_{resh} &= h \cdot \text{sat}(\psi(x, \dot{x})), \\
 \psi(x, \dot{x}) &= -x - k \cdot \dot{x}|\dot{x}|, \\
 k &= [2h(1-\rho)]^{-1},
 \end{aligned} \tag{41}$$

где h – ограничение на управление, ρ – постоянная, определяющая величину независимых ограниченных возмущений $V: |V| \leq \rho h, \rho < 1$, $\text{sat}(\psi)$ – функция насыщения, обеспечивающая сглаживание скользящего режима [123],

$$\text{sat}\psi = \begin{cases} 1, & \psi > \varepsilon, \\ \frac{\psi}{\varepsilon}, & |\psi| \leq \varepsilon, \\ -1, & \psi < -\varepsilon, \end{cases} \tag{42}$$

где ε – малая положительная постоянная.

Схема управления (41) представлена на рисунке 13.

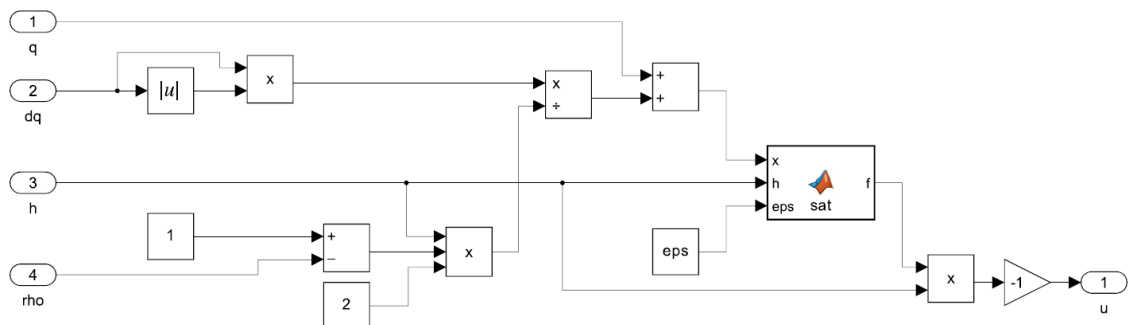


Рисунок 13 – Схема в MATLAB Simulink управления (41)

Для системы (40) и управления (41) в работе [123] предложены следующие значения постоянных: $\varepsilon = 10^{-3}$, $\rho = 0,5$, $h = 1$.

Рассмотрим закон на основе условия максимума функции обобщенной мощности с формой синтезирующей функции, представленной в работах [87; 88; 137]:

$$u_{cmp} = \text{sat} \left[k_1 \left(x + k_2 \frac{\dot{x}|\dot{x}|}{|x| + k_3} \right) \right] \tag{43}$$

где k_1, k_2, k_3 – параметры управления.

В качестве показателя эффективности управления будем рассматривать функционал быстродействия

$$J_t = \int_{t_0}^{t_k} dt, \quad (44)$$

где t_0 – начало управления, t_k – время достижения заданной окрестности терминальной точки $x_k = \pm\xi$, $\dot{x}_k = \pm\xi$, в расчетах примем $\xi = 10^{-2}$.

Параметры управления (43) k_1 и k_2 можно определить в соответствии с параметрами управления (41): $k_1 = -1$, $k_2 = [2h(1-\rho)]^{-1}$. Для определения параметра k_3 воспользуемся аппаратом нечеткой логики [97], а именно построим нечеткий вывод Такаги-Сугено (TS-модель).

Нечеткий логический вывод Такаги-Сугено выполняется по базе знаний, которая имеет вид [100; 138]

$$\begin{aligned} R_j : (x_1 = A_{1j} \Theta x_2 = A_{2j} \Theta \dots \Theta x_n = A_{nj}) \Rightarrow \\ \Rightarrow y_j = f_j(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad j = \overline{1, m}, \end{aligned} \quad (45)$$

где R_j – j -ое правило нечеткой базы знаний, m – количество правил базы, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор n входных переменных, например, вектор состояния объекта управления, A_{ij} – нечеткий терм, которым оценивается i -ая входная переменная в j -ом правиле [100, с. 39], Θ – логическая операция «И» или «ИЛИ», y_j – заключение j -го правила, $f_j(\mathbf{x})$ – некоторая функция, определяющая y_j .

Выходной сигнал представляет собой нормализованную взвешенную сумму выходов y_j , $j = \overline{1, m}$, т.е.

$$y = \frac{\sum_{j=1}^m w_j y_j}{\sum_{j=1}^m w_j}, \quad (46)$$

где w_j – степень принадлежности входного вектора \mathbf{x} к значениям $y_j = f_j(\mathbf{x})$, определяется как

$$w_j = \mu_j(x_1) \theta \mu_j(x_2) \theta \dots \theta \mu_j(x_n), \quad j = \overline{1, m}, \quad (47)$$

где $\mu_j(x_i)$ – функция принадлежности входной переменной x_i нечеткому терму A_{ij} , θ – t-норма при $\Theta = \text{И}$ и s-норма при $\Theta = \text{ИЛИ}$.

В качестве t-нормы используют [100, с. 13] пересечение по Заде ($a \theta b = \min(a, b)$) или вероятностное пересечение (умножение) ($a \theta b = a \cdot b$), а в качестве s-нормы используют объединение по Заде ($a \theta b = \max(a, b)$) или вероятностное «ИЛИ» ($a \theta b = a + b - ab$).

Рассмотрим поведение системы (40) под управлением (43) на множестве начальных условий $x_0 \in [0; 1]$, $\dot{x}_0 = 0$. С помощью численного моделирования были получены значения параметра k_3 , обеспечивающие выигрыш по критерию быстродействия в сравнении с управлением (41), полученные значения параметра в зависимости от начальных условий x_0 представлены на рисунке 14.

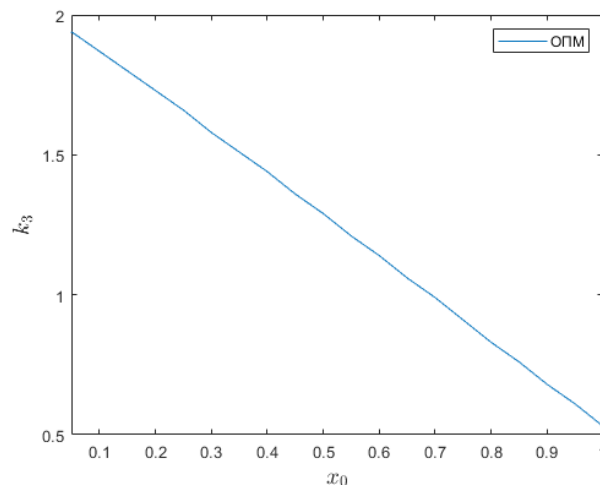


Рисунок 14 – Зависимость коэффициента k_3 от координаты системы

Закон управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности с нечетким параметром на основе нечеткого логического вывода

Такаги-Сугено типа SISO (один входной параметр, один выходной параметр) имеет вид

$$u_{fuzzy} = sat \left[k_1 \left(x + k_2 \frac{\dot{x}|\dot{x}|}{|x| + \tilde{k}_3} \right) \right], \quad (48)$$

где \tilde{k}_3 – нечеткий параметр,

$$\tilde{k}_3 = \beta_1 m_1 + m_2 \beta_2, \quad (49)$$

m_1 и m_2 – функции принадлежности входной переменной, $m_2 = 1 - m_1$, β_1 и β_2 – выходные значения, определенные для области, формализуемой функциями принадлежности m_1 и m_2 соответственно. Результаты численного моделирования, представленные на рисунке 14, показывают, что зависимость коэффициента k_3 от координаты системы может быть описана выражением (49) с параметрами $\beta_1 = 2$, $\beta_2 = 0.53$ и функцией принадлежности m_1 класса L [139]:

$$m_1(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < a_1, \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2, \\ 0, & a_2 < x, \end{cases} \quad (50)$$

где a_1 , a_2 – параметры функции принадлежности, определяющие область ее действия, в данном примере рассматривается область $x_0 \in [0; 1]$, поэтому примем $a_1 = 0$, $a_2 = 1$.

Схема интеллектуального алгоритма управления (48) представлена на рисунке 15.

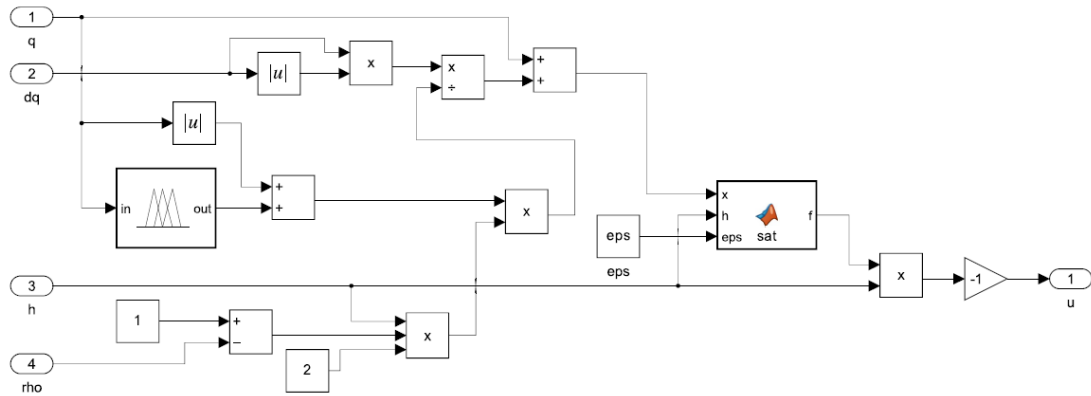


Рисунок 15 – Схема в MATLAB Simulink построенного управления (43)

Проведем моделирование поведения системы (40) под управлением (48) с нечетким параметром на начальных условиях $x_0 \in [0; 1]$, $\dot{x}_0 = 0$ и сравним результаты с той же системой под управлением (41) по критерию быстродействия, получим результаты, представленные на рисунке 16.

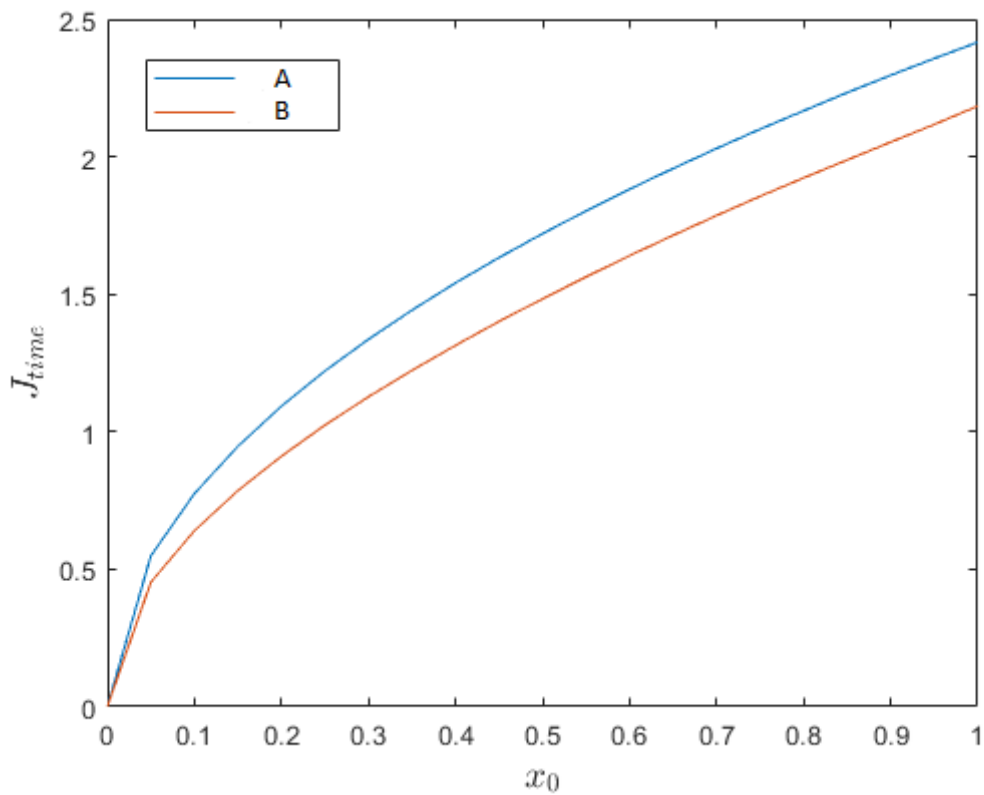


Рисунок 16 – Значения показателя эффективности в зависимости от начальных условий системы в диапазоне $x_0 \in [0; 1]$: А – (41), В– (48)

Результаты моделирования показывают, что управление (48) с нечетким параметром (49) позволяет получить выигрыш по быстродействию в сравнении с управлением (41) на множестве начальных условий $x_0 \in [0; 1]$, $\dot{x}_0 = 0$.

Рассмотрим применимость полученного управления (48) с нечетким параметром (49) для системы (40) на области начальных условий $x_0 \in [-1; 1]$, $\dot{x}_0 = 0$ в сравнении с управлением (41). Значения критерия быстродействия для системы под управлениями (48) и (41) представлены на рисунке 17.

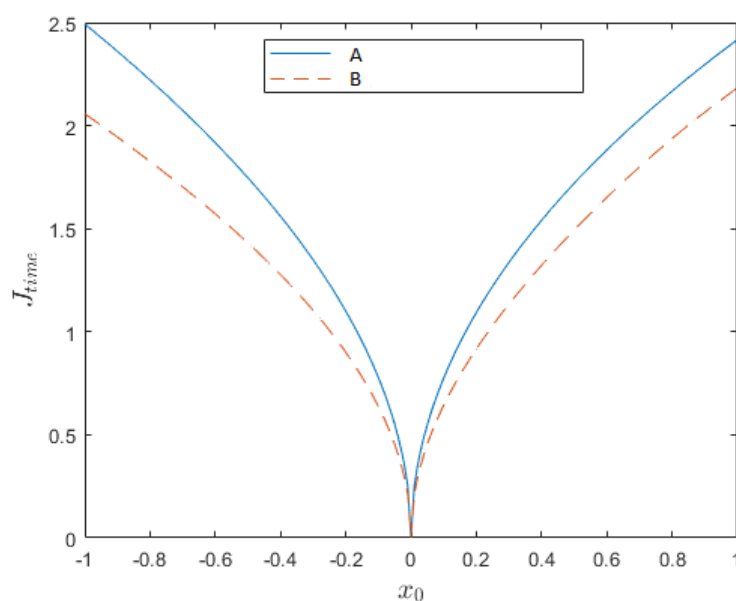


Рисунок 17 – Значения показателя эффективности в зависимости от начальных условий системы в диапазоне $x_0 \in [-1; 1]$: A – (41), B – (48)

Анализ результатов моделирования показывает, что применение закона управления (48) на основе условия максимума функции обобщенной мощности с нечетким параметром для управления системой (40) позволяет получить выигрыш по функционалу быстродействия до 17,5 % в сравнении с законом (41) на области начальных условий $x_0 \in [-1; 1]$, $\dot{x}_0 = 0$.

В работе [140] проведен анализ эффективности интеллектуального алгоритма с другой формой функций принадлежности $m_1(q)$, $m_2(q)$, которые определены в виде

$$m_1(q) = \frac{1}{1 + e^{-12(q-0.5)}}, \quad m_2(q) = \frac{1}{1 + e^{12(q-0.5)}}, \quad (51)$$

их графики представлены на рисунке 18.

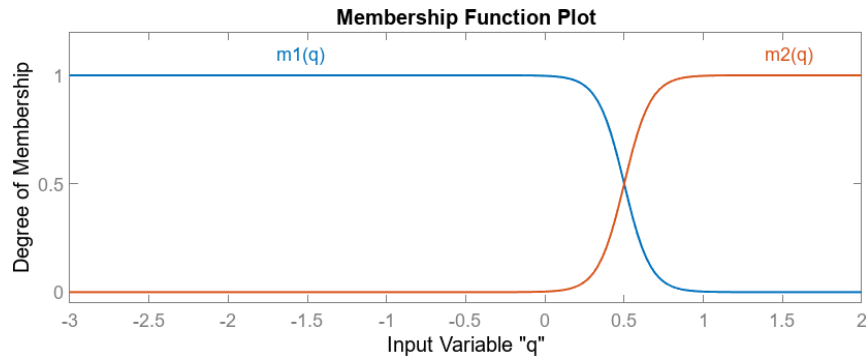


Рисунок 18 – Функции принадлежности (51), реализованы в программном пакете MATLAB Fuzzy Logic Designer

Значения показателя эффективности (44) для систем (40), (43) и (40), (41) с параметрами [123; 141] $\varepsilon = 10^{-3}$, $h = 1$, $k_1 = -1$, $k_2 = [2h(1-\rho)]^{-1}$ на области начальных условий $q_0 = -1$, $\dot{q}_0 \in [-1, 1]$ представлены на рисунке 19. Так как на выбранном интервале $\dot{q}_0 \in [-1, 1]$ максимальное по модулю значение $v = -0,8\dot{q}^2 = 0,8$, определим $\rho = 0,8$.

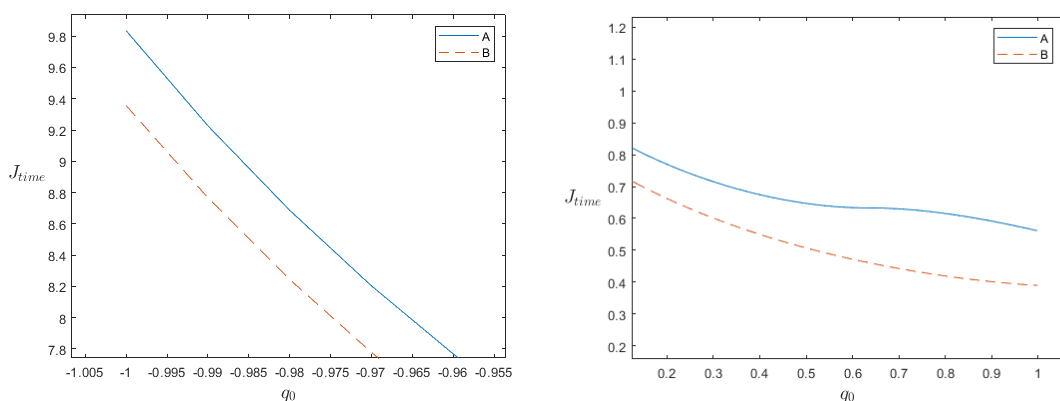


Рисунок 19 – Значения показателя (44) (левый и правый края интервала \dot{q}_0) при управлении системой (40): A – известное управление (41), B – построенное управление (43)

Результаты моделирования показывают, что на рассмотренной области начальных условий разработанное управление (43) доставляет выигрыш по функционалу (44) в сравнении с управлением (41).

Заметим, что полученное управление обеспечивает выигрыш не на всей области начальных значений скорости системы, что показано на рисунке 20, где представлены значения функционала быстродействия в зависимости от начальных условий на области $x_0 \in [-1; 1]$, $\dot{x}_0 \in [-1; 1]$ для управлений (48) и (41).

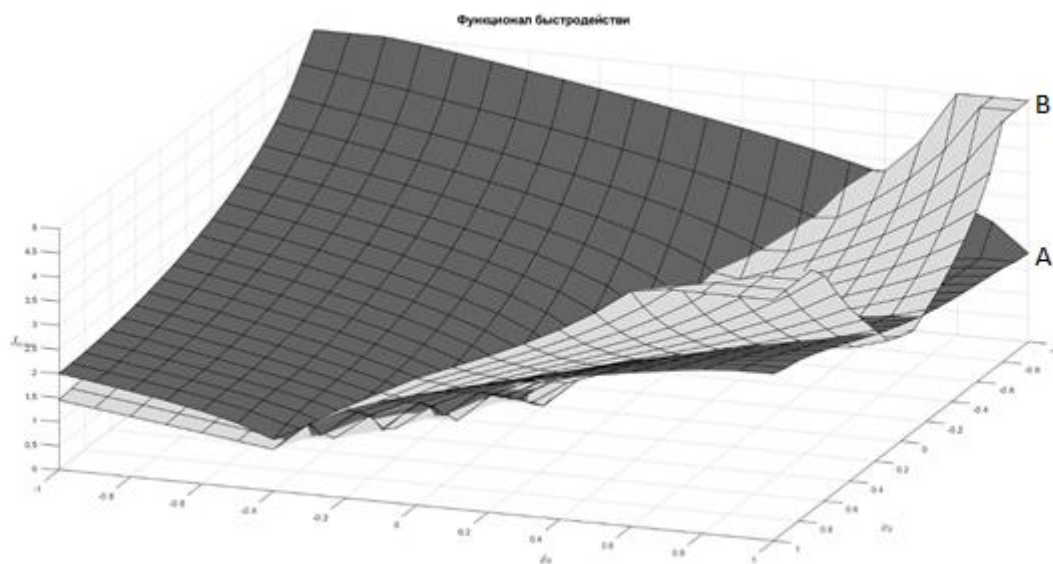


Рисунок 20 – Значения показателя эффективности в зависимости от начальных условий системы в диапазоне $x_0 \in [-1; 1]$, $\dot{x}_0 \in [-1; 1]$: A – (41), B – (43)

Анализ результатов моделирования показывает, что разработанный интеллектуальный алгоритм управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода (48) позволяет получить выигрыш по функционалу быстродействия при управлении нелинейной динамической системой (40) в сравнении с известным решением (41), полученным на основе игрового подхода для наихудшего случая возмущения, на

определенной области начальных значений вектора состояния управляемой системы по функционалу быстродействия на величину до 17,5 %.

3.2 Синтез интеллектуального алгоритма управления нелинейными системами с несколькими степенями свободы

Рассмотрим задачу синтеза алгоритма управления для системы с несколькими степенями свободы (1). Построим алгоритм управления для i -ой подсистемы, для простоты опустим индекс i . Известный закон управления, предложенный в работе [123] имеет вид

$$u_1 = h \cdot \text{sat}(\Psi(x, \dot{x})),$$

$$\Psi(x, \dot{x}) = -x - \frac{\dot{x}|\dot{x}|}{2h(1-\rho)}, \quad (52)$$

где $\text{sat}(\Psi)$ – функция насыщения, обеспечивающая сглаживание функции переключения Ψ ,

$$\text{sat}(\Psi) = \begin{cases} 1, & \Psi > \chi, \\ \frac{\Psi}{\chi}, & |\Psi| \leq \chi, \\ -1, & \Psi < -\chi, \end{cases}$$

χ – малая положительная постоянная.

При этом, как показано в той же работе [123], управление (52) при достижении системой терминальной точки вызывает затухающие колебания управляющего сигнала, что может являться недопустимым для реальных систем управления или приводить к большим энергетическим затратам. Поэтому там же предложено многорежимное управление, которое по достижению окрестности терминальной точки переходит во второй режим (этап) с другой функцией переключения. Однако авторы замечают, что такое управление имеет точку разрыва на любой траектории – в момент переключения режима управления.

Для систем управления можно отметить следующее свойство: высокое быстродействие требуется при больших значениях координат систем

(рассогласований), а при достижении малых значений координат системы основной задачей становится необходимость удержания изображающей точки системы в начале координат фазового пространства [64; 142].

С точки зрения улучшения качества управления перспективно строить системы, фазовое пространство которых условно разбито на две области, каждая со своим критерием оптимизации. При этом переход из одной области в другую можно рассматривать как смену структур, синтезированных по различным показателям качества [64].

Определение устойчивости систем с несколькими режимами работы является сложной задачей, так как переключение между режимами в общем виде является случайным процессом [64], что может быть также осложнено наличием априорно неизвестных возмущений в виде шумов и неточности параметров объекта управления. В связи с этим целесообразно использовать подход, позволяющий избежать наличия точек разрыва в управлении. Одним из таких подходов является применение аппарата нечеткой логики [143], что приводит к построению интеллектуального управления с несколькими режимами работы и нечетким переключением между ними.

Для построения такого интеллектуального закона управления необходимо определить законы, действующие «в большом» и «в малом» отдалении от терминальной точки, а также нечеткий логический вывод, позволяющий объединить их, избегая точек разрыва. В качестве закона, действующего вдали от терминальной точки, выберем закон (52), так как он является квазиоптимальным по быстродействию и обладает малой чувствительностью к изменению параметров системы [123].

После достижения целевой окрестности терминальной точки система должна сохранять свое состояние, поэтому целесообразно в качестве закона «в малом» выбрать закон, позволяющий максимизировать область притяжения системы и применимый вблизи терминальной точки [130], который имеет вид

$$u_2 = \begin{cases} h, & \gamma(x + \dot{x}) \geq h, \\ \gamma(x + \dot{x}), & |\gamma(x + \dot{x})| < h, \\ -h, & \gamma(x + \dot{x}) \leq -h, \end{cases} \quad (53)$$

где γ – коэффициент усиления, $\gamma < -1$.

Для переключения между режимами (52) и (53) определим нечеткий логический вывод Такаги-Сугено [99; 100; 138] с базой правил

$$\begin{aligned} D_1 : r = \alpha_1 &\Rightarrow y_1 = u_1, \\ D_2 : r = \alpha_2 &\Rightarrow y_2 = u_2, \end{aligned} \quad (54)$$

где $r = \sqrt{x^2 + \dot{x}^2}$ – расстояние до терминальной точки, α_1, α_2 – нечеткие лингвистические термы блока фаззификации, в котором выполняется процедура определения значений функций принадлежности $m_1(x), m_2(x)$ соответственно; y_1, y_2 – выходные переменные блока вывода [138].

Интеллектуальный закон на базе законов (52), (53) и нечеткого логического вывода с базой правил (54) будет иметь вид

$$u_{\text{int}} = \frac{m_1(x)y_1 + m_2(x)y_2}{m_1(x) + m_2(x)}. \quad (55)$$

Рассмотрим систему (1) с двумя степенями свободы в виде [123; 135]

$$A\ddot{q} = u + Q \quad (56)$$

с матрицей кинетической энергии вида

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (57)$$

внешними силами

$$Q_1 = \sin(2q_1 + q_2), Q_2 = -0,8(\dot{q}_1 + 2\dot{q}_2)^2 \quad (58)$$

и начальными и конечными условиями

$$\begin{aligned} \mathbf{q}(t_0) &= [0,87; -0,93], \dot{\mathbf{q}}(t_0) = [0; 0], \\ \mathbf{q}^* &= [0; 0], \dot{\mathbf{q}}^* = [0; 0]. \end{aligned} \quad (59)$$

Тогда уравнения (56) примут вид

$$\begin{cases} 2q_1 + q_2 = u_1 + \sin(2q_1 + q_2), \\ q_1 + 2q_2 = u_2 - 0,8(\dot{q} + 2\dot{q}_2)^2. \end{cases} \quad (60)$$

Сделаем замену

$$\begin{aligned} x_1 &= 2q_1 + q_2, \\ x_2 &= q_1 + 2q_2 \end{aligned}$$

и рассмотрим получившиеся подсистемы

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 &= u_1 + \sin(x_1), \\ \ddot{x}_2 &= u_2 - 0,8\dot{x}_2^2, \end{aligned} \quad (61)$$

при этом начальные условия для каждой из систем примут вид

$$\begin{aligned} x_1(t_0) &= 0,8, & \dot{x}_1(t_0) &= 0, \\ x_2(t_0) &= -1, & \dot{x}_2(t_0) &= 0. \end{aligned} \quad (62)$$

Рассмотрим подсистему вида

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= v + u, \\ v &= \sin x, \end{aligned} \quad (63)$$

которая соответствует классической задаче управления обратным маятником [144], где x – отклонение маятника от нормали, а точка $[x, \dot{x}] = [0, 0]$ – точка неустойчивого равновесия.

Заметим, что система (63) может рассматриваться при различных параметрах обратного маятника, так как достаточно провести некоторые преобразования для введения безразмерного времени, что приведет к форме (63) [130].

Проведем моделирование систем (63), (52) и (63), (55) при начальных условиях $[x_0, \dot{x}_0] = [0, 8; 0]$ с параметрами $\delta_1 = 0,01$ град, $\delta_2 = 0,01$ град/с, $\rho = 0,717$, $\gamma = 4$,

$$m_1(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0, \\ 2\left(\frac{x}{0,017}\right)^2, & 0 < x \leq \frac{0,017}{2}, \\ 1 - 2\left(\frac{x - 0,017}{0,017}\right)^2, & \frac{0,017}{2} < x \leq 0,017, \\ 1, & x > 0,017, \end{cases} \quad (64)$$

$$m_2(x) = 1 - m_1(x).$$

Поведение системы (63) под управлением закона (52) и закона (55) представлено на рисунке 21, управляющие сигналы законов (52), (55) показаны на рисунке 22.

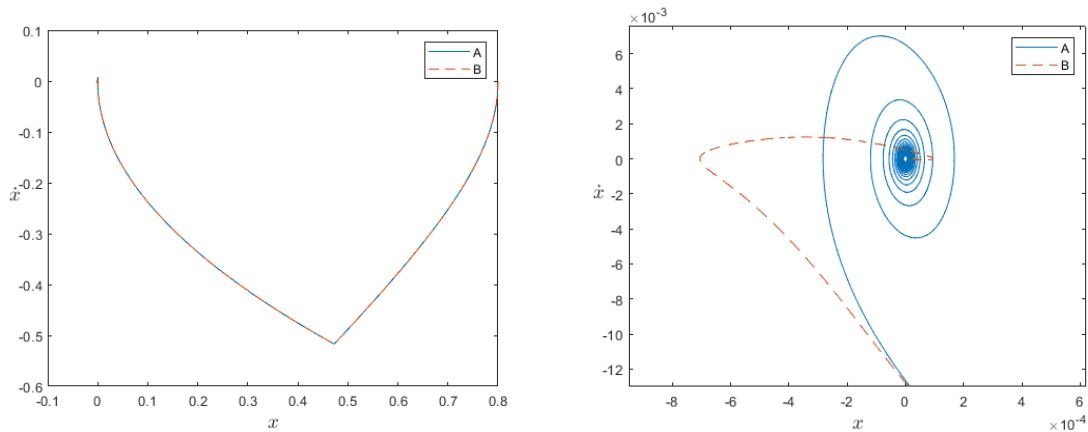


Рисунок 21 – Поведение системы (63) на фазовой плоскости: А – управление (52), В – управление (55), справа – вблизи терминальной точки

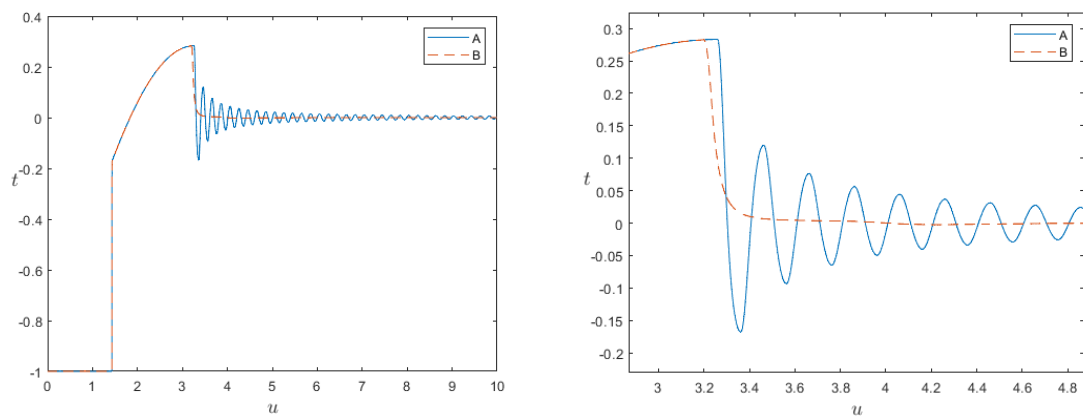


Рисунок 22 – Управляющие сигналы для системы (63): А – (52), В – (55), справа – вблизи терминальной точки

Закон управления (52) приводит систему (63) в окрестность терминальной точки за 3,26 с, закон (55) – за 3,33 с. При этом в отличие от закона (52) закон (55) позволяет избежать появления колебательного режима управляющего сигнала вблизи терминальной точки.

Рассмотрим подсистему, представленную в работе [123] для анализа закона управления (52):

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= v + u, \\ v &= -0,8\dot{x}^2,\end{aligned}\tag{65}$$

Проведем моделирование систем (65), (52) и (65), (55) при начальных условиях $[x_0, \dot{x}_0] = [-1; 0]$ с параметрами $\delta_1 = 0,01$ град, $\delta_2 = 0,01$ град/с, $\rho = 0,8$, $\gamma = 4$, $m_1(x)$ и $m_2(x)$ те же, что и в (64).

Поведение системы (65) под управлением закона (52) и закона (55) представлено на рисунке 23, управляющие сигналы законов (52), (55) показаны на рисунке 24.

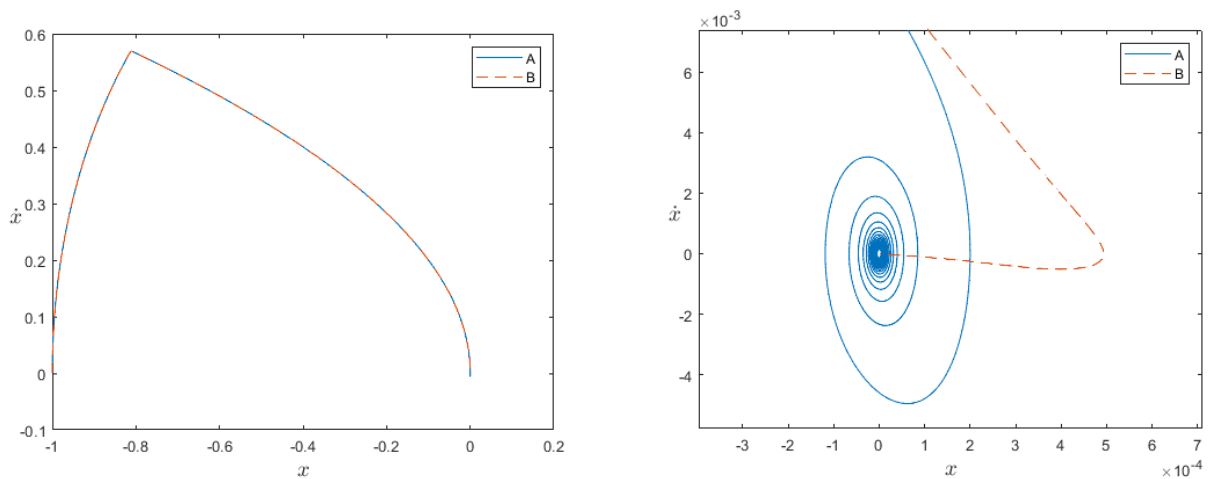


Рисунок 23 – Поведение системы (65) на фазовой плоскости: А – управление (52), В – управление (55), справа – вблизи терминальной точки

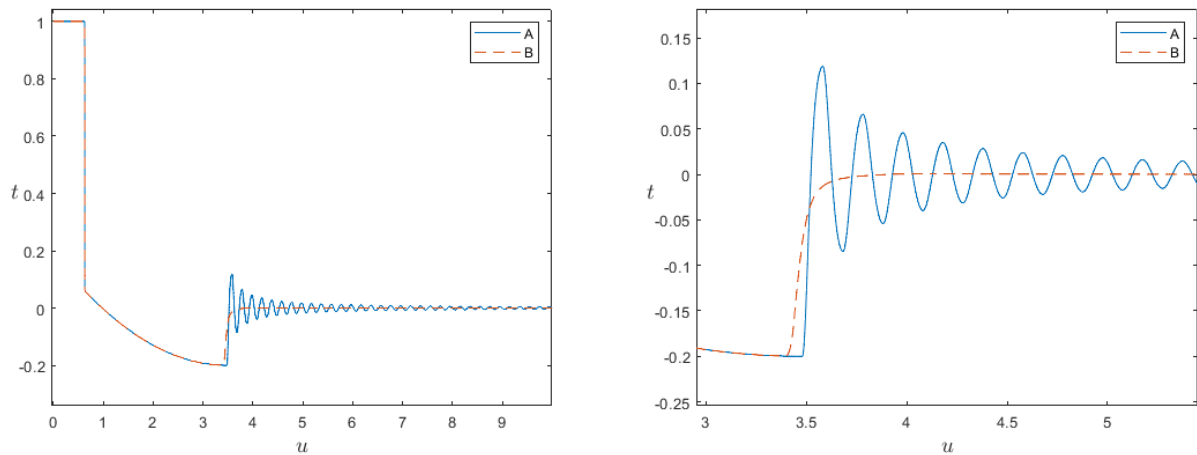


Рисунок 24 – Управляющие сигналы для системы (65): А – (52), В – (55), справа – вблизи терминальной точки

Закон управления (52) приводит систему (65) в окрестность терминальной точки за 3,47 с, закон (55) – за 3,55 с. При этом так же, как и в предыдущем примере, закон (55) позволяет избежать появления колебательного режима управляющего сигнала вблизи терминальной точки в отличие от закона (52).

После определения управлений для каждой из подсистем системы (56) воспользуемся ими для управления исходной системой с параметрами (57), (58). Такая система, разрешенная относительно вторых производных, имеет вид

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 = \frac{2}{3}u_1 + \frac{2}{3}Q_1 - \frac{1}{3}u_2 - \frac{1}{3}Q_2, \\ \ddot{q}_2 = \frac{2}{3}u_2 + \frac{2}{3}Q_2 - \frac{1}{3}u_1 - \frac{1}{3}Q_1. \end{cases} \quad (66)$$

Проведем моделирование системы (66) при условиях (62), результаты моделирования представлены на рисунке 5. Система достигает терминального состояния за конечное время, значит, интеллектуальные управления, построенные для каждой из подсистем, обеспечивают устойчивость всей системы.

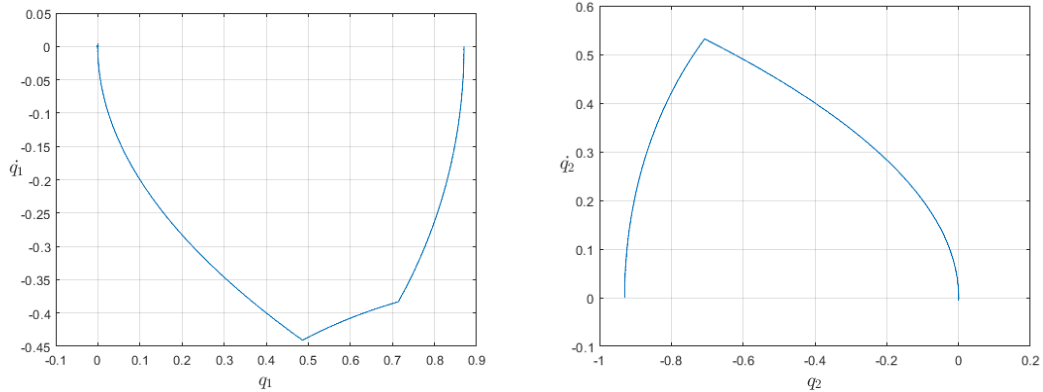


Рисунок 25 – Поведение системы (66) на фазовой плоскости по двум степеням свободы

Анализ результатов моделирования показывает, что построенное интеллектуальное управление (55) на базе нечеткого логического вывода сохраняет преимущества законов (52) и (55): не требует точного знания нелинейных членов и возмущающих сил в уравнениях движения, мало чувствительно к незначительным вариациям параметров системы и дополнительных возмущений [123], а также не имеет точек разрыва на области управления.

Построенный интеллектуальный закон управления на основе квазиоптимального по быстрдействию закона и закона, обеспечивающего максимизацию области притяжения, с использованием нечеткого логического вывода обеспечивает достижение окрестности терминальной точки за время, близкое к оптимальному, при этом в сравнении с известным квазиоптимальным по быстрдействию законом управления предлагаемый закон не входит в колебательный режим вблизи терминальной точки, а также не имеет точек разрыва на траектории движения нелинейной динамической системы.

3.3 Синтез интеллектуального алгоритма на основе интеллектуализации многорежимного алгоритма управления

Применение нечеткого логического вывода для структурной адаптации позволяет получить интеллектуальный алгоритм управления из структуры

известного многорежимного алгоритма на основе условия максимума функции обобщенной мощности, что дает возможность исключить появление режима учащающихся переключений.

Рассмотрим случай, когда области фазового пространства известны нечетко и области определения принимают вид: $D'_i = \{(q, \dot{q}) \mid q \in M_{xi}, \dot{q} \in M_{yi}\}$, где M_{xi}, M_{yi}

– нечеткие попарно пересекающиеся интервалы: $\forall q_{0i}, q_{ki}, \forall q \in [q_{0i}, q_{ki}]$,

$m_{xi}(q) \geq \min(m_{xi}(q_{0i}), m_{xi}(q_{ki})); \quad \forall \dot{q}_{0i}, \dot{q}_{ki}, \quad \forall \dot{q} \in [\dot{q}_{0i}, \dot{q}_{ki}]$,

$m_{yi}(\dot{q}) \geq \min(m_{yi}(\dot{q}_{0i}), m_{yi}(\dot{q}_{ki})); \quad m_{xi}(q), \quad m_{yi}(\dot{q})$ – функции принадлежности.

Тройками (x, T_x, X) и (y, T_y, Y) заданы лингвистические переменные x и y ;

$T_x = \{T_x^1, \dots, T_x^m\}$, $T_y = \{T_y^1, \dots, T_y^m\}$ – терм-множества лингвистических значений на

нечетких множествах $X \subseteq \bigcup_{i=1}^m M_{xi}$, $Y \subseteq \bigcup_{i=1}^m M_{yi}$.

Положим, что управляющие обобщенные силы описываются нечетким логическим выводом Такаги-Сугено типа MISO [99], в которой m правил задано с точностью до функций $u_i, i = \overline{1, m}$, каждого из заключений и выбрана t -норма для вычисления функции принадлежности.

Ставится задача синтеза интеллектуального алгоритма с нечетким логическим выводом: для каждого из m заключений множества правил требуется найти функции $u_i \in \overline{G}_i, i = \overline{1, m}$, как решения экстремальных задач (1), (3), (6).

Пусть $F(q) = q^2$. Тогда квазиоптимальное решение может быть получено на основе условия максимума функции обобщенной мощности [145] в следующей форме [121]:

$$u_i(q, \dot{q}) = -g_i \left(\lambda^{-1} \left[\mu_i(q, \dot{q}) \dot{q} + 2q \right] \right), \quad (67)$$

где λ – неопределенный множитель Лагранжа; $\mu_i(q, \dot{q})$ – синтезирующая знакопостоянная функция [121];

$$g_i(u_s) = \begin{cases} \lambda^{-1} \left[\mu_i(q, \dot{q}) \dot{q} + \frac{\partial F}{\partial q} \right], & \left| \lambda^{-1} \left[\mu_i(q, \dot{q}) \dot{q} + \frac{\partial F}{\partial q} \right] \right| \leq h_i, \\ h_i \operatorname{sign} \left(\lambda^{-1} \left[\mu_i(q, \dot{q}) \dot{q} + \frac{\partial F}{\partial q} \right] \right), & \left| \lambda^{-1} \left[\mu_i(q, \dot{q}) \dot{q} + \frac{\partial F}{\partial q} \right] \right| > h_i, \end{cases} \quad (68)$$

– функция насыщения.

Метод построения синтезирующей функции может быть основан на предположении о стационарности одного из первых интегралов движения системы, например, обобщенной функции Гамильтона. Это позволяет представить уравнения Лагранжа второго рода в соответствующих областях фазового пространства в следующем виде [145]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial T}{\partial q} = Q - g_i \left\{ \lambda^{-1} \left[\frac{\lambda \left| \frac{\partial^2 F}{\partial q^2} \right| |\dot{q}|}{\left| \frac{\partial F}{\partial q} + \varepsilon \sqrt{\lambda \left(\frac{\partial^2 F}{\partial q^2} \right)} \right|} \dot{q} + \frac{\partial F}{\partial q} \right] \right\}. \quad (69)$$

Из (69) имеем следующую структуру управления [145]

$$U = \begin{cases} - \left(k_1 q + k_2 \frac{|\dot{q}| \dot{q}}{k_3 |q| + \varepsilon} \right), & q^2 + \dot{q}^2 < \Omega^2; \\ - h \operatorname{sign} \left[k_4 q + k_5 \frac{|\dot{q}| \dot{q}}{k_6 |q| + \varepsilon} \right], & q^2 + \dot{q}^2 \geq \Omega^2. \end{cases} \quad (70)$$

где $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ – параметры регулятора; Ω – граница области притяжения [130] фазового пространства, где необходимо производить смену режимов функционирования динамической системы, определена как правило не точно.

Такую неопределенность можно описать входными лингвистическими переменными – положение на фазовой плоскости с терм-множеством $T_x = \{ \text{"близко"}, \text{"далеко"} \}$ и скорость на фазовой плоскости с терм-множеством $T_y = \{ \text{"медленно"}, \text{"быстро"} \}$. Нечеткий логический вывод Такаги-Сугено типа MISO записывается в простой форме [146]

$$\begin{aligned}
R^1 &: \text{если } (q, \dot{q}) \text{ есть } D'_1, \text{ то } (U = u_1(q, \dot{q})), \text{ иначе} \\
R^2 &: \text{если } (q, \dot{q}) \text{ есть } D'_2, \text{ то } (U = u_2(q, \dot{q})).
\end{aligned} \tag{71}$$

Принадлежность $u_i, i = \overline{1, 2}$, к области определения D'_1 формализуется функцией принадлежности s-класса. С учетом ограничений на область значений переменных имеем [147]

$$m_1 = \begin{cases} 0, & \sqrt{q^2 + \dot{q}^2} < \xi_1, \\ 2 \left(\frac{\sqrt{q^2 + \dot{q}^2} - \xi_1}{\xi_3 - \xi_1} \right)^2, & \xi_1 \leq \sqrt{q^2 + \dot{q}^2} \leq \xi_2, \\ 1 - 2 \left(\frac{\sqrt{q_s^2 + \dot{q}_s^2} - \xi_{s3}}{\xi_{s3} - \xi_{s1}} \right)^2, & \xi_2 \leq \sqrt{q^2 + \dot{q}^2} \leq \xi_3, \\ 1, & \sqrt{q^2 + \dot{q}^2} > \xi_3. \end{cases} \tag{72}$$

где $\xi = [\xi_1, \xi_2, \xi_3]$ – вектор параметров. Для второй функции принадлежности имеем [99]

$$m_2 = 1 - m_1. \tag{73}$$

Для (71) логический вывод определяется выражением [99]

$$U = \sum_{i=1}^2 \eta_i u_i \tag{74}$$

где $\eta_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}, \eta_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$. Здесь α_1, α_2 – уровни отсечения для предпосылок каждого из правил, вычисленные для четких значений обобщенной координаты q^* и скорости \dot{q}^* . В результате имеем [146]

$$U = u_1 m_1 + (1 - m_1) u_2 \tag{75}$$

Рассмотрим задачу стабилизации маятника, модель которого имеет вид

$$\ddot{q} = -\frac{g}{l} \sin q + \frac{1}{ml^2} u. \tag{76}$$

где g – ускорение свободного падения, принято $g = 9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$, l – длина невесомого стержня маятника, $l = 0.3 \text{ [m]}$, q – угол отклонения от нормали, m –

масса маятника, сосредоточенного на конце стержня, $m = 0.1$ [kg], с ограничением на управление

$$|u| \leq h, \quad h = 0.3 \quad (77)$$

и заданных начальных условиях

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ \dot{q}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q(0) \\ \dot{q}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (78)$$

Положение устойчивого равновесия $q = 0, \dot{q} = 0$.

Для настройки параметров многорежимного нелинейного алгоритма на основе условия максимума функции обобщенной мощности (70) была создана и зарегистрирована программа для ЭВМ [52], листинг программы представлен в Приложении А2.

Проведем моделирование при значениях параметров $k_1 = 10, k_2 = 0.1, k_3 = 1, k_4 = 3, \Omega = 0.5, \xi_1 = 0, \xi_2 = \Omega, \xi_3 = 2\Omega$, шаг дискретизации $\Delta t = 10^{-4}$ с, на начальных условиях (78) для системы (76) с управлением (70) и (75). На рисунках 26 и 27 представлены траектории управляемой системы с управлением (70) и (75) по координате, скорости и на фазовой плоскости. На рисунке 28 представлены графики управляющих сигналов (70) и (75).

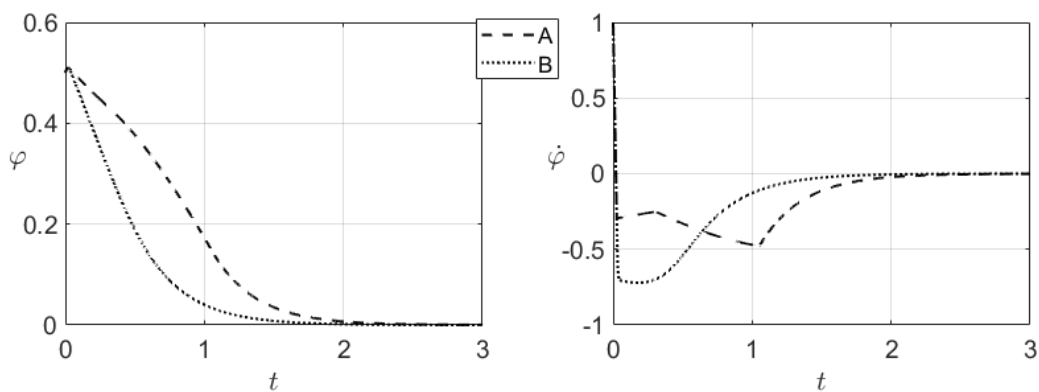


Рисунок 26 – Траектории управляемой системы для многорежимного алгоритма (А) и интеллектуального алгоритма (В) на основе условия максимума функции обобщенной мощности

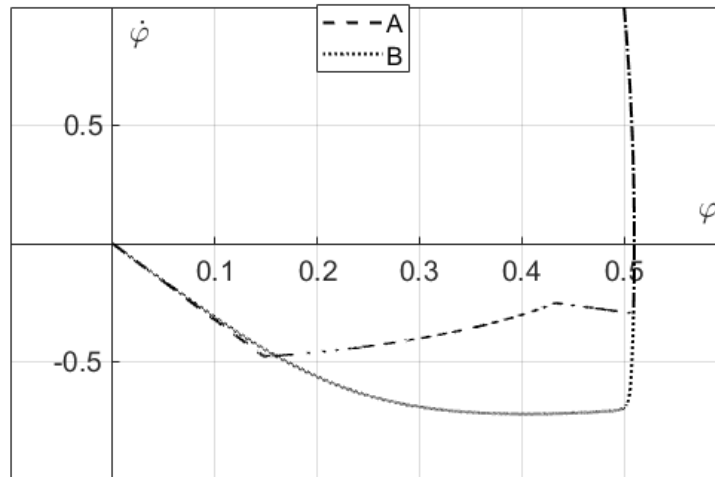


Рисунок 27 – Траектории управляемой системы на фазовой плоскости для многорежимного алгоритма (А) и интеллектуального алгоритма (В) на основе условия максимума функции обобщенной мощности

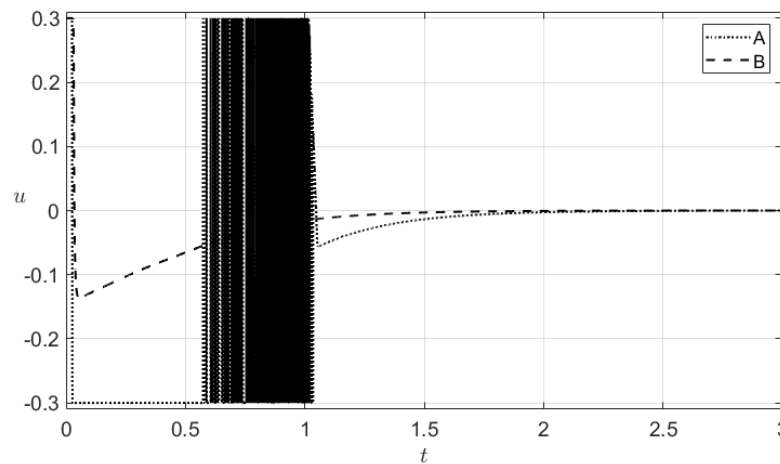


Рисунок 28 – Управляющее воздействие многорежимного алгоритма (А) и интеллектуального алгоритма (В)

Результаты моделирования показывают, что интеллектуальный алгоритм на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода доставляет выигрыш по энергетическим затратам на управление в сравнении с многорежимным алгоритмом, исключая режим учащающихся переключений.

3.4 Выводы по главе

1. Синтезирован интеллектуальный алгоритм управления с применением квазиоптимального закона на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода Такаги-Сугено типа SISO, который позволяет получить выигрыш по показателю быстродействия при управлении нелинейной динамической системой в сравнении с известным законом.
2. Синтезирован интеллектуальный алгоритм управления нелинейной динамической системой с несколькими степенями свободы на основе квазиоптимального по быстродействию закона и закона, обеспечивающего максимизацию области притяжения, с использованием нечеткого логического вывода Такаги-Сугено типа MISO. Алгоритм обеспечивает достижение окрестности терминальной точки подсистем за время, близкое к оптимальному, при этом в сравнении с известным квазиоптимальным по быстродействию законом управления предлагаемый алгоритм не входит в колебательный режим вблизи терминальной точки, а также не имеет точек разрыва на траектории движения нелинейной динамической системы.
3. Синтезирован интеллектуальный алгоритм управления с использованием интеллектуализации многорежимного алгоритма на основе условия максимума функции обобщенной мощности с применением нечеткого логического вывода Такаги-Сугено типа MISO. Полученный интеллектуальный алгоритм управления позволяет исключить появление режима учащающихся переключений, что обеспечивает выигрыш по энергетическим затратам на управление в сравнении с известным многорежимным алгоритмом.

4 Анализ эффективности синтезированных интеллектуальных алгоритмов

4.1 Анализ эффективности интеллектуального алгоритма управления угловым движением беспилотного летательного аппарата

Проведем анализ эффективности синтезированного интеллектуального алгоритма управления на макете БПЛА с предустановленной системой управления в стенде для отработки законов управления, которые были использованы для проведения исследований в рамках НИР «Разработка элементов беспилотных технологий на базе методов объединенного принципа максимума» за счет гранта ФГБОУ ВО РГУПС от 02 июля 2018 г. № 328.

В системе управления макетом БПЛА установлен классический закон управления типа ПИД-регулятор, который имеет вид

$$u_{pid} = k_p \Delta\theta + k_d \dot{\theta} + k_i \int_0^t \Delta\theta d\tau, \quad (79)$$

где $k_p = 5$, $k_d = 1$, $k_i = 2,5$ – коэффициенты закона управления, $\Delta\varphi = \varphi - \varphi^*$ – рассогласование текущего положения по углу крена θ и целевого положения $\theta^* = 20$ град, $\dot{\theta}(t) = \frac{\theta(t) - \theta(t - \Delta t)}{\Delta t}$ – скорость изменения угла крена, $\Delta t = 0,01$ с – период дискретизации.

Для проведения первичной обработки данных, полученных с макета БПЛА в процессе эксперимента, и для формирования массива данных для проведения анализа была создана и зарегистрирована программа для ЭВМ «Программа обработки экспериментальных данных изменения состояния нелинейного объекта управления типа «квадрокоптер» под действием системы управления» [53] (Приложение А3). По результатам эксперимента, в ходе которого макет БПЛА в стенде занимал позицию по углу крена от 0 до 20 градусов, получены данные об изменении положения по углу крена от времени, показаны на рисунке 29.

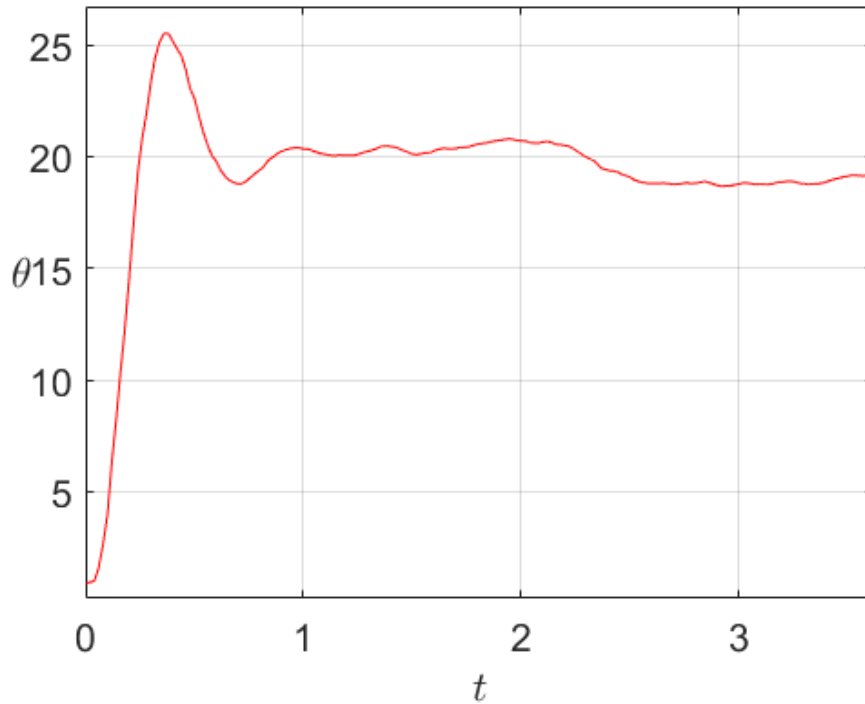


Рисунок 29 – Изменение угла крена макета БПЛА от времени

В соответствии с полученными данными была построена модель БПЛА вида

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial T}{\partial \theta} = u + Q(\theta, \dot{\theta}), \quad (80)$$

где $T = \frac{1}{2} a_2 \dot{\theta}^2$, $Q = a_1 \dot{\theta} + a_0 \theta$, u – алгоритм управления, для идентификации параметров модели принято $u = u_{pid}$; a_2 , a_1 , a_0 – параметры модели. В результате проведения идентификации параметров модели (80) были получены значения $a_2 = -0,068$, $a_1 = 4,399$, $a_0 = 0,385$.

Сравнение управляющих сигналов с макета БПЛА и при моделировании (80), (79) показано на рисунке 30.

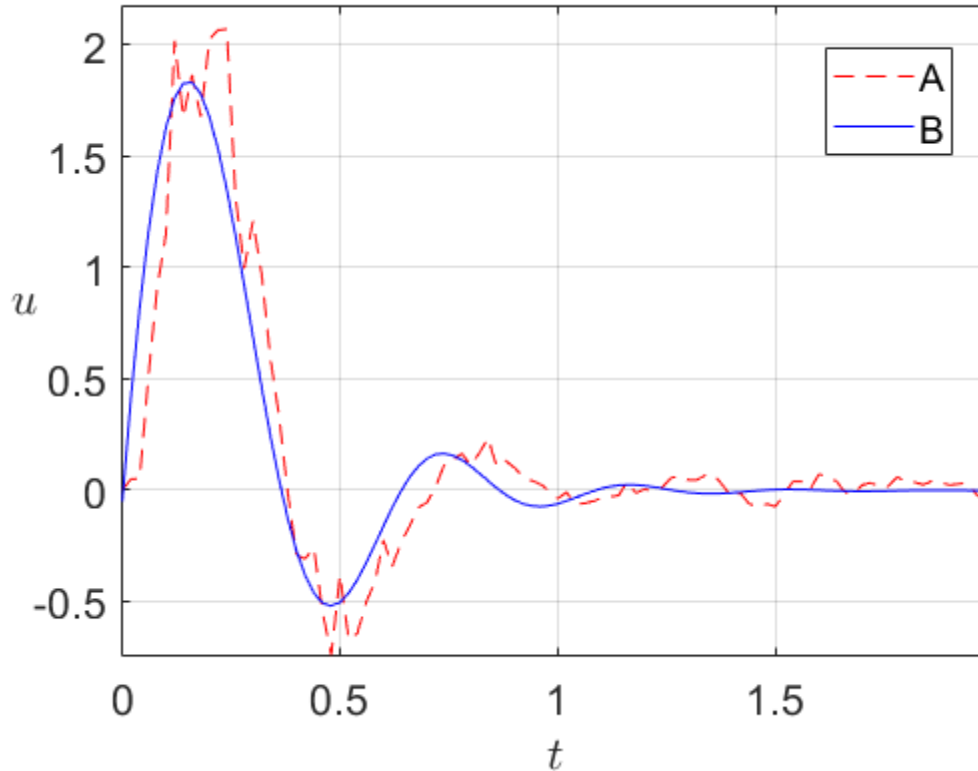


Рисунок 30 – Управляющие сигналы в условных единицах с макета БПЛА (А) и полученные в результате моделирования (В)

Построим интеллектуальный закон управления для системы (80). В соответствии с принципом двухзонного управления [64] в качестве закона, действующего «вблизи» терминальной точки, выберем закон (79), «вдали» используем закон на основе условия максимума функции обобщенной мощности, для переключения между законами в соответствии с принципами нечеткой логики используем функцию принадлежности L-типа. Итоговый закон управления имеет вид

$$u_{\text{int}} = m(\theta, \dot{\theta})u_{\text{pid}} + (1 - m(\theta, \dot{\theta}))u_{\text{cmp}}, \quad (81)$$

$$u_{\text{cmp}} = \text{sat} \left(k_0 \Delta\theta + k_1 \frac{|\dot{\theta}| \dot{\theta}}{|\theta| + k_2} \right),$$

$$m(\theta, \dot{\theta}) = \begin{cases} 1, & 0 \leq r \leq a_1, \\ \frac{a_2 - r}{a_2 - a_1}, & a_1 < r \leq a_2, \\ 0, & r > a_2, \end{cases}$$

где $k_0 = 60$, $k_1 = 12$, $k_2 = 2$, $a_1 = 0,1$, $a_2 = 3$, $r = \sqrt{\Delta\theta^2 + \dot{\theta}^2}$ – расстояние до терминальной точки.

Проведем моделирование систем (80), (79) и (80), (81) с учетом наличия априорной неточности измерения угла крена, которую примем равной $\pm 0,017$ рад. Результаты моделирования одной реализации представлены на рисунках 31–33. Система с управлением (79) достигает терминальной точки за 0,63 с, система с разработанным законом управления (81) – за 0,58 с, что на 7,9 % быстрее.

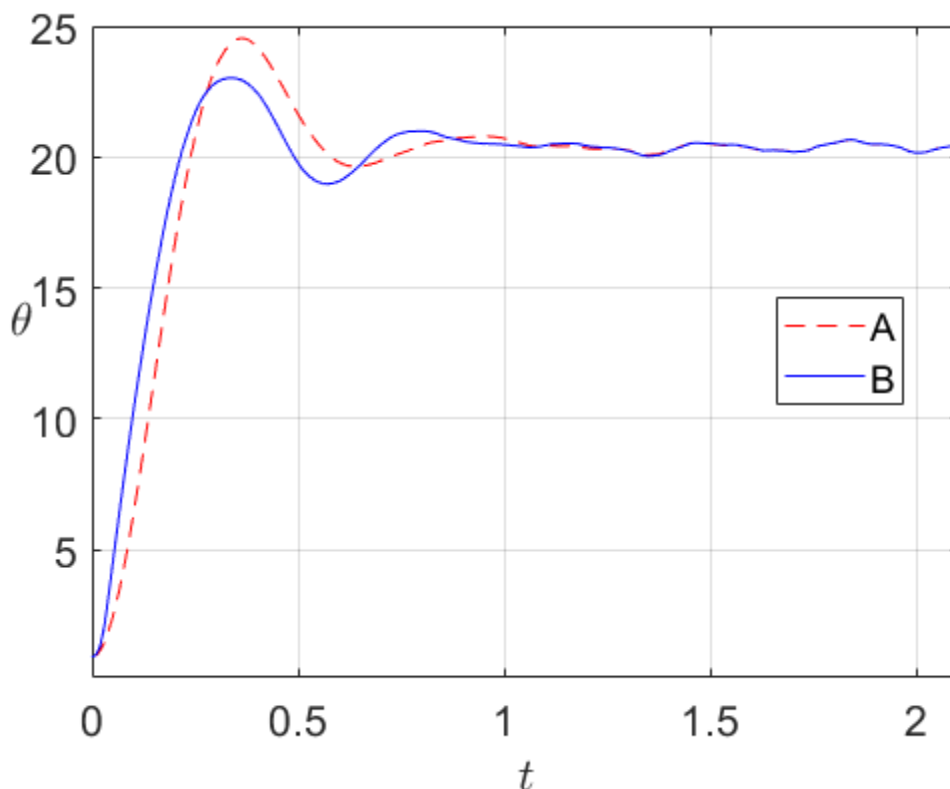


Рисунок 31 – Угол крена: А – (80), (79), В – (80) (81)

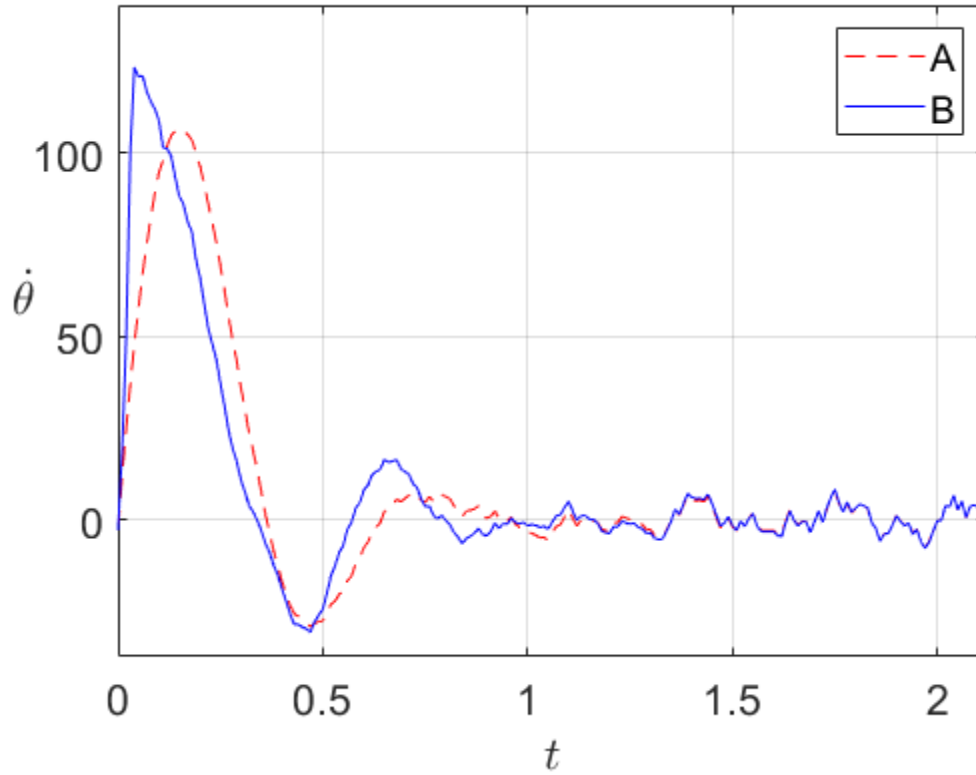


Рисунок 32 – Скорость изменения угла крена: А – (80), (79), В – (80) (81)

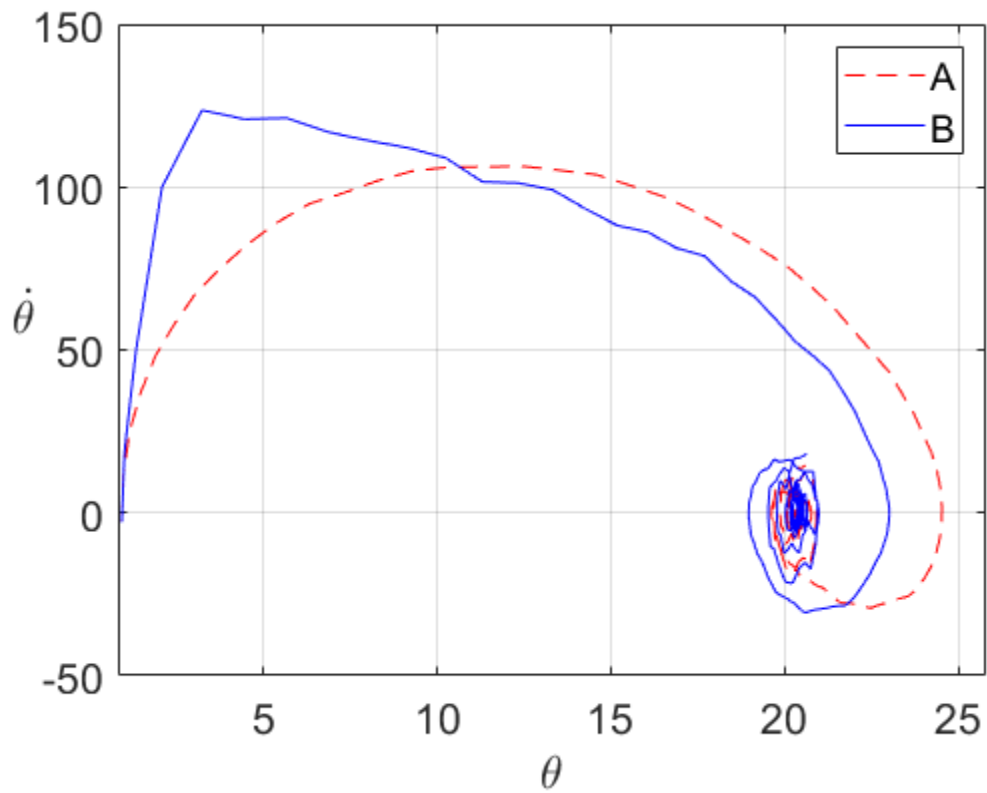


Рисунок 33 – Фазовая плоскость: А – (80), (79), В – (80) (81)

Проведем моделирование 1000 реализаций рассмотренного случая. В среднем выигрыш по быстродействию разработанной системы (80), (81) в сравнении с используемой в макете БПЛА (80), (79) составил 5,8 %.

Также проведем сравнение с известным алгоритмом (53), позволяющим максимизировать область притяжения системы, который, напомним, имеет вид

$$u_2 = \begin{cases} h, & \gamma(\theta + \dot{\theta}) \geq h, \\ \gamma(\theta + \dot{\theta}), & |\gamma(\theta + \dot{\theta})| < h, \\ -h, & \gamma(\theta + \dot{\theta}) \leq -h, \end{cases} \quad (82)$$

где γ – коэффициент усиления, примем $\gamma = -5$.

Моделирование при тех же параметрах показало, что в среднем на 1000 реализаций выигрыш по быстродействию разработанной системы (80), (81) в сравнении с (80), (82) составил 15 %.

Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что интеллектуальный алгоритм управления с квазиоптимальным законом на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечетким логическим выводом позволяет повысить эффективность управления по критерию быстродействия в сравнении с классическим ПИД-регулятором и с известным квазиоптимальным законом, позволяющим максимизировать область притяжения системы [148].

4.2 Анализ эффективности синтезированного интеллектуального алгоритма в системе автоматического управления скорости пассажирского электровоза

Сегодня отрасль железнодорожного транспорта продолжает развиваться в определенных ограничивающих условиях. Так, крупнейший российский производитель пассажирских вагонов "Трансмашхолдинг" (ТМХ) прекратил выпуск пассажирских электровозов ЭП20, созданных вместе с французской фирмой Alstom, которая поставляла систему управления тяговым приводом, в

связи с введением санкций [149], кроме того, есть определенные зоны риска по текущим закупкам инновационных локомотивов. В связи с этим РЖД рассчитывают на появление нового отечественного пассажирского электровоза ЭП40 в 2025 году [150], а НЭВЗ, входящий в состав Трансмашхолдинга, представил контактно-аккумуляторный маневровый электровоз ЭМКА2 с асинхронными тяговыми двигателями постоянного тока, который может питаться от контактной сети или бортового накопителя энергии и может заряжаться от общепромышленных источников электроэнергии, что позволит снизить текущие эксплуатационные расходы на 40-60% [151].

Современная теория автоматического управления развивается в условиях повышения требований к качеству управления транспортными системами и необходимости учета все большего количества факторов, влияющих на функционирование объектов управления. К таким факторам относятся учет нелинейности модели объекта управления и априорно неизвестных возмущений, действующих на объект в процессе управления, среди которых можно выделить нестационарность параметров объекта управления и различные внешние влияния.

Например, такой рассматриваемый объект интеллектуальной транспортной системы, как поезд, испытывает различные возмущения, связанные с сопротивлением от трения в буксовых подшипниках, сопротивлением от трения качения колес по рельсам, сопротивлением от трения скольжения колес по рельсам, диссипацией энергии при взаимодействии колес по рельсам, сопротивлением воздушной среды, диссипацией энергии в окружающую среду, уклоном профиля пути, кривизной пути, ветром, температурой, туннелями, подвагонными генераторами пассажирских вагонов [152].

Интеграция отдельных объектов управления как транспортных систем в комплексные интеллектуальные транспортные системы [2; 3] с введением повсеместного автоматического управления движением [5] требует повышения эффективности используемых алгоритмов управления с целью сохранения быстродействия, устойчивости и других показателей в условиях функционирования при различных режимах [7].

Данное обстоятельство приводит к необходимости использования интеллектуальных законов управления, обеспечивающих адаптацию к различным режимам движения объекта управления и устойчивость к априорно неизвестным возмущениям [6, 7]. Так как помимо обеспечения адаптации зачастую требуется также обеспечить высокое быстродействие системы, целесообразно строить интеллектуальное управление на базе квазиоптимальных законов.

Задачей, возлагаемой на САУ скоростью, является обеспечение следующих режимов работы [155]:

- разгон или торможение до величины заданной скорости;
- поддержание её на постоянном уровне при непрерывно изменяющемся сопротивлении движению поезда;
- плавное уменьшение до нуля силы тяги (или торможения) при переходе на выбег.

Рассмотрим возможность применения разработанного закона управления, представленного в работе [140], в системе автоматического управления (САУ) скоростью электровоза на примере пассажирского электровоза ЭП20. Уравнение движения поезда в установившемся режиме можно представить в виде, соответствующем (1) [152]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial v} - \frac{\partial T}{\partial s} = F_{\text{тяги}} - R, \quad (83)$$

где $T = \frac{1}{2} M v^2$, $M = 1000 \frac{(P+Q)}{g}$ – масса поезда, P – вес локомотива, Q – вес состава, g – ускорение свободного падения, v – скорость поезда, s – пройденный путь поезда, $F_{\text{тяги}}$ – сила тяги/электрического торможения, развиваемая локомотивом, в рассматриваемом случае с одиночной тягой равна силе тяги/электрического торможения единственного локомотива в поезде, R – равнодействующая сил основного и дополнительного сопротивления движению.

Разгон поезда до заданной скорости осуществляется с постоянным ускорением, ограниченным сверху предельным значением $a_{\max} = 0,7 \text{ м/с}^2$, заданным в технических требованиях, предъявляемых заказчиком.

Определим параметры модели поезда. Вес локомотива ЭП20 P равен 1265 кН, вес пассажирского вагона примем равным 637 кН, вес состава, вес и масса поезда в зависимости от количества пассажирских вагонов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Вес и масса поезда с локомотивом ЭП20 в зависимости от количества пассажирских вагонов

Количество пассажирских вагонов	Вес состава Q , кН	Вес поезда, кН	Масса поезда, т
10	6370	7635	779
20	12740	14005	1429
30	19110	20375	2079

Определим расчетное сопротивление движению поезда. Удельные силы сопротивления w включают в себя основное сопротивление w_o и дополнительное сопротивление $w_{дон}$. За основное сопротивление принимают те силы, которые препятствуют движению подвижного состава по прямому горизонтальному пути на открытой местности при нормальных метеоусловиях с любой допустимой по безопасности движения скоростью. Дополнительные сопротивления – временно действующие силы, возникающие в конкретных условиях эксплуатации подвижного состава, например при движении по уклону профиля пути, в кривой, в тоннелях и прочее.

Основное сопротивление w_o может быть представлено в виде суммы элементов:

- сопротивление от трения в буксовых подшипниках,
- сопротивление от трения качения колес по рельсам,

- сопротивление от трения скольжения колес по рельсам,
- диссипация энергии при взаимодействии колес по рельсам,
- сопротивление воздушной среды,
- диссипация энергии в окружающую среду.

Значения элементов основного сопротивления зачастую известны ориентировочно. Обозначим зависимости значений этих сопротивлений от скорости подвижного состава.

Сопротивление от трения в буксовых подшипниках прямо пропорционально скорости движения поезда, при этом принимает минимальные значения в диапазоне скоростей 30–50 км/ч, при дальнейшем увеличении скорости движения трение возрастает, так как повышается температура смазки и уменьшается ее вязкость, чисто жидкостное трение часто нарушается, что приводит к увеличению сил трения.

Сопротивление от трения качения колес по рельсам обусловлена возникновением упругих деформаций опорной поверхности бандажей колес и рельсов под действием силы нажатия колесной пары на рельсы. Данное сопротивление зависит от твердости металла бандажей и рельсов и диаметра колес и не зависит от скорости.

Сопротивление от трения скольжения колес по рельсам зависит от нескольких факторов, одним из основных является влияние колесных пар при движении подвижного состава в колее, что обусловлено различными случайными факторами, включая извилистость пути, толчки по длине поезда, стыки рельсов, неравномерный износ рельсов и прочее. Величина этого сопротивления зависит от квадрата скорости.

Диссипация энергии при взаимодействии колес по рельсам так же зависит от квадрата скорости подвижного состава.

Сопротивление воздушной среды формируется из нескольких слагаемых, одно из которых зависит от скорости поезда, а другое от квадрата скорости.

Диссипация энергии в окружающую среду формируется из нескольких слагаемых, одно из которых зависит от скорости поезда, а другое от квадрата скорости.

К дополнительному сопротивлению $w_{дон}$ движению относят силы, временно действующие на подвижной состав, а именно:

- от уклона профиля пути,
- от кривизны пути,
- от ветра,
- от низкой температуры,
- от тоннелей,
- от подвагонных генераторов пассажирских вагонов.

Удельное сопротивление локомотива равно, Н/кН [156]:

$$w_{лок} = 2,4 + 0,011v + 0,00035v^2, \quad (84)$$

где v – скорость поезда, км/ч.

Удельное сопротивление пассажирского состава, Н/кН [156]:

$$w_{сост} = 0,7 + (8 + 0,18v + 0,003v^2) / 160. \quad (85)$$

С учетом (84), (85) полное основное сопротивление поезда имеет вид, Н [156]:

$$W_{осн}(v) = w_{лок}(v)P + w_{сост}(v)Q. \quad (86)$$

Для проведения моделирования будем учитывать дополнительное сопротивление движению, равное сопротивлению, возникающему от уклона профиля пути, тогда равнодействующая сил сопротивления движению R будет равна $W_{осн}(v)$, Н [156]:

$$R = W_{осн}(v) + W_n(q), \quad (87)$$

где $W_n(q)$ – сопротивление от уклона профиля пути.

Силы, возникающие от уклона профиля пути, могут быть аппроксимированы тригонометрическими функциями, в частности, синусом угла наклона. Для проведения моделирования движения поезда с локомотивом ЭП20

возьмем участок Москва-Адлер [157] с соответствующим профилем пути, представленным на рисунке 34.

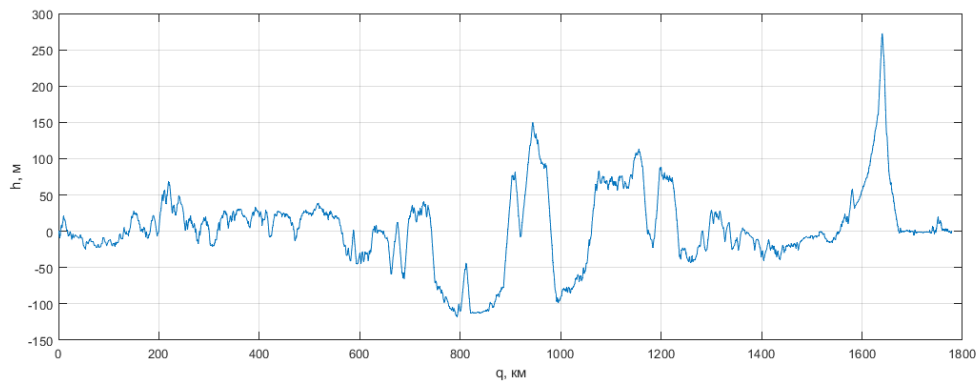


Рисунок 34 – Профиль пути Москва-Адлер, q – расстояние относительно начальной точки, км; h – высота относительно начальной точки, м

При составлении модели поезда можно использовать различные подходы, например, теорию конечных автоматов [158], рассматривая электропривод как неинерционную систему либо как апериодическое звено первого или второго порядка [159]. Исходя из экспериментальных данных, полученных на обкатном кольце полигона Щербинка, модель тягового электропривода локомотива ЭП20 можно представить в виде апериодического звена второго порядка [61], характеризующего запаздывание:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 F_{\text{тяги}}}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dF_{\text{тяги}}}{dt} + F_{\text{тяги}} = F_{\text{ref}}, \quad (88)$$

где $T_1 = 1,44$ с, $T_2 = 2,53$ с, $x = q - q^*$, q соответствует силе тяги/электрическому торможению, развиваемому локомотивом; q^* – целевое значение силы тяги/электрического торможения. Листинг программы моделирования интеллектуального алгоритма управления системой (88) представлен в Приложении А6, результаты моделирования опубликованы в [140].

Структурная схема электропривода представлена на рисунке 35 и включает в себя ограничитель тяги (так же на рисунке 35), для ЭП20 тяга ограничена величиной 350 кН, а также мощностью

$$N = N_o \cdot n_o, \quad (89)$$

где N_o – мощность одного двигателя, кВт, n_o – количество двигателей; для локомотива ЭП20 $N_o = 1100$ кВт, $n_o = 6$.

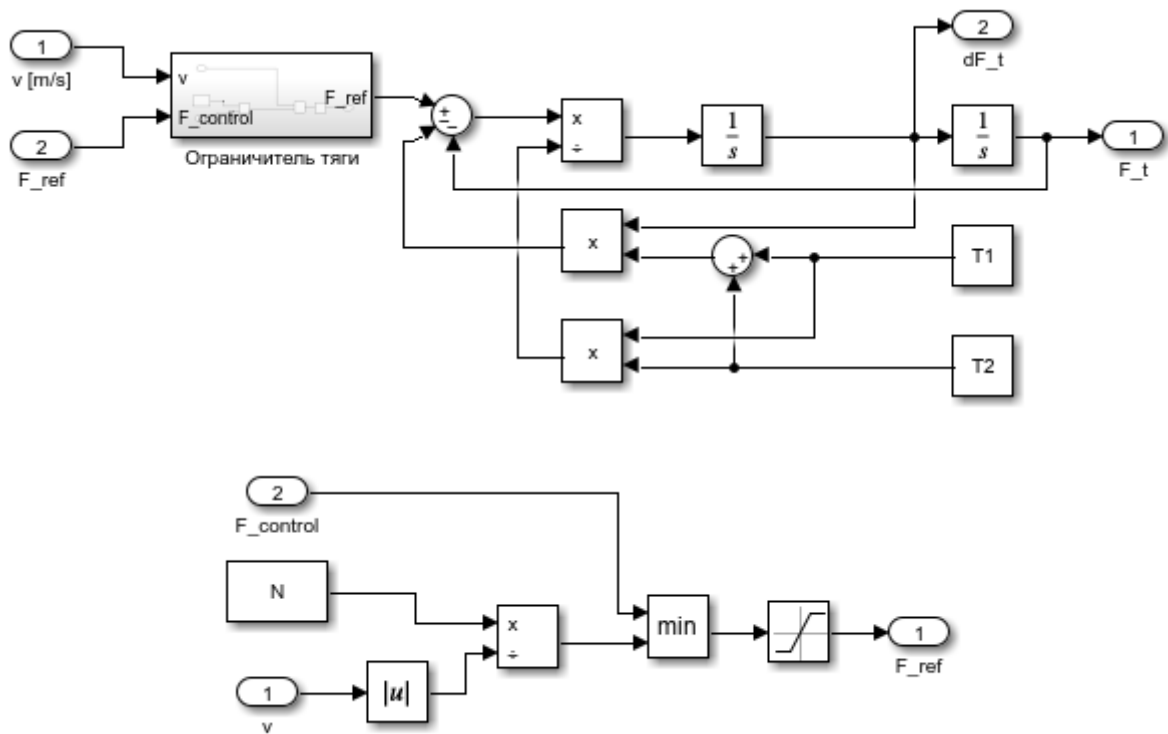


Рисунок 35 – Структурная схема тягового электропривода (вверху) и ограничитель тяги тягового электропривода, $N = 6600$ кВт (внизу)

Структурная схема разработанной САУ скоростью электровоза ЭП20 представлена на рисунке 36. САУ скоростью электровоза содержит регулятор скорости, представленный на рисунке 38 и построенный с использованием интеллектуального закона управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода. Структурная схема нечеткой подсистемы, обеспечивающей адаптивное изменение параметра закона управления, представлена на рисунке 38.

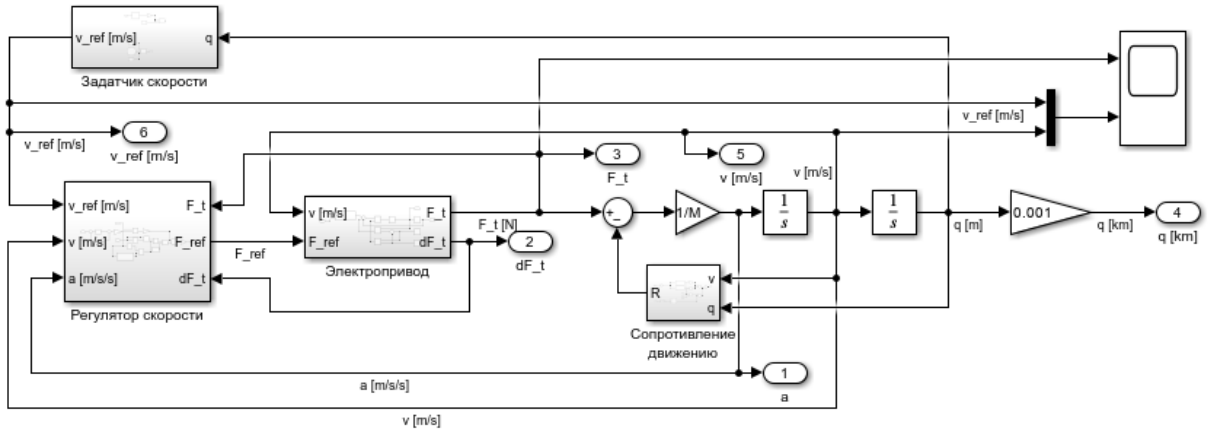


Рисунок 36 – Структурная схема САУ скоростью электровоза ЭП20

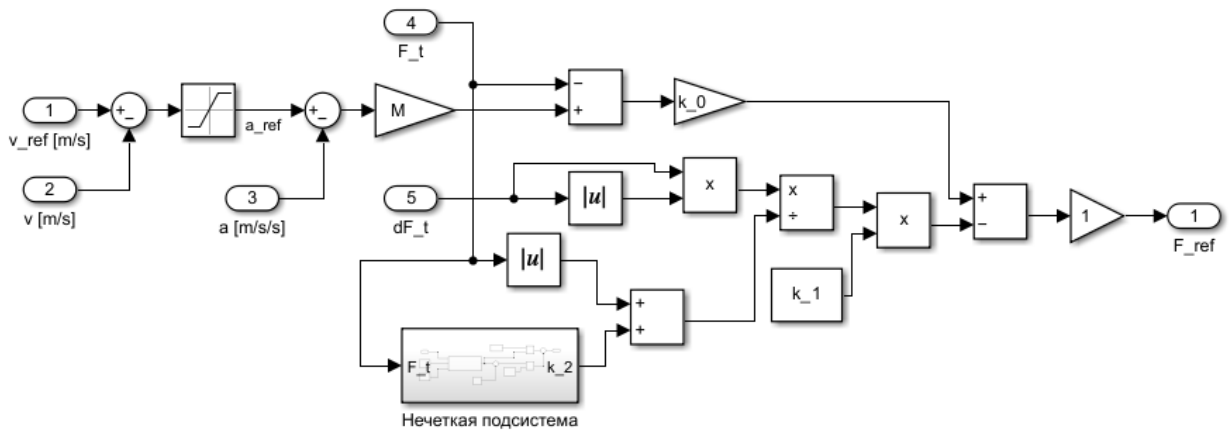


Рисунок 37 – Структурная схема разработанного блока регулятора скорости электровоза ЭП20

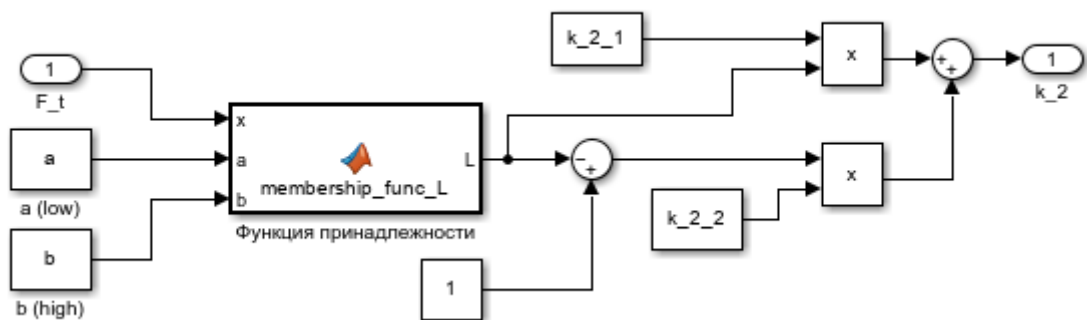


Рисунок 38 – Структурная схема нечеткой подсистемы разработанного регулятора скорости электровоза ЭП20

Разработанный блок регулятора скорости построен на базе интеллектуального алгоритма с полученной структурой (48)

$$u_{fuzzy} = sat \left[k_1 \left(q + k_2 \frac{\dot{q}|\dot{q}|}{|q| + \tilde{k}_3} \right) \right],$$

$$\tilde{k}_3 = \beta_1 m_1 + m_2 \beta_2,$$

$$m_1(q) = \begin{cases} 1, & 0 \leq q < a_1, \\ \frac{a_2 - q}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq q \leq a_2, \\ 0, & a_2 < q, \end{cases} \quad (90)$$

$$m_2 = 1 - m_1.$$

Заметим, что в рассматриваемом случае регулятор скорости не содержит данных о профиле пути участка движения, следовательно внешние возмущения в виде сопротивления движению поезда являются априорно неизвестными.

Рассмотрим движение поезда с составом из 20 пассажирских вагонов на равнинном участке Москва-Рязань, профиль пути которого представлен на рисунке . Проведем моделирование разгона поезда с $v_0 = 0$ м/с до $v_1 = 55,5$ м/с с последующим торможением до $v_2 = 0$ м/с при параметрах $k_1 = 1,7$, $k_2 = 2,03$, $\beta_1 = 0,1$, $\beta_2 = 2$, $a_1 = 10^4$, $a_2 = 9 \cdot 10^4$.

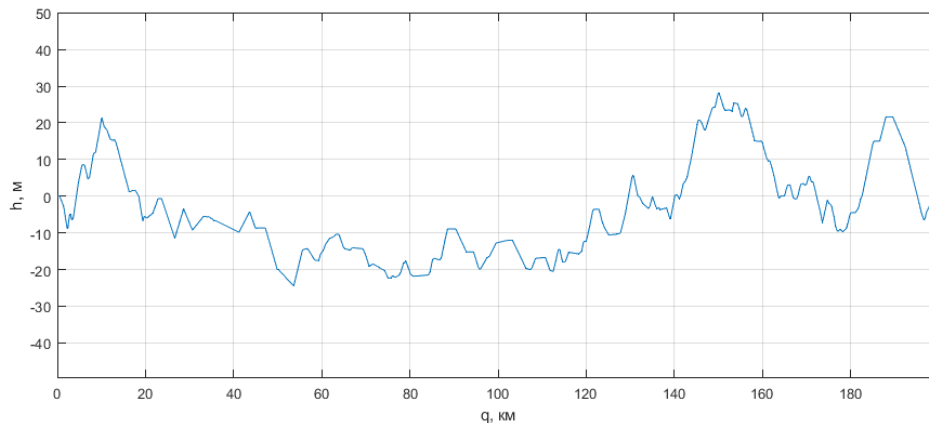


Рисунок 39 – Профиль пути Москва-Рязань, q – расстояние относительно начальной точки, км; h – высота относительно начальной точки, м

Результаты моделирования представлены на рисунках 40 и 41. Разработанная САУ скоростью электровоза ЭП20 на основе полученного

интеллектуального алгоритма управления позволяет поддерживать заданную скорость, обеспечивая движение в режимах тяги, выбега и рекуперативного торможения [160].

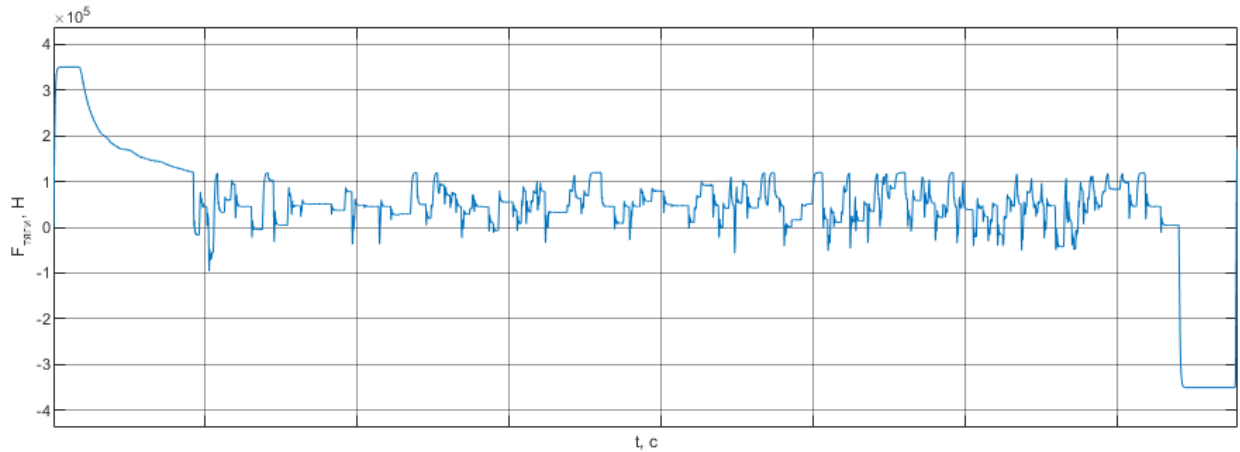


Рисунок 40 – Результат движения поезда с разгоном и торможением до заданной скорости на участке Москва-Рязань под управлением разработанной САУ скоростью электровоза ЭП20: тяга локомотива

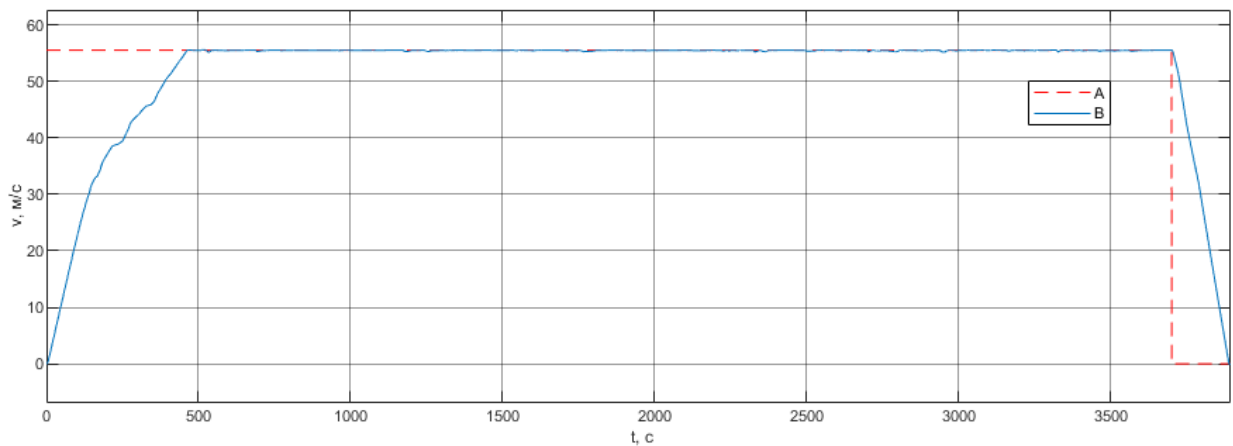


Рисунок 41 – Результат движения поезда с разгоном и торможением до заданной скорости на участке Москва-Рязань под управлением разработанной САУ скоростью электровоза ЭП20: заданная (пунктир) и действительная (сплошная линия) скорости поезда

Аналогичные результаты получены в результате моделирования на всем участке Москва-Адлер. Разработанная САУ скоростью электровоза позволяет

поддерживать заданную скорость, не превышая ее более чем на 1 км/ч, что соответствует требованию к САУ.

Сравним полученное решение с известным, представленным в работе [61]. На рисунке 42 показан момент достижения поездом заданной скорости (С): САУ с разработанным алгоритмом (В) достигает области ± 1 км/ч заданной скорости быстрее на 2,5 с, чем известная САУ (А). Также разработанный интеллектуальный алгоритм обеспечивает меньшее перерегулирование по скорости – 0,2 км/ч против 0,4 км/ч.

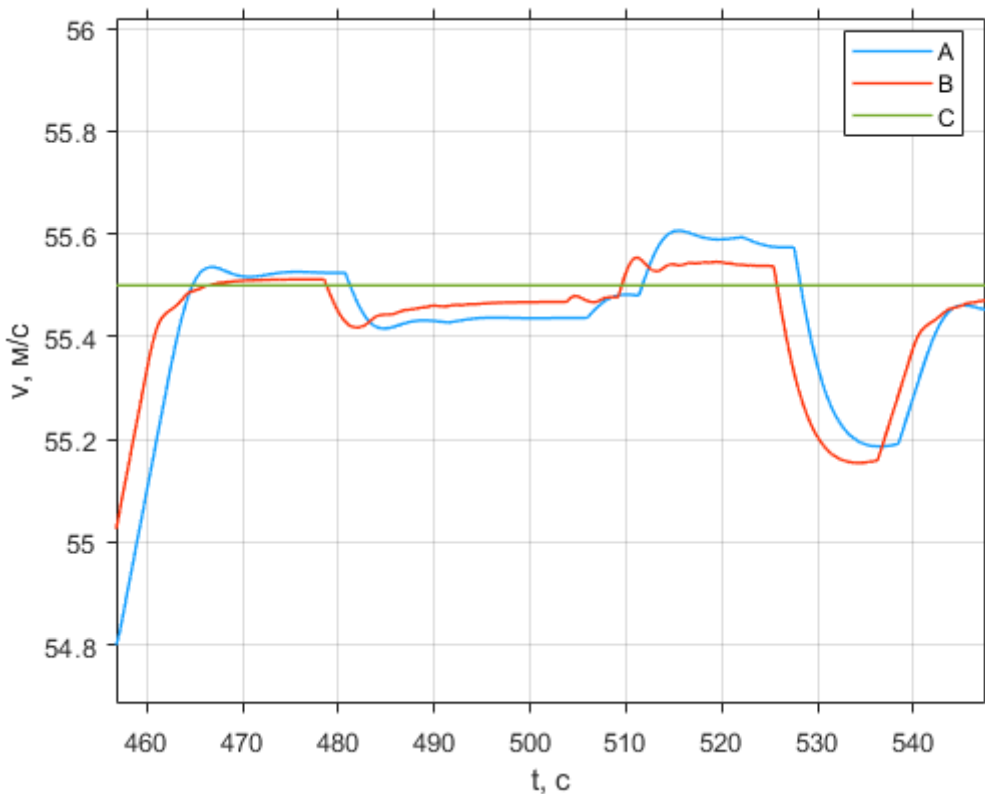


Рисунок 42 – Момент достижения поездом заданной скорости: А – известная САУ, В – САУ с разработанным интеллектуальным алгоритмом, С – заданная скорость

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что синтезированный интеллектуальный алгоритм управления можно использовать для построения САУ скоростью электровоза нового поколения с асинхронным

тяговым двигателем для обеспечения движения с заданной скоростью в различных режимах работы локомотива в условиях априорно неизвестных воздействий, что может обеспечить повышение быстродействия достижения заданной скорости в сравнении с известным решением.

4.3 Выводы по главе

1. Проведена идентификация параметров модели макета беспилотного летательного аппарата, полученной в результате натурального эксперимента по изменению угла крена, для модели синтезирован интеллектуальный алгоритм управления. Проведено моделирование множества реализаций поведения системы в условиях априорной неточности измерения угла крена. Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что синтезированный интеллектуальный алгоритм управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода Такаги-Сугено позволяет повысить эффективность управления по показателю быстродействия в сравнении с законом управления, используемом в макете объекта.

2. Построена САУ скоростью электровоза нового поколения с асинхронным тяговым двигателем с использованием синтезированного интеллектуального алгоритма управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода. Проведено моделирование движения пассажирского поезда с локомотивом ЭП20 с заданной скоростью на участках Москва-Рязань и Москва-Адлер с соответствующим профилем пути. Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что разработанный интеллектуальный алгоритм управления можно использовать для построения САУ скоростью электровоза нового поколения с асинхронным тяговым двигателем для обеспечения движения с заданной скоростью в различных режимах работы локомотива в условиях априорно неизвестных воздействий, что может обеспечить повышение быстродействия достижения заданной скорости в сравнении с известным решением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации получены следующие результаты:

1. Проведен анализ применения алгоритмов управления и методов их синтеза в интеллектуальных транспортных системах, который показал, что для решения проблемы эффективного управления транспортными системами в условиях параметрической неопределенности моделей объектов и внешних возмущений необходимо совершенствовать существующие методы и технические решения построения систем управления. Эффективным решением поставленной задачи синтеза интеллектуальных алгоритмов может являться применение метода синтеза квазиоптимальных законов на основе условия максимума функции обобщенной мощности в совокупности с нечетким логическим выводом. В соответствии с результатами анализа применения алгоритмов и методов их синтеза сформулирована математическая постановка задачи синтеза интеллектуальных алгоритмов управления транспортными системами с использованием формализма Лагранжа.

2. Рассмотрен метод синтеза квазиоптимальных законов управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности, позволяющий синтезировать закон, содержащий оптимальные решения задачи управления, что может быть использовано при построении интеллектуального алгоритма управления транспортными системами. Получена структура квазиоптимального закона на основе анализа обобщенного кинетического потенциала с учетом выполнения условий трансверсальности в соответствии с принципом освобождаемости и условием обращения в ноль скобок Пуассона. Полученная структура квазиоптимального закона позволяет повысить эффективность управления нелинейными динамическими системами по показателю быстродействия до 17,4 % для систем с одной степенью свободы и до 7,4 % для систем с несколькими степенями свободы в сравнении с известными законами, а в некоторых случаях обеспечить устойчивость в более широком диапазоне

начальных условий, и может быть использована для синтеза интеллектуального алгоритма управления.

3. Синтезирован интеллектуальный алгоритм управления с применением квазиоптимального закона на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода Такаги-Сугено типа SISO, который позволяет получить выигрыш по показателю быстродействия до 17,5 % для множества начальных условий при управлении нелинейной динамической системой в сравнении с известным законом.

4. Синтезирован интеллектуальный алгоритм управления нелинейной динамической системой с несколькими степенями свободы на основе квазиоптимального по быстродействию закона и закона, обеспечивающего максимизацию области притяжения, с использованием нечеткого логического вывода Такаги-Сугено типа MISO. Алгоритм обеспечивает достижение окрестности терминальной точки подсистем за время, близкое результату известного квазиоптимального по быстродействию закона управления, но при этом не входит в колебательный режим вблизи терминальной точки, а также не имеет точек разрыва на траектории движения нелинейной динамической системы.

5. Синтезирован интеллектуальный алгоритм управления для модели макета беспилотного летательного аппарата, идентифицированной в результате натурного эксперимента по изменению угла крена. Проведено моделирование множества реализаций поведения системы в условиях априорной неточности измерения угла крена. Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что синтезированный интеллектуальный алгоритм управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода Такаги-Сугено позволяет повысить эффективность управления по показателю быстродействия в среднем на 5,8 %.

6. Построена САУ скоростью электровоза нового поколения с асинхронным тяговым двигателем с использованием синтезированного интеллектуального алгоритма управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода. Проведено

моделирование движения пассажирского поезда с локомотивом ЭП20 с заданной скоростью на участках Москва-Рязань и Москва-Адлер с соответствующим профилем пути. Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что разработанный интеллектуальный алгоритм управления можно использовать для построения САУ скоростью электровоза для обеспечения движения с заданной скоростью в различных режимах работы локомотива в условиях априорно неизвестных воздействий, что может обеспечить повышение быстродействия на 2,5 с достижения области ± 1 км/ч заданной скорости в сравнении с известным решением.

Таким образом, в диссертации решена научная задача синтеза интеллектуальных алгоритмов управления транспортными системами с использованием квазиоптимальных законов и нечеткого логического вывода. Проведенные исследования дают возможность утверждать, что используемый подход к решению задач синтеза интеллектуальных алгоритмов управления является конструктивным, синтезированные алгоритмы обладают преимуществами в сравнении с известными решениями. Поставленная цель исследований достигнута, а полученные научные результаты достоверны.

Разработанные интеллектуальные алгоритмы на основе квазиоптимальных законов и нечеткого логического вывода могут быть использованы в системах автоматического управления транспортными системами.

В перспективе полученные решения возможно интегрировать в комплексные системы с применением других интеллектуальных методов для формирования полноценной интеллектуальной транспортной системы.

Список сокращений и условных обозначений

MISO (multiple input, single output) – несколько входов, один выход.

MPC (model predictive control) – управление на основе прогнозирующей модели.

SISO (single input, single output) – один вход, один выход.

АТД – асинхронный тяговый двигатель.

БПЛА – беспилотный летательный аппарат.

ИТС – Интеллектуальная транспортная система.

ПИД-регулятор – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор.

РФФИ – Российский фонд фундаментальных исследований.

САУ – система автоматического управления.

ЭВМ – Электронная вычислительная машина.

ЭП20 («Олимп») – пассажирский электровоз с асинхронным тяговым двигателем.

Список литературы

1. ГОСТ Р 56294-2014 Интеллектуальные транспортные системы. Требования к функциональной и физической архитектурам интеллектуальных транспортных систем. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115739> (дата обращения: 25.06.2023). – Текст : электронный.
2. Солодкий А. И. Развитие интеллектуальных транспортных систем в России: проблемы и пути их решения. Новый этап / А. И. Солодкий // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 6. – С. 10-19.
3. Маркелов В. М. Интеллектуальные транспортные системы как инструмент управления / В. М. Маркелов, И. В. Соловьев, В. Я. Цветков // Economic Consultant. – 2014. – № 3 (7). – С. 42-49.
4. Алтынцев М. А. Применение беспилотных летательных аппаратов для исполнительной съемки железных дорог / М. А. Алтынцев, И. В. Щербаков, С. А. Третьяков // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 1. – № 1. – С. 111-118.
5. Жанказиев С. В. Интеллектуальные транспортные системы: учеб. пособие / С.В. Жанказиев. – М.: МАДИ, 2016. – 120 с. / С. В. Жанказиев. – 2016.
6. Бабичев В. И. Теория автоматического регулирования - история, современное состояние и перспективы развития / В. И. Бабичев, А. В. Игнатов, Е. В. Александров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 446-459.
7. Задачи управления движением многорежимных беспилотных летательных аппаратов / А. С. Сыров, А. М. Пучков, В. Ю. Рутковский, В. М. Глумов // Проблемы Управления. – 2014. – № 4. – С. 45-52.
8. Особенности синтеза системы угловой стабилизации высокоточных беспилотных летательных аппаратов / А. С. Сыров, В. Ю. Рутковский, В. М. Глумов [и др.] // Проблемы Управления. – 2017. – № 2. – С. 56-67.
9. Алгоритмы модернизированного координированного управления беспилотным летательным аппаратом / А. С. Сыров, А. М. Пучков, А. Е. Селезнев, В. М. Глумов // XII всероссийское совещание по проблемам управления

ВСПУ-2014, Москва, 16–19 июля 2014 года. – М. : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 3407-3416.

10. Глазков Т. В. Отслеживание программного изменения углового положения квадрокоптера / Т. В. Глазков, А. Е. Голубев // Математика и математическое моделирование. – 2017. – № 5. – С. 15-28.

11. Кравченко П. П. Синтез алгоритмов цифрового управления многорежимным беспилотным летательным аппаратом самолетного типа на основе оптимизированных дельта-преобразований второго порядка / П. П. Кравченко, Н. Ш. Хусаинов, В. В. Щербинин. – Текст : электронный // Известия Юфу. Технические Науки. – 2017. – № 2 (187). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28948294> (дата обращения: 26.07.2021).

12. Огольцов И. И. Повышение динамической точности автоматического полета квадрокоптера в одной плоскости / И. И. Огольцов, Н. Б. Рожнин, В. В. Шеваль // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 9-2. – С. 276-286.

13. Адаптивное управление нелинейным объектом типа конвертоплан в условиях неопределенностей / С. Ф. Яцун, О. В. Емельянова, Мартинез Леон Андрес Сантьяго, Москера Морочо Луис Мигель. – Текст : электронный // Известия Юго-Западного Государственного Университета. – 2020. – Т. 24. – № 3. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44400820> (дата обращения: 26.07.2021).

14. Филимонов А. Б. Некоторые аспекты автоматизации систем управления беспилотными мобильными средствами / А. Б. Филимонов, Н. Б. Филимонов. – Текст : электронный // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2018. – Т. 2. – С. 35-38. – URL: <https://istina.msu.ru/publications/article/161520669/> (дата обращения: 26.07.2021).

15. Филимонов Н. Б. Синтез алгоритма управления вертикальным посадочным маневром БПЛА методом гибких кинематических траекторий / Н. Б. Филимонов, А. А. Сергеев. – Текст : электронный // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2019. – № 17-2. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41652530> (дата обращения: 26.07.2021).

16. Биард Р. У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. Малые беспилотные летательные аппараты / Р. У. Биард, Т. У. Маклэйн. – М. : Рекламно-издательский центр «Техносфера», 2015. – 312 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39201064> (дата обращения: 21.10.2021). – Текст : электронный.
17. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges / H. Shakhatreh, A. H. Sawalmeh, A. Al-Fuqaha [и др.] // IEEE Access. – 2019. – Т. 7. – Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). – С. 48572-48634.
18. Пшихопов В. Х. Дирижабли: перспективы использования в робототехнике / В. Х. Пшихопов // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – 2004. – Дирижабли. – № 5. – С. 15-20.
19. Пшихопов В. Х. Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: математическая модель / В. Х. Пшихопов, М. Ю. Медведев, А. Р. Гайдук // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2013. – № 6. – С. 14-21.
20. Пшихопов В. Х. Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: алгоритмы управления / В. Х. Пшихопов, М. Ю. Медведев, А. Р. Гайдук // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2013. – № 7. – С. 13-20.
21. The Development of Individually-adapted Neural Network Model of “Pilot-aircraft” System Using Modern Aircraft Simulation Facility : XII International Symposium Intelligent Systems 2016, INTELS 2016, 5-7 October 2016, Moscow, Russia / R. V. Kim, V. A. Yakimenko, E. A. Burlak [et al.] // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 103. – P. 148-154.
22. Real-time UAV Complex Missions Leveraging Self-Adaptive Controller with Elastic Structure / M. A. Hady, B. B. Kocer, H. Kandath, M. Pratama. – Текст : электронный // arXiv:1907.08619 [cs, eess]. – 2020. – URL: <http://arxiv.org/abs/1907.08619> (дата обращения: 10.02.2022).
23. Mishra A. Critic-Only Integral Reinforcement Learning Driven by Variable Gain Gradient Descent for Optimal Tracking Control / A. Mishra, S. Ghosh. – Текст :

электронный // arXiv:1911.04153 [cs, eess]. – 2020. – URL: <http://arxiv.org/abs/1911.04153> (дата обращения: 10.02.2022).

24. Оптимизация управления движением поездов / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Мелёшин, Л. М. Чинь. – М. : МИИТ, 2011. – 164 с.

25. Юренко К. И. Исследование энергоэффективных режимов ведения поезда с помощью имитационнооптимизационной модели / К. И. Юренко, П. А. Харченко, Е. И. Фандеев. – Текст : электронный. – 2018. – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/5241> (дата обращения: 13.07.2021).

26. Булатов Ю. Н. Интеллектуальные регуляторы для установок распределенной генерации / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков, З. Х. Чан // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 2 (46). – С. 83-95.

27. Булатов Ю. Н. Интеллектуальные системы управления установками распределенной генерации / Ю. Н. Булатов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 10 (129). – С. 78-94.

28. Стороженко А. В. Некоторые вопросы позиционирования судна вследствие потери сигнала навигационной системы / А. В. Стороженко, В. В. Попов, Т. П. Аванесова // Транспортное дело России. – 2016. – № 3. – С. 105-107.

29. Пшихопов В. Х. Гибридная система управления движением безэкипажного судна в заданную точку / В. Х. Пшихопов, М. Ю. Медведев, В. В. Соловьев // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2019. – № 1 (203). – С. 163-176.

30. The Intelligent Control System and Experiments for an Unmanned Wave Glider / Y. Liao, L. Wang, Y. Li [et al.] // PLOS ONE. – 2016. – Vol. 11. – № 12. – P. e0168792.

31. Филимонов А. Б. Два метода локальной навигации мобильных роботов в статических средах с препятствиями / А. Б. Филимонов, Н. Б. Филимонов. – Текст : электронный. – 2019. – С. 105-107. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41848017> (дата обращения: 26.07.2021).

32. Филимонов А. Б. Анализ модифицированного метода жука в задачах локальной навигации мобильных роботов / А. Б. Филимонов, Н. Б. Филимонов, М. А. Кожин. – Текст : электронный // Мехатроника, Автоматика И Робототехника. – 2021. – № 7. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44850361> (дата обращения: 26.07.2021).

33. Разработка системы стабилизации угла отклонения балансирующего робота / В. А. Жмудь, Д. С. Федоров, А. Ю. Ивойлов, В. Г. Трубин // Автоматика и программная инженерия. – 2015. – № 2 (12). – С. 16-34.

34. Матюхин В. И. Управление движением манипуляционных роботов на принципе декомпозиции при учете динамики приводов / В. И. Матюхин, Е. С. Пятницкий // Автоматика и телемеханика. – 1989. – № 9. – С. 67-81.

35. Робот-Тележка / М. М. Симоненко, Д. А. Сыроватский, А. М. Формальский, А. В. Утешев. – 2019. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38148233> (дата обращения: 26.07.2021). – Текст : электронный.

36. Лютов А. Г. Многопараметрическое оптимальное управление процессом нанесения гальванического покрытия с учетом изменения условий электролиза / А. Г. Лютов, А. Р. Ишкулова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2019. – Т. 23. – № 2 (84). – С. 138-144.

37. Gebel E. S. Intelligent control system for continuous technological process of alkylation / E. S. Gebel, R. A. Nakimov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 944. – P. 012038.

38. Глущенко А. И. Об эффективности настройки отдельных параметров ПИ-регулятора с помощью нейросетевого настройщика для компенсации возмущений при управлении нагревательными объектами / А. И. Глущенко // Управление большими системами: сборник трудов. – 2019. – № 78. – С. 71-105.

39. Chandan V. Optimal Control Architecture Selection for Thermal Control of Buildings : 18th IFAC World Congress / V. Chandan, A. G. Alleyne // IFAC Proceedings Volumes. – 2011. – Vol. 44. – № 1. – P. 3090-3095.

40. Кузьменко А. А. Нелинейное робастное управление возбуждением синхронного генератора: синергетическая система с переменной структурой / А. А. Кузьменко, А. Н. Попов, И. А. Радионов. – Текст : электронный // Информатика И Системы Управления. – 2014. – Нелинейное Робастное Управление Возбуждением Синхронного Генератора. – № 3 (41). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21944221> (дата обращения: 26.07.2021).

41. Sliding mode control of an isolated wound rotor synchronous generator / A. Dòria-Cerezo, E. Fossas, R. S. Muñoz Aguilar, V. Utkin // 2009 European Control Conference, ECC 2009. – 2015.

42. Cakanel A. Frequency Control of DC/AC Inverter / A. Cakanel, I. Vadim, V. Utkin. – 2016.

43. Филимонов А. Б. Некоторые вопросы применения методов машинного обучения в эргатических системах управления подвижными объектами / А. Б. Филимонов, Н. Б. Филимонов. – Текст : электронный. – Межрегиональная общественная организация «Эргономическая ассоциация», 2018. – С. 22-27. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36818483> (дата обращения: 26.07.2021).

44. Децентрализованное оптимальное управление многоэлементными реакторными системами нефтехимических и нефтегазовых производств / Б. П. Серафимович, Х. Вен-Цен, В. Л. Григорьевна [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 7. – С. 384-393.

45. Климина Л. А. Трехзвенный механизм как модель человека на качелях / Л. А. Климина, А. М. Формальский. – Текст : электронный // Известия Российской Академии Наук. Теория и системы управления. – 2020. – № 5. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43795377> (дата обращения: 26.07.2021).

46. Формальский А. М. Математическое моделирование поведения человека на качелях / А. М. Формальский, Л. А. Климина. – Текст : электронный. – Башкирский государственный университет, 2019. – С. 407-409. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41336435> (дата обращения: 26.07.2021).

47. Ананьевский И. М. Управление механическими системами в условиях неопределенности при помощи кусочно-линейных обратных связей / И. М. Ананьевский. – М., 1998.

48. Павловский В. Е. Исследование обратной задачи для вычисления управляющих воздействий для квадрокоптера / В. Е. Павловский, А. В. Савицкий // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2017. – № 17. – С. 1-20.

49. Поляк Б. Т. Развитие теории автоматического управления / Б. Т. Поляк // Проблемы управления. – 2009. – № 3.1. – С. 13-18.

50. Костоготов А. А. Метод квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче с использованием асинхронного варьирования / А. А. Костоготов, С. В. Лазаренко // Известия Российской Академии Наук. Теория и системы управления. – 2021. – Т. 6. – № 6. – С. 3-12.

51. Жданов А. А. Применение нечеткой логики в имитационной системе автономного адаптивного управления / А. А. Жданов, М. В. Караваев // Труды ИСП РАН. – 2002. – Т. 3. – С. 121-137.

52. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665509 Российская Федерация. Программа настройки параметров многорежимного нелинейного регулятора на основе условия максимума функции обобщенной мощности для квазиоптимальных режимов работы и анализа их эффективности : № 2021664261 : заявл. 10.09.2021 : опублик. 27.09.2021 / А. А. Агапов, А. А. Костоготов, З. В. Лященко [и др.]. / А. А. Агапов, А. А. Костоготов, З. В. Лященко, [и др.]. – 2021. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47117495> (дата обращения: 06.12.2021). – Текст : электронный.

53. Агапов А. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022612590 от 28.02.2022 Российская Федерация. Программа обработки экспериментальных данных изменения состояния нелинейного объекта управления типа «квадрокоптер» под действием системы

управления : № 2022612063/69 : заявл. 17.02.2022 / А.А. Агапов / А. А. Агапов. – 2022.

54. Агапов А. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022617674 от 25.04.2022 Российская Федерация. Программа настройки параметров системы управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности для объекта типа «обратный маятник на тележке» : № 2022616607 : заявл. 15.04.2022 / А.А. Агапов / А. А. Агапов. – 2022.

55. Костоглотов А. А. Методы аналитической и поисковой оптимизации : учеб. пособие / А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко, А. А. Агапов. – Ростов н/Д : ФГБОУ ВО РГУПС, 2019. – 62 с.

56. Таран В. Н. Научно-технические задачи в области профессиональной деятельности : учеб. пособие / В. Н. Таран, Е. Н. Мищенко, А. А. Агапов. – Ростов н/Д : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. – 108 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44430846> (дата обращения: 17.06.2021). – Текст : электронный.

57. Александров А. Г. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов / А. Г. Александров, М. В. Паленов. – Текст : электронный // Автоматика И Телемеханика. – 2014. – № 2. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21267569> (дата обращения: 26.10.2021).

58. Многофункциональные комплексы беспилотных летательных аппаратов / А. В. Полтавский, А. А. Бурба, А. Е. Аверкин, [и др.]. – М. : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2015. – 204 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30771987> (дата обращения: 21.10.2021). – Текст : электронный.

59. Systematic Online Tuning of Multirotor UAVs for Accurate Trajectory Tracking Under Wind Disturbances and In-Flight Dynamics Changes / А. Y. Alkayas, М. Chehadeh, А. Ayyad, Y. Zweiri. – Текст : электронный // arXiv:2106.03459 [cs, eess]. – 2021. – URL: <http://arxiv.org/abs/2106.03459> (дата обращения: 27.03.2022).

60. Протокол заседания объединенного ученого совета открытого акционерного общества «Российские железные дороги». – 2018.

61. Притыкин Д. Е. Метод обратных задач динамики для синтеза регулятора скорости магистрального электровоза / Д. Е. Притыкин. – Текст : электронный // Известия Высших Учебных Заведений. Электромеханика. – 2012. – № 5. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18027168> (дата обращения: 03.02.2023).

62. Мугинштейн Л. А. Энергооптимальные методы управления движением поездов / Л. А. Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Ябко. – М. : Интекст, 2012. – 80 с.

63. Литовченко И. А. Теория оптимальных систем / И. А. Литовченко. – Текст : электронный // Итоги науки. Сер. Мат. анализ. Теор. вероятн. Регулир. – М. : ВИНТИ, 1962. – С. 155-196. – URL: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=intv&paperid=86&option_lang=rus (дата обращения: 26.07.2021).

64. Двухзонные следящие системы / В. В. Шеваль, В. И. Дорохов, С. А. Исаков, В. И. Земцов. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 88 с.

65. Мугинштейн Л. А. Энергооптимальный Тяговый Расчет Движения Поездов / Л. А. Мугинштейн, С. А. Виноградов, И. А. Ябко. – Текст : электронный // Железнодорожный Транспорт. – 2010. – № 2. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17762597> (дата обращения: 21.10.2021).

66. Моисеев А. А. Автоматизированная система расчета оптимальных режимов поездов метрополитена : Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. А. Моисеев. – МИИТ, 1992. – 193 с.

67. Фуртат И. Б. Синтез алгоритма управления объектами с параметрической неопределенностью, возмущениями и насыщением входного сигнала / И. Б. Фуртат. – Текст : электронный // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 12. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30718061> (дата обращения: 13.07.2021).

68. Цыкунов А. М. Адаптивное и робастное управление динамическими объектами по выходу / А. М. Цыкунов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 268 с.
69. Robust adaptive control of uncertain nonlinear systems in the presence of input saturation and external disturbance / С. Wen, J. Zhou, Z. Liu, H. Su // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2011. – Т. 56. – № 7. – С. 1672-1678.
70. Колесников А. А. Методы АКАР и АКОР в задачах синтеза нелинейных систем управления / А. А. Колесников, Колесников Ал. А., А. А. Кузьменко // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – 2016. – Т. 17. – № 10. – С. 657-669.
71. Aström K. J. Control: A perspective / K. J. Aström, P. R. Kumar // Automatica. – 2014. – Vol. 50. – Control. – № 1. – P. 3-43.
72. Филимонов Н. Б. Полиэдральная Методология В Задачах Оптимизации Дискретных Процессов Управления / Н. Б. Филимонов. – Текст : электронный. – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 911-916. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22223158> (дата обращения: 26.10.2021).
73. Востриков А. С. Синтез ПИД-регуляторов для нелинейных нестационарных объектов / А. С. Востриков, Г. А. Французова // Автометрия. – 2015. – Т. 51. – № 5. – С. 53-60.
74. Прокопьев А. П. Синтез ПИД-регулятора для объектов второго порядка с учетом расположения полюсов / А. П. Прокопьев, В. И. Иванчура, Р. Т. Емельянов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2016. – Т. 9. – № 1. – С. 50-60.
75. Тутов И. А. Некоторые причины редкого практического использования регуляторов с переменной структурой / И. А. Тутов. – Текст : электронный // Актуальные Проблемы Гуманитарных И Естественных Наук. – 2015. – № 4-1. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23479364> (дата обращения: 26.07.2021).
76. Филимонов А. Б. К вопросу о линеаризации обратной связью аффинных динамических объектов управления / А. Б. Филимонов, Н. Б.

Филимонов. – Текст : электронный // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2021. – № 23-2. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44850377> (дата обращения: 26.07.2021).

77. Optimal and optimal-linear control over lossy, distributed networks : 18th IFAC World Congress / M. Kögel, R. Blind, F. Allgöwer, R. Findeisen // IFAC Proceedings Volumes. – 2011. – Vol. 44. – № 1. – P. 13239-13244.

78. Logical Linguistic Controllers : XII International Symposium Intelligent Systems 2016, INTELS 2016, 5-7 October 2016, Moscow, Russia / S. N. Vassilyev, I. Y. Kudinov, Y. I. Kudinov, F. F. Pashchenko // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 103. – P. 629-636.

79. Филимонов А. Б. К вопросу синтеза систем многорежимного регулирования / А. Б. Филимонов, Н. Б. Филимонов. – Текст : электронный // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2020. – № 18. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42371719> (дата обращения: 26.07.2021).

80. Красовский А. А. Справочник по теории автоматического управления / А. А. Красовский. – М. : Наука, 1987. – 712 с.

81. Рутковский В. Ю. Прецизионное управление нестационарными летательными аппаратами по углу крена / В. Ю. Рутковский, В. М. Глузов, В. М. Суханов // Проблемы Управления. – 2011. – № 5. – С. 82-87.

82. Ротач В. Я. Теория автоматического управления / В. Я. Ротач. – М. : Изд. дом МЭИ, 2008. – 394 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19592140> (дата обращения: 26.10.2021). – Текст : электронный.

83. Designing the Knowledge Base for the Intelligent Inertial Regulator Based on Quasi-optimal Synthesis of Controls Using the Combined Maximum Principle / A. Kostoglotov, S. Lazarenko, A. Agapov [et al.] // Proceedings of the Third International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI'18), Sochi, Russia, September 17–21 : Advances in Intelligent Systems and Computing / A. Abraham [et al.] eds. . – Cham : Springer International Publishing, 2019. – P. 190-200.

84. Анализ и синтез нелинейных многорежимных законов управления с использованием объединенного принципа максимума / А. А. Агапов, А. А.

Костоготов, С. В. Лазаренко [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 1 (73). – С. 119-125.

85. Костоготов А. А. О синтезе многорежимных инерционных регуляторов на основе объединенного принципа максимума / А. А. Костоготов, А. А. Агапов, С. В. Лазаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 1 (69). – С. 152-159.

86. Агапов А. А. Сравнительный анализ эффективности многорежимных алгоритмов управления нелинейной системой на базе объединенного принципа максимума / А. А. Агапов, А. С. Пеньков. – Текст : электронный // Сборник научных трудов «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России», Ростов-на-Дону, 24–26 октября 2019 года. – Ростов н/Д : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. – С. 15-19. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41441352> (дата обращения: 17.06.2021).

87. Синтез квазиоптимального многорежимного закона управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и принципа освобождаемости / С. В. Лазаренко, А. А. Костоготов, А. А. Агапов, З. В. Лященко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: естественные науки. – 2020. – № 4 (208). – С. 29-35.

88. Синтез квазиоптимальных многорежимных законов управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и условия трансверсальности / А. А. Костоготов, С. В. Лазаренко, А. А. Агапов, З. В. Лященко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (80). – С. 170-179.

89. Оценка эффективности многорежимного регулятора с нелинейной поверхностью переключения по критериям быстродействия, точности и энергозатрат / А. А. Костоготов, С. В. Лазаренко, А. А. Агапов, З. В. Лященко. – Текст : электронный // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство», Ростов-на-Дону, 20–22 апреля 2020 года. – Ростов н/Д :

Ростовский государственный университет путей сообщения, 2020. – С. 70-73. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44058362> (дата обращения: 17.06.2021).

90. Применение методов нелинейной коррекции в задачах управления неустойчивым объектом / А. А. Агапов, З. В. Лященко, А. А. Костоготов, В. И. Мамай. – Текст : электронный // «Транспорт: наука, образование, производство» Ростов-на-Дону, 23–26 апреля 2019 года. – Ростов н/Д : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. – Т. 1. – С. 89-92. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41193433> (дата обращения: 17.06.2021).

91. Анализ эффективности многорежимного управления с нелинейной коррекцией на основе структурного синтеза с использованием асинхронной вариации расширенного функционала / А. А. Костоготов, С. В. Лазаренко, А. А. Агапов, З. В. Лященко. – Текст : электронный // VII Международная научно-практическая конференция «Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике» : 1 (5). – Азов : Технологический институт (филиал) ДГТУ в г. Азове, 2020. – Т. 6. – С. 115-119. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44132927> (дата обращения: 17.06.2021).

92. Анализ эффективности закона управления с нелинейной коррекцией на основе объединенного принципа максимума в задаче управления системой обратного маятника / А. А. Агапов, А. А. Костоготов, С. В. Лазаренко, З. В. Лященко // Сборник научных трудов Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России. – Ростов н/Д : ФГБОУ ВО РГУПС, 2020. – Т. 1. – С. 14-17.

93. Костоготов А. А. Анализ эффективности метода нелинейной коррекции на основе объединенного принципа максимума в задаче управления обратным маятником / А. А. Костоготов, А. А. Агапов, Я. В. Медведев // Материалы девятой всероссийской научно-практической конференции Решение-2020, г. Березники, 17 октября 2020 г. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2020. – С. 94-98.

94. Метод нелинейной коррекции на основе объединенного принципа максимума и оценка его эффективности / А. А. Костоготов, А. А. Агапов, А. С. Пеньков [и др.]. – Текст : электронный // Труды X Международной научной конференции «Системный анализ, управление и обработка информации», Ростов-на-Дону, 25–27 декабря 2019 года. – Ростов н/Д : Донской государственный технический университет, 2020. – С. 43-47. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44453920> (дата обращения: 17.06.2021).

95. Агапов А. А. Оценка эффективности применения элемента коррекции на основе условия максимума функции обобщенной мощности на примере задачи управления нелинейным объектом типа «обратный маятник» / А. А. Агапов, А. М. Швыдко. – Текст : электронный // Сборник научных трудов «Современное развитие науки и техники», Ростов-на-Дону, 01–03 декабря 2020 года. – Ростов н/Д : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2020. – С. 16-20. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46378625> (дата обращения: 01.09.2021).

96. Харламов А. А. Динамическая нейронная сеть для распознавания речевых сигналов / А. А. Харламов, А. Е. Ермаков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. – 1998. – № 1. – С. 93-101.

97. Методы робастного нейро-нечеткого и адаптивного управления / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов, А. И. Гаврилов, [и др.]. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 744 с.

98. Zadeh L. A. Fuzzy logic – a personal perspective : Special Issue Celebrating the 50th Anniversary of Fuzzy Sets / L. A. Zadeh // Fuzzy Sets and Systems. – 2015. – Vol. 281. – P. 4-20.

99. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19463117> (дата обращения: 20.10.2021). – Текст : электронный.

100. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab / С. Д. Штовба. – М. : Горячая линия, 2007. – 288 с.

101. Zadeh L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – № 3. – P. 338-353.
102. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг. – М. : Наука, 1991. – 432 с.
103. Джейн А. К. Введение в искусственные нейронные сети / А. К. Джейн, К. М. Муиуддин // Открытые системы. – 1997. – № 4. – С. 17-24.
104. Дэннис Дж. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений / Дж. Дэннис, Р. Шнабель. – М. : Мир, 1998. – 440 с.
105. Демидова Г. Л. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами / Г. Л. Демидова, Д. В. Лукичев. – СПб : Университет ИТМО, 2017. – 81 с.
106. Хижняков Ю. Н. Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени / Ю. Н. Хижняков. – Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2013. – 160 с.
107. Новоселов В. С. Вариационные методы в механике / В. С. Новоселов. – Л. : Изд-во Ленинградского университета, 1966. – 72 с.
108. Лурье А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. – М. : Физматгиз, 1961. – 824 с.
109. Пятницкий Е. С. Синтез иерархических систем управления механическими и электромеханическими объектами на принципе декомпозиции. I / Е. С. Пятницкий // Автоматика и телемеханика. – 1989. – Т. 50. – № 1. – С. 87-99.
110. Пятницкий Е. С. Управляемость классов лагранжевых систем с ограниченными управлениями / Е. С. Пятницкий // Автоматика и телемеханика. – 1996. – Т. 57. – № 12. – С. 29-37.
111. Розоноэр Л. И. Принцип максимума Л.С. Понтрягина в теории оптимальных систем. II / Л. И. Розоноэр // Автоматика и телемеханика. – 1959. – С. 1441-1458.
112. Понтрягин Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе. – М. : Наука, 1983. – 392 с.

113. Костоглотов А. А. Метод идентификации параметров голономных систем на основе аппарата асинхронного варьирования / А. А. Костоглотов // Известия Российской Академии Наук. Теория И Системы Управления. – 2003. – № 2. – С. 86-92.

114. Охоцимский Д. Е. Некоторые вариационные задачи, связанные с запуском искусственного спутника Земли / Д. Е. Охоцимский, Т. М. Энеев // Успехи физических наук. – 1957. – С. 5-32.

115. Голубев Ю. Ф. Метод Охоцимского-Понтрягина в теории управления и аналитической механике. Часть 1: метод Охоцимского-Понтрягина в теории управления / Ю. Ф. Голубев // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. – 2008. – № 6. – С. 50-55.

116. Ахиезер Н. И. Лекции по вариационному исчислению / Н. И. Ахиезер. – М. : Гостехиздат, 1955. – 248 с.

117. Трухачев Р. И. Теория неклассических вариационных задач / Р. И. Трухачев. – Л. : ЛГУ, 1970. – 168 с.

118. Костоглотов А. А. Синтез модели процесса с нестационарными возмущениями на основе максимума функции обобщенной мощности / А. А. Костоглотов, А. А. Кузнецов, С. В. Лазаренко. – Текст : электронный // Математическое Моделирование. – 2016. – Т. 28. – № 12. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28119147> (дата обращения: 02.08.2021).

119. Костоглотов А. А. Синтез адаптивных систем сопровождения на основе гипотезы о стационарности гамильтониана гиперповерхности переключения / А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко. – Текст : электронный // Радиотехника И Электроника. – 2017. – Т. 62. – № 2. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28172348> (дата обращения: 02.08.2021).

120. Kostoglotov A. A. Solution of Fuller's problem on the basis of the joint Pontryagin-Hamilton-Ostrogradskii principle / A. A. Kostoglotov // Automatic Control and Computer Sciences. – 2007. – Vol. 41. – № 4. – P. 179-187.

121. Костоглотов А. А. Объединенный принцип максимума в информационных технологиях анализа и синтеза / А. А. Костоглотов, А. И.

Костоготов, С. В. Лазаренко. – РТИСТ, 2010. – 164 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19597666> (дата обращения: 27.07.2021). – Текст : электронный.

122. Костоготов А. А. Метод квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче с использованием асинхронного варьирования / А. А. Костоготов, С. В. Лазаренко // Известия Российской Академии Наук. Теория и системы управления. – 2021. – № 6. – С. 3-12.

123. Ананьевский И. М. Непрерывное управление механической системой на основе метода декомпозиции / И. М. Ананьевский, С. А. Решмин // Известия Российской Академии Наук. Теория и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 3-17.

124. Структурный синтез дискретных адаптивных следящих систем на основе объединенного принципа максимума / А. А. Костоготов, С. В. Лазаренко, А. А. Кузнецов [и др.] // Advanced Engineering Research. – 2018. – Т. 17. – № 1. – С. 105-112.

125. Синтез фильтра сопровождения со структурной адаптацией на основе объединенного принципа максимума / А. А. Костоготов, А. А. Кузнецов, С. В. Лазаренко, В. А. Лосев // Информационно-Управляющие Системы. – 2015. – № 4 (77). – С. 2-9.

126. Анализ вариантов реализации фильтров сопровождения на основе объединенного принципа максимума / А. А. Костоготов, А. А. Кузнецов, С. В. Лазаренко, Б. М. Ценных. – Текст : электронный. – 2014. – С. 1734-1743. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25707260> (дата обращения: 20.10.2021).

127. Агапов А. А. Синтез квазиоптимального закона управления на основе построения линии переключения с учетом анализа пучка квадратичных форм в составе интеллектуальной транспортной системы / А. А. Агапов, А. А. Костоготов, С. В. Лазаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1 (85). – С. 177-185.

128. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Том 1. Механика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 4-е. – М. : Наука, 1988. – 216 с.

129. Kostoglotov A. A. Analysis of the Efficiency of Quasioptimal Nonlinear Control Laws with Adaptation of the Switching Hypersurface under Uncertainty of External Influences / A. A. Kostoglotov, A. A. Agapov, S. V. Lazarenko // 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2022. – С. 559-563.

130. Формальский А. М. Управление движением неустойчивых объектов / А. М. Формальский. – ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2012. – 232 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26012584> (дата обращения: 15.07.2021). – Текст : электронный.

131. Агапов А. А. Сравнительный анализ качества регулятора на основе условия максимума функции обобщенной мощности при управлении неустойчивым нелинейным объектом / А. А. Агапов // «Транспорт: наука, образование, производство», Ростов-на-Дону, 19-21 апреля 2021 г. – Ростов н/Д : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2021. – Т. 1. – С. 15-18.

132. Костоглотов А. А. Синтез закона управления нелинейными неустойчивыми объектами в условиях возмущений на основе условия максимума функции обобщенной мощности / А. А. Костоглотов, А. А. Агапов, З. В. Лященко // Сборник научных трудов «Цифровые инфокоммуникационные технологии», Ростов-на-Дону, 07 сентября 2021 года. – Ростов н/Д : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2021. – С. 13-17.

133. Анализ эффективности закона управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности / А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко, А. А. Агапов, А. М. Швыдко // Материалы X Всероссийской научно-практической конференции «Решение 2021», г. Березники, 15 октября 2021 г. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2021. – С. 71-73.

134. Черноусько Ф. Л. Декомпозиция и синтез управления в нелинейных динамических системах / Ф. Л. Черноусько // Тр. МИАН. – 1995. – Т. 211. – С. 457-472.

135. Черноусько Ф. Л. Декомпозиция управления динамической системой / Ф. Л. Черноусько // Докл. АН СССР. – 1990. – Т. 314. – № 4. – С. 801-805.
136. Квакернаак Х. Линейные оптимальные системы управления / Х. Квакернаак, Р. Сиван. – М. : Мир, 1977. – 650 с.
137. Синтез нелинейных систем в условиях ограниченных возмущений с использованием многорежимных законов управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности / А. А. Костоготов, А. А. Агапов, З. В. Лященко, С. В. Лазаренко // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2022. – Т. 20. – № 1-2. – С. 37-47.
138. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М. : Горячая линия, 2006. – 452 с.
139. Коньшева Л. К. Основы теории нечетких множеств / Л. К. Коньшева, Д. М. Назаров. – СПб : Питер, 2011. – 192 с.
140. Агапов А. А. Анализ эффективности квазиоптимальных законов управления с применением аппарата нечеткой логики в задачах интеллектуализации транспортных систем / А. А. Агапов, А. А. Костоготов, С. В. Лазаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (89). – С. 126-135.
141. Агапов А. А. Построение закона управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода / А. А. Агапов, А. А. Костоготов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2022. – № 4 (216). – С. 35-40.
142. Kostoglotov A. A. Method for Synthesis of Intelligent Controls Based on Fuzzy Logic and Analysis of Behavior of Dynamic Measures on Switching Hypersurface / A. A. Kostoglotov, A. A. Agapov, S. V. Lazarenko // Proceedings of the Fourth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ИТИ’19) : Advances in Intelligent Systems and Computing / S. Kovalev [et al.] eds. . – Cham : Springer International Publishing, 2020. – P. 531-540.

143. Агапов А. А. Построение интеллектуальных транспортных систем на основе квазиоптимальных структур управления и нечеткого логического вывода / А. А. Агапов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 8-17.

144. Колесников Ал. А. Управление нелинейными колебаниями. Энергетические инварианты / Колесников Ал. А. – Текст : электронный // Известия Российской Академии Наук. Теория И Системы Управления. – 2009. – № 2. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13066650> (дата обращения: 28.03.2023).

145. Kostoglotov A. A. Synthesis of Multimode Control Laws Under Disturbances Conditions Based on the Condition for Maximum of the Generalized Power Function in Automation Problems / A. A. Kostoglotov, Z. V. Lyaschenko, A. A. Agapov. – Text : electronic // Proceedings of the Fifth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’21) : Lecture Notes in Networks and Systems / S. Kovalev [et al.] eds. . – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 601-609. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-87178-9_59 (date accessed: 21.10.2021).

146. Kostoglotov A. A. Development of a Structurally Fuzzy Regulator Based on the Condition of the Maximum of the Generalized Power Function Under Constraints on Control / A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko, A. A. Agapov // Proceedings of the Fifth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’21) : Lecture Notes in Networks and Systems / S. Kovalev [et al.] eds. . – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 582-588.

147. Cheng H. D. Automatically determine the membership function based on the maximum entropy principle / H. D. Cheng, J.-R. Chen // Information Sciences. – 1997. – Vol. 96. – № 3. – P. 163-182.

148. Агапов А. А. Разработка интеллектуального закона управления квадрокоптера в задаче выполнения маневра / А. А. Агапов. – Текст : электронный // Сборник статей VIII Международной научно-практической конференции

«Актуальные вопросы современной науки», 20 августа 2023 г. – Пенза : Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2023. – С. 27-30. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54312512&pff=1> (дата обращения: 23.08.2023).

149. ТМХ прекратил выпуск созданных с Alstom электровозов, но сделает российские // РИА Новости : [сайт]. – 2023. – 24 июля. – URL: <https://ria.ru/20230724/elektrovozy-1885859910.html> (дата обращения: 28.08.2023).

150. РЖД ждут от заводов линейку полностью отечественных локомотивов // 1prime.ru : [сайт]. – 2023. – 25 апр. – URL: <https://1prime.ru/transport/20230425/840470004.html> (дата обращения: 28.08.2023).

151. Шевченко, А. ТМХ впервые в РФ представил контактно-аккумуляторный маневровый электровоз / А. Шевченко // neftegaz.ru : [сайт]. – 2023. – 27 авг. – URL: <https://neftegaz.ru/news/Oborudovanie/791664-tmkh-vpervye-v-rf-predstavil-kontaktno-akkumulyatornuu-manevrovuyu-elektrovoz/> (дата обращения: 28.08.2023).

152. Кузмич В. Д. Теория локомотивной тяги / В. Д. Кузмич, В. С. Руднев, С. Я. Френкель. – М. : Издательство «Маршрут», 2005. – 448 с.

153. Шалягин Д. В. Интеллектуализация систем управления / Д. В. Шалягин, Е. Н. Розенберг, В. И. Астрахан. – Текст : электронный // Железнодорожный Транспорт. – 2014. – № 12. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22543689> (дата обращения: 16.02.2023).

154. Капустин М. Ю. Модель адаптивной системы прицельного электропневматического торможения электропоезда / М. Ю. Капустин, С. И. Краснолобов, П. С. Саркисян // Наука и техника транспорта. – 2011. – № 4. – С. 33-43.

155. Баранов Л. А. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, В. М. Максимов. – Москва : Транспорт, 1990. – 271 с. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001526977> (дата обращения: 25.04.2023). – Текст : электронный.

156. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены Распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р в редакции Распоряжения ОАО «РЖД» от 09.02.2018 № 182/р. – 516 с.

157. Зарифьян А. А. Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока : дис. на соиск. степ. канд. техн. наук: 05.22.07 / А. А. Зарифьян. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2016. – 121 с.

158. Зарифьян А. А. Синтез регулятора скорости электровоза методами теории конечных автоматов / А. А. Зарифьян // Вестник Ростовского Государственного Университета Путей Сообщения. – 2019. – № 3 (75). – С. 30-37.

159. Zarifyan A. Synthesis of the heavy freight locomotive speed control system by finite-state machine theory / A. Zarifyan // The 16th International Conference on Civil, Structural & Environmental Engineering Computing. – Riva del Garda, Italy, 2019.

160. Агапов А. А. Возможность использования интеллектуального алгоритма управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности в системе автоматического регулирования скорости электровоза / А. А. Агапов, А. А. Зарифьян // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 28-34.

Приложение А. Листинги программ**А1 Программа настройки параметров системы управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности для объекта типа «обратный маятник на тележке»**

Агапов А. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022617674 от 25.04.2022 Российская Федерация. Программа настройки параметров системы управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности для объекта типа «обратный маятник на тележке»: № 2022616607: заявл. 15.04.2022 / А.А. Агапов / А. А. Агапов. – 2022. Язык программирования: Python.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.integrate as integrate
import matplotlib.animation as animation
```

```
from numpy import sin, cos
```

```
def sat(value, maximum):
    if (value>maximum):
        return maximum
    elif (value<-maximum):
        return -maximum
    else:
        return value
```

```
# Характеристики маятника на тележке
```

```
g = 9.8
fric = 1 # коэф. трения
mc = 1
mp = 0.1 # масса маятника
L = 0.842
l = L
```

```
# Параметры моделирования (время)
```

```
dt = 0.005
Tmax = 10
t = np.arange(0.0, Tmax, dt)
```

```
# Начальные условия
```

```

q1 = .0 # координата тележки
dq1 = .0
q2 = .15 # угол отклонения маятника, рад
dq2 = 2.0

# Создаем массив состояний
state = np.array([q1, dq1, q2, dq2])

def equations(state, t):
    # Вектор производных состояния
    ds = np.zeros_like(state)

    _q1 = state[0]
    _dq1 = state[1]
    _q2 = state[2]
    _dq2 = state[3]

    # Коэффициенты управления
    k0 = 6.95
    k1 = 10.27
    k2 = 61.1292
    k3 = 17.9

    k_cmp1 = 2 #abs(_dq1 - _q1)
    k_cmp2 = 0.1 #abs(_dq2 - _q2)

    # Управление
    u_kvak = mc * (k0 * _q1 + k1 * _dq1 + k2 * _q2 + k3 * _dq2)
    """
    Управление разработанное (на основе условия МФОМ)
    """

    # Вариант с параметрами как в линейном управлении
    u_cmp = mc * (k0 * _q1 + k1 * _dq1 * abs(_dq1) / (abs(_q1) + k_cmp1) + k2 * _q2
+ k3 * _dq2 * abs(_dq2) / (abs(_q2) + k_cmp2))
    # Вариант с настроенными вручную параметрами
    #u_cmp = mc * (12 * _q1 + 10 * _dq1 * abs(_dq1) / (abs(_q1) + 2) + 60 * _q2 + 10 *
_dq2 * abs(_dq2) / (abs(_q2) + 0.1))

    # Ограничение на управление
    u_max = 10
    # Выбор управления
    u = sat(u_cmp, u_max)

    # тележка
    ds[0] = state[1]

```

```

ds[1] = u - fric * state[1] / mc
# маятник
ds[2] = state[3]
ds[3] = g * sin(state[2]) / L - u * cos(state[2]) / L

return ds

# Решаем систему
solution = integrate.odeint(equations, state, t)

sol_q1 = solution[:, 0]
sol_q2 = solution[:, 2]

# Координата тележки
x_w = sol_q1
# Координаты маятника
x_p = x_w + l * sin(sol_q2)
y_p = l * cos(sol_q2)

# Графики
fig2, (f2ax1, f2ax2) = plt.subplots(nrows=2, ncols=1)
f2ax1.plot(t, sol_q2, label='угол маятника, радианы')
f2ax2.plot(t, x_w, label='координата колеса, радианы')

# Рисуем анимацию
fig = plt.figure()
# Создаем оси
ax = plt.axes(xlim=(-1.5, 3), ylim=(-0.5, 1.2))
# Чтобы оси были эквивалентны (например, чтобы был круглым круг)
ax.set_aspect('equal')
# Создаем и добавляем на оси прямоугольник
patch = ax.add_patch(plt.Rectangle((0, 0), 0, 0, linewidth=1, edgecolor='k',
facecolor='g'))
cart_width = 0.3
cart_height = 0.2
# Включаем сетку графика
ax.grid()
# Создаем линию с пустыми координатами
line = ax.plot([], [], 'o-', lw=2)[0]
ax.plot([-1.5, 3], [-0.1, -0.1])
# Собираемся выводить время на графике
time_template = 'time = %.1fs'
time_text = ax.text(0.05, 0.9, "", transform=ax.transAxes)

def init():

```

```
line.set_data([], [])
time_text.set_text("")
# Позиция тележки
patch.set_xy((-cart_width/2, -cart_height/2))
patch.set_width(cart_width)
patch.set_height(cart_height)
return line, time_text, patch
```

```
def animate(i):
```

```
# Даем координаты крайним точкам линии для отрисовки
line.set_data([x_w[i], x_p[i]], [0, y_p[i]])
# Обновляем время на текущее
time_text.set_text(time_template % (i*dt))
# Позиция колеса
patch.set_x(x_w[i] - cart_width/2)
return line, time_text, patch
```

```
anim = animation.FuncAnimation(fig, animate,
                               init_func=init,
                               frames=1600,
                               interval=10,
                               blit=True, repeat=True)
```

```
# Сохраняем анимацию в виде gif файла:
```

```
anim.save('обратный маятник на тележке.gif', writer='imagemagick', fps=60)
```

A2 Программа настройки параметров многорежимного нелинейного регулятора на основе условия максимума функции обобщенной мощности для квазиоптимальных режимов работы и анализа их эффективности

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665509 Российская Федерация. Программа настройки параметров многорежимного нелинейного регулятора на основе условия максимума функции обобщенной мощности для квазиоптимальных режимов работы и анализа их эффективности : № 2021664261 : заявл. 10.09.2021 : опубл. 27.09.2021 / А. А. Агапов, А. А. Костоготов, З. В. Лященко [и др.]. / А. А. Агапов, А. А. Костоготов, З. В. Лященко, [и др.]. – 2021. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47117495> (дата обращения: 06.12.2021). – Текст : электронный. Язык программирования: Mathcad.

Исходные данные для моделирования:

Начало интервала:
 $t_1 := 0$

Конец интервала:
 $t_2 := 12$

Шаг дискретизации:
 $\Delta t := 0.02$

Количество шагов дискретизации:
 $n := \frac{t_2 - t_1}{\Delta t} = 600$

Шаги итерации:
 $i := 0..n$

Переменная для линий переключения:
 $var3 := -0.3, -0.3 + \Delta t.. 0.3$

Целевой функционал: *стремимся к минимуму*

Получение вектора состояний на каждую итерацию:

$$x(Z) := \text{for } i \in 0..n \begin{cases} x_{0,i} \leftarrow Z_{i,1} \\ x_{1,i} \leftarrow Z_{i,2} \end{cases}$$

Функционал по перемещению:

$$J_{\text{speed}}(x) := \sum_{i=0}^n \left[(x_{i,1})^2 \cdot \Delta t \right]$$

Функционал по перемещению:

$$J_{\text{speed}}(x) := \sum_{i=0}^n \left[(x_{i,2})^2 \cdot \Delta t \right]$$

Функционал по времени достижения цели:
цель - одна десятая градуса

$$J_{\text{time}}(Z) := \text{for } i \in 0.. \text{rows}(Z^{(1)}) - 1 \begin{cases} \text{if } |Z_{i,1}| \leq 0.01 \wedge |Z_{i,2}| \leq 0.01 \\ \quad |J_{\text{time}} \leftarrow i \cdot \Delta t \\ \quad \text{break} \\ J_{\text{time}} \leftarrow \text{"null"} \text{ otherwise} \end{cases}$$

Затраты на управление (массив другой)

$$J_{\text{u}}(Z) := \sum_{i=0}^{\text{rows}(Z)-1} |Z_i|$$

Ограничение по управлению:

$$U_{\max} := 1$$

Функция насыщения (техническое ограничение управления):

$$\text{sat}(x) := \begin{cases} x & \text{if } |x| \leq U_{\max} \\ U_{\max} & \text{if } x > U_{\max} \\ -U_{\max} & \text{if } x < -U_{\max} \end{cases}$$

Топчев

$$k_{\text{topch.1}} := 1$$

$$k_{\text{topch.2}} := 1$$

$$U_{\text{topch}}(x) := U_{\max} \cdot \text{sign} \left[k_{\text{topch.1}} \cdot (x_0 + k_{\text{topch.2}} \cdot x_1 \cdot |x_1|) \right]$$

Фуллер

$$U_{\text{full}}(x) := U_{\max} \cdot \text{sign} \left(x_0 + \frac{0.4446 \cdot x_1 \cdot |x_1|}{U_{\max}} \right)$$

Понтрягин

$$U_{\text{pon}}(x) := U_{\max} \cdot \text{sign} \left(x_0 + \frac{x_1 \cdot |x_1|}{2 \cdot U_{\max}} \right)$$

ОПМ

Коэффициенты непрерывного регулятора:

$$k_{\text{cont.1}} := 20$$

$$k_{\text{cont.2}} := 0.07$$

$$k_{\text{cont.3}} := 0.000001$$

Непрерывный регулятор:

$$U_{\text{cont}}(x) := \text{sat} \left[k_{\text{cont.1}} \cdot \left(x_0 + k_{\text{cont.2}} \cdot \frac{|x_1| \cdot x_1}{|x_0| + k_{\text{cont.3}}} \right) \right]$$

Линии переключения

2. Топчев

$$\text{line}_{\text{topch}}(x, k1, k2) := \begin{cases} -\sqrt{\frac{1}{k2}} \cdot x & \text{if } x \geq 0 \\ \sqrt{-\left(\frac{1}{k2} \cdot x\right)} & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

3. ОПМ

$$\text{line}_{\text{cmp}}(x, k1, k2, k3) := \begin{cases} -\sqrt{\frac{1}{k2} \cdot x \cdot (|x| + k3)} & \text{if } x \geq 0 \\ \sqrt{-\frac{1}{k2} \cdot x \cdot (|x| + k3)} & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

4. Фуллер

$$\text{line}_{\text{full}}(x, U) := \begin{cases} -\sqrt{\frac{U}{0.4446}} \cdot x & \text{if } x \geq 0 \\ \sqrt{-\frac{U}{0.4446}} \cdot x & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

5. Понтрягин

$$\text{line}_{\text{pon}}(x, U) := \begin{cases} -\sqrt{2 \cdot U \cdot x} & \text{if } x \geq 0 \\ \sqrt{-2 \cdot U \cdot x} & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

Начальные условия:*перемещение**скорость*

$$X0 := \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.3 \end{pmatrix}$$

$$F_{\text{topch1}}(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ -U_{\text{topch}}(x) \end{pmatrix}$$

$$F_{\text{full1}}(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ -U_{\text{full}}(x) \end{pmatrix}$$

$$Z_{\text{topch1}} := \text{rkfixed}(X0, t_1, t_2, n, F_{\text{topch1}})$$

$$Z_{\text{full1}} := \text{rkfixed}(X0, t_1, t_2, n, F_{\text{full1}})$$

$$F_{\text{cont1}}(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ -U_{\text{cont}}(x) \end{pmatrix}$$

$$F_{\text{pon1}}(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ -U_{\text{pon}}(x) \end{pmatrix}$$

$$Z_{\text{cont1}} := \text{rkfixed}(X0, t_1, t_2, n, F_{\text{cont1}})$$

$$Z_{\text{pon1}} := \text{rkfixed}(X0, t_1, t_2, n, F_{\text{pon1}})$$

Критерий быстродействия

Критерий точности

$$J_{\text{time}}(Z_{\text{cont1}}) = 1.3$$

$$J(Z_{\text{cont1}}) = 0.0391257188$$

$$J_{\text{time}}(Z_{\text{topch1}}) = 1.48$$

$$J(Z_{\text{topch1}}) = 0.0399593266$$

$$J_{\text{time}}(Z_{\text{full1}}) = 1.58$$

$$J(Z_{\text{full1}}) = 0.0390208452$$

$$J_{\text{time}}(Z_{\text{pon1}}) = 1.3$$

$$J(Z_{\text{pon1}}) = 0.0390816132$$

Критерий по скорости

$$J_{\text{speed}}(Z_{\text{cont1}}) = 0.0905492814$$

$$J_{\text{speed}}(Z_{\text{topch1}}) = 0.0775004444$$

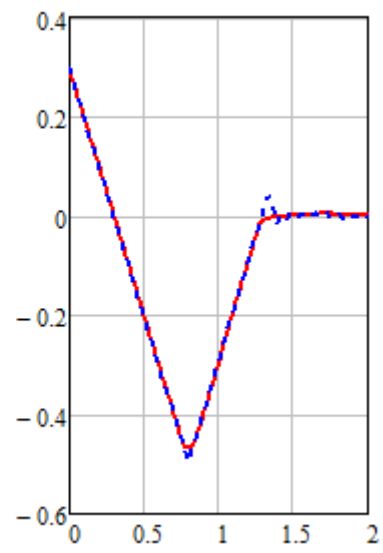
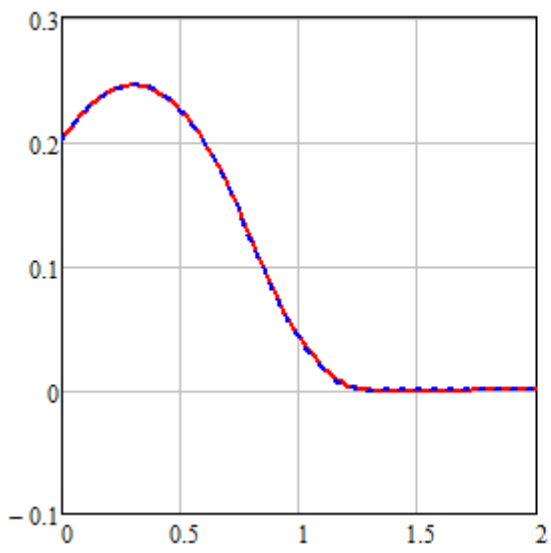
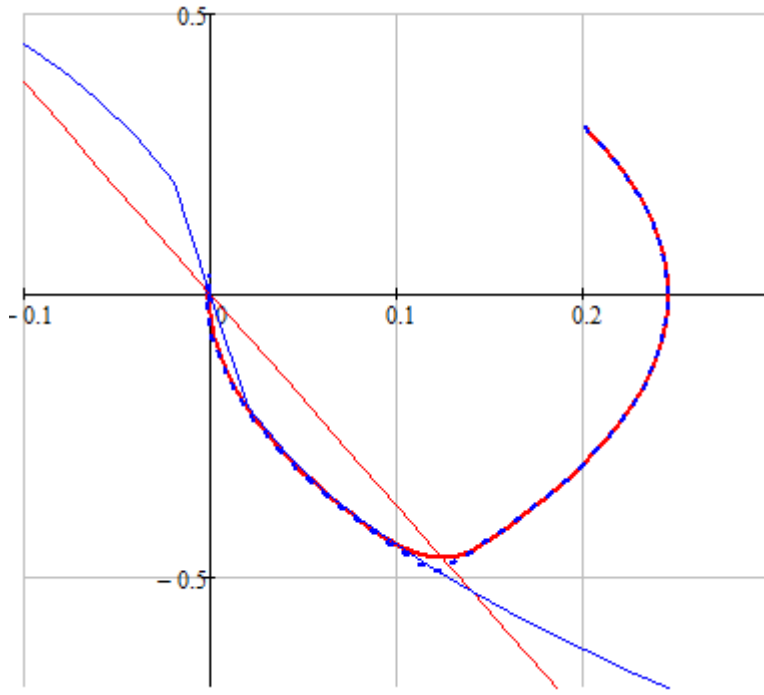
$$J_{\text{speed}}(Z_{\text{full1}}) = 0.100104$$

$$J_{\text{speed}}(Z_{\text{pon1}}) = 0.091904$$

$$\frac{J_{\text{time}}(Z_{\text{cont1}}) - J_{\text{time}}(Z_{\text{pon1}})}{J_{\text{time}}(Z_{\text{pon1}})} \cdot 100 = 0$$

$$\frac{J(Z_{\text{cont1}}) - J(Z_{\text{pon1}})}{J(Z_{\text{pon1}})} \cdot 100 = 0.113$$

$$\frac{J_{\text{speed}}(Z_{\text{cont1}}) - J_{\text{speed}}(Z_{\text{pon1}})}{J_{\text{speed}}(Z_{\text{pon1}})} \cdot 100 = -1.474$$



$$Z_{U.cont1_i} := U_{cont}(x(Z_{cont1})^{\hat{\psi}})$$

$$Z_{U.full1_i} := U_{full}(x(Z_{full1})^{\hat{\psi}})$$

$$Z_{U.pon1_i} := U_{pon}(x(Z_{pon1})^{\hat{\psi}})$$

$$Z_{U.pon1} := \text{for } i \in \frac{J_{time}(Z_{pon1})}{\Delta t} .. \text{rows}(Z_{U.pon1})$$

$$Z_{U.pon1_i} \leftarrow 0$$

$$Z_{U.full1} := \text{for } i \in \frac{J_{time}(Z_{full1})}{\Delta t} .. \text{rows}(Z_{U.full1})$$

$$Z_{U.full1_i} \leftarrow 0$$

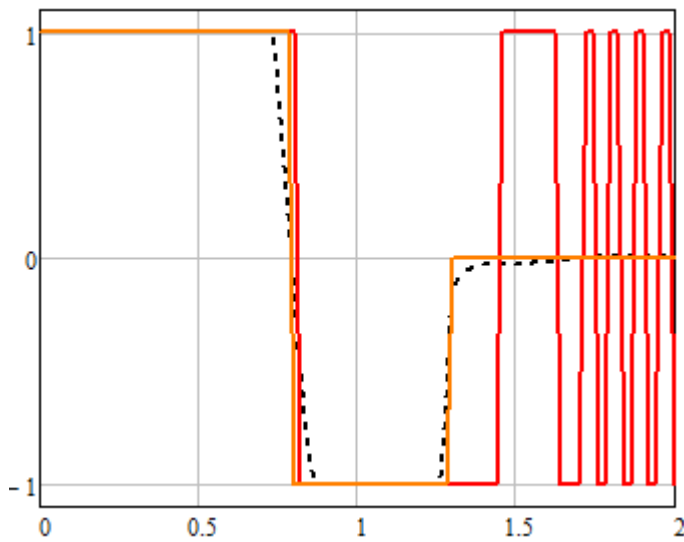
+

Затраты на управление

$$J_u(Z_{U.cont1}) = 62.674$$

$$J_u(Z_{U.pon1}) = 65$$

$$J_u(Z_{U.full1}) = 79$$



**А3 Программа обработки экспериментальных данных изменения состояния
нелинейного объекта управления типа «квадрокоптер» под действием
системы управления**

Агапов А. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022612590 от 28.02.2022 Российская Федерация. Программа обработки экспериментальных данных изменения состояния нелинейного объекта управления типа «квадрокоптер» под действием системы управления: № 2022612063/69: заявл. 17.02.2022 / А.А. Агапов / А. А. Агапов. – 2022. Язык программирования: С#.

```
using System.IO;
using System.Text.RegularExpressions;
using System.Linq;

Console.WriteLine("Программа запущена. Читаем файлы...");
// Создаем директории, если их нет
if (!Directory.Exists("output_files")) { Directory.CreateDirectory("output_files"); }
if (!Directory.Exists("input_files")) { Directory.CreateDirectory("input_files"); }
// Берем все файлы в директории
string[] files = Directory.GetFiles("input_files");
// Если файлов нет, заканчиваем работу
if (files.Length < 1)
{
    Console.WriteLine("В папке \"input_files\" не найдено файлов.");
    Console.ReadKey();
    System.Environment.Exit(1);
}
// Обрабатываем каждый файл
foreach (string file in files)
{
    string fileName = Path.GetFileNameWithoutExtension(file);
    Console.WriteLine();
    Console.WriteLine("Обрабатывается файл " + fileName + "...");
    // Считываем входные данные
    string text = File.ReadAllText(file);
    Console.WriteLine("Файл " + fileName + " прочитан. Производим первичную
обработку...");
    // Производим первичную обработку
    text = FirstClean(text);
}
```

```

    Console.WriteLine("Первичная обработка " + fileName + " завершена. Выводим
результат в файл...");
    // Пишем в файл
    File.WriteAllText("output_files\\" + fileName + ".txt", text);
    Console.WriteLine("Результат записан в файл " + fileName + ".txt");
}
Console.WriteLine();
Console.WriteLine("Успешно. Нажмите любую клавишу, чтобы закрыть.");
Console.ReadKey();

/// <summary>
/// Первичная очистка данных от служебной информации,
/// правильной строкой считается строка с 9 словами (числами)
/// </summary>
static string FirstClean(string text)
{
    // Убираем начало, которое заканчивается словом "ОК"
    text = RemoveSubstring(text, "", "\nОК", 4);
    // Убираем все сообщения о критическом угле
    int count = Regex.Matches(text, "Critical").Count;
    for (int i = 0; i < count; i++) text = RemoveSubstring(text, "Critical", "battery U",
15);
    // Убираем конец документа
    text = RemoveSubstring(text, "Print OFF", "", 0);
    // Убираем пустые строки
    text = Regex.Replace(text, @"^\s*$[\r\n]*", string.Empty, RegexOptions.Multiline);
    // Убираем последний перенос строки
    text = text.Remove(text.LastIndexOf("\n"));
    // Разделяем текст по строкам для их обработки
    string[] lines = Regex.Split(text, "\r\n");
    // Обнуляем текст, потом в него перенесем обработанные строки
    text = "";
    // Для цикла метка, что предыдущая строка валидная
    bool beforeIsGood = false;
    // Проходим по всем строкам сначала в прямом, потом в обратном направлении
    // до тех пор, пока не останется неисправленных строк.
    // Невалидные строки исправляются по предыдущим и в новой итерации уже
    // считаются валидными
    while (true)
    {
        // Метка, что среди строк есть неисправленная строка
        bool isBad = false;
        // Проходим по строкам в прямом направлении
        for (int i = 0; lines.Length > i; i++)
        {

```

```

// Если строка невалидная
if (CountWords(lines[i]) != 9)
{
    lines[i] = "";
    // Если предыдущая строка валидная присваиваем текущей значение
    предыдущей
    if (beforeIsGood) { lines[i] = lines[i - 1]; }
    // Если предыдущая невалидная, то отмечаем, что текущая
    неисправленная
    else { isBad = true; }
    // Отмечаем, что текущая строка невалидная
    beforeIsGood = false;
}
// Если текущая строка валидная, отмечаем это
else { beforeIsGood = true; }
}
// Если за прямой проход неисправленных строк не обнаружено, заканчиваем
if (!isBad) { break; }
// Проходим в обратном направлении, повторяя то, что делали при проходе в
прямом
for (int i = 1; lines.Length > i; i++)
{
    if (CountWords(lines[lines.Length - i]) != 9)
    {
        lines[lines.Length - i] = "";
        if (beforeIsGood) { lines[lines.Length - i] = lines[lines.Length - i + 1]; }
        else { isBad = true; }
        beforeIsGood = false;
    }
    else { beforeIsGood = true; }
}
// Если за обратный проход неисправленных строк не обнаружено,
заканчиваем
if (!isBad) { break; }
}
// Собираем все строки в текст
foreach (string line in lines) text = text + line + "\n";
// Убираем последний перенос строки (снова)
text = text.Remove(text.LastIndexOf("\n"));
// Возвращаем результат обработки
return text;
}

/// <summary>
/// Удаляет подстроку из text, от startString по endString плюс addLength символов

```

```

/// </summary>
static string RemoveSubstring(string text, string startString, string endString, int
addLength)
{
    string output;
    int indexStart = text.IndexOf(startString);
    int indexEnd = text.IndexOf(endString, indexStart + startString.Length);
    if (indexStart != -1 & indexEnd != -1) output = text.Remove(indexStart, indexEnd +
endString.Length - indexStart + addLength);
    else output = text;
    return output;
}

```

```

/// <summary>
/// Возвращает количество слов (через пробелы) в тексте
/// </summary>
static int CountWords(string text)
{
    string pattern = "\\s+";
    string input = text;
    string[] words = null;
    int i = 0;
    int count = 0;
    words = Regex.Split(input, pattern, RegexOptions.IgnoreCase);
    for (i = words.GetLowerBound(0); i <= words.GetUpperBound(0); i++)
    {
        if (words[i].ToString() == string.Empty)
            count = count - 1;
        count = count + 1;
    }
    return count;
}

```

A4 Программа моделирования системы типа двойной маятник

Исходные данные для моделирования:

Начало интервала:

$$t_1 := 0$$

Конец интервала:

$$t_2 := 10$$

Шаг дискретизации:

$$\Delta t := 0.001$$

Количество шагов дискретизации:

$$n := \frac{t_2 - t_1}{\Delta t} = 1 \times 10^4$$

Шаги итерации:

$$i := 0..n$$

$$\underline{g} := 9.8$$

$$\underline{L} := 1$$

потенциальные силы

$$Q_{\text{pot1}}(q1) := 2 \cdot g \cdot \cos(q1)$$

$$Q_{\text{pot2}}(q2) := g \cdot \cos(q2)$$

$$Q_{\text{pot1}}(0.3) = 18.725$$

Начальные условия:

перемещение
скорость

$$X0 := \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ограничение по управлению:

$$U_{\text{max}} := 0.5$$

Ограничивающая функция:

$$\text{sat}(x) := \begin{cases} \text{value} \leftarrow U_{\text{max}} \cdot \text{sign}(x) & \text{if } U_{\text{max}} < |x| \\ x & \text{otherwise} \end{cases}$$

Черноусько

$$\rho_0 := 0.5 \quad \rho_1 := 0.5$$

Пятницкий

$$k_{\text{pyat.1}} := 0.3$$

$$U_{\text{pyat1}}(t, x) := -U_{\text{max}} \cdot \text{sign}(x_0 + k_{\text{pyat.1}} \cdot x_1)$$

$$U_{\text{pyat2}}(t, x) := -U_{\text{max}} \cdot \text{sign}(x_2 + k_{\text{pyat.1}} \cdot x_3)$$

$$U_{\text{cher1}}(t, x) := -U_{\text{max}} \cdot \text{sign} \left[x_0 + \frac{x_1 \cdot |x_1|}{2 \cdot (1 - \rho_0)} \right]$$

$$U_{\text{cher2}}(t, x) := -U_{\text{max}} \cdot \text{sign} \left[x_2 + \frac{x_3 \cdot |x_3|}{2 \cdot (1 - \rho_1)} \right]$$

Метод Рунге-Кутты 4 порядка для решения систем ДУ:

- X0 - вектор начальных состояний
- t0 - начальное значение интервала времени
- tk - конечное значение интервала времени
- n - количество шагов на интервале времени
- F - вектор F(t, x) функций, полученных из системы ДУ

```

runge_kutta(X0, t0, tk, n, F, U1, U2) :=
  h ← (tk - t0) / n
  X0 ← X0
  row ← rows(X0)
  t0 ← t0
  for i ∈ 0..n - 1
    t_{i+1} ← t_i + h
    k1 ← F(t_i, X_i)
    k2 ← F(t_i + h/2, X_i + h/2 * k1)
    k3 ← F(t_i + h/2, X_i + h/2 * k2)
    k4 ← F(t_i + h, X_i + h * k3)
    X_{i+1} ← X_i + h * (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4) / 6
    Z_{i,0} ← t0 + i * h
    Z_{i,row+1} ← U1(t_i, X_i)
    Z_{i,row+2} ← U2(t_i, X_i)
    for j ∈ 1..row
      M ← X_i
      Z_{i,j} ← M_{j-1}
  Z

```

Целевые функционалы:

стремимся к минимуму

Получение вектора состояний на каждую итерацию:

$$x(Z) := \text{for } i \in 0..n \quad \begin{cases} x_{0,i} \leftarrow Z_{i,1} \\ x_{1,i} \leftarrow Z_{i,2} \end{cases}$$

Функционал по перемещению:

$$J_{\text{w}}(x) := \sum_{i=0}^{n-1} \left[(x_{i,1})^2 \cdot \Delta t + (x_{i,3})^2 \cdot \Delta t \right]$$

Функционал по времени достижения цели:

цель - одна десятая радиана

$$J_{\text{time}}(Z) := \text{for } i \in 0.. \text{rows}(Z^{(1)}) - 1 \quad \begin{cases} \text{if } |Z_{i,1}| \leq 0.001 \wedge |Z_{i,2}| \leq 0.001 \wedge |Z_{i,3}| \leq 0.001 \wedge |Z_{i,4}| \leq 0.001 \\ \quad \begin{cases} J_{\text{time}} \leftarrow i \cdot \Delta t \\ \text{break} \end{cases} \\ J_{\text{time}} \leftarrow \text{"null"} \quad \text{otherwise} \end{cases}$$

Функционал по затратам на управление

$$J_{\text{u}}(Z) := \sum_{i=0}^{\text{rows}(Z^{(0)})-1} |Z_{i,3}|$$

Функционал по скорости:

$$J_{\text{v}}(x) := \sum_{i=0}^{n-1} \left[(x_{i,2})^2 \cdot \Delta t \right]$$

Формальский

$$\gamma := 5$$

$$U_{\text{form1}}(t, x) := -\text{sat}[\gamma \cdot (x_0 + x_1)]$$

$$U_{\text{form2}}(t, x) := -\text{sat}[\gamma \cdot (x_2 + x_3)]$$

Управления ОПМ

1. Непрерывный

$$U_{\text{cmp.sat1}}(t, x, k) := -\text{sat} \left[k_0 \cdot \left(x_0 + k_1 \cdot \frac{|x_1| \cdot x_1}{|x_0| + k_2} \right) \right]$$

2. Релейный

$$U_{\text{cmp.sign1}}(t, x, k) := -U_{\text{max}} \cdot \text{sign} \left[k_0 \cdot \left(x_0 + k_1 \cdot \frac{|x_1| \cdot x_1}{|x_0| + k_2} \right) \right]$$

3. Многорежимный

$$U_{\text{cmp.mm1}}(t, x, \Omega, k_1, k_2) := \begin{cases} U_{\text{cmp.sat1}}(t, x, k_1) & \text{if } |x_0| \leq \Omega_0 \wedge |x_1| \leq \Omega_1 \\ U_{\text{cmp.sign1}}(t, x, k_2) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Управления ОПМ

1. Непрерывный

$$U_{\text{cmp.sat2}}(t, x, k) := -\text{sat} \left[k_0 \cdot \left(x_2 + k_1 \cdot \frac{|x_3| \cdot x_3}{|x_2| + k_2} \right) \right]$$

2. Релейный

$$U_{\text{cmp.sign2}}(t, x, k) := -U_{\text{max}} \cdot \text{sign} \left[k_0 \cdot \left(x_2 + k_1 \cdot \frac{|x_3| \cdot x_3}{|x_2| + k_2} \right) \right]$$

3. Многорежимный

$$U_{\text{cmp.mm2}}(t, x, \Omega, k_1, k_2) := \begin{cases} U_{\text{cmp.sat2}}(t, x, k_1) & \text{if } |x_2| \leq \Omega_0 \wedge |x_3| \leq \Omega_1 \\ U_{\text{cmp.sign2}}(t, x, k_2) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{31} := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \cdot \sqrt{r_1 \cdot \lambda^{-1}} \end{pmatrix} \quad k_{32} := \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{2} \\ 1 \cdot \sqrt{r_2 \cdot \lambda^{-1}} \end{pmatrix}$$

Параметры на основе моделирования

$$U_{\text{cmp31}}(t, x) := U_{\text{cmp.sign1}}(t, x, k_{31})$$

$$U_{\text{cmp32}}(t, x) := U_{\text{cmp.sign2}}(t, x, k_{32})$$

$$F_{\text{pyat}}(t, x) := \begin{bmatrix} x_1 \\ \frac{g}{L}(x_2 - 2 \cdot x_0) + U_{\text{pyat1}}(t, x) \\ x_3 \\ 2 \cdot \frac{g}{L} \cdot (x_0 - x_2) + U_{\text{pyat2}}(t, x) \end{bmatrix}$$

$$Z_{\text{pyat}} := \text{runge_kutta}(X0, t_1, t_2, n, F_{\text{pyat}}, U_{\text{pyat1}}, U_{\text{pyat2}})$$

$$F_{\text{cher}}(t, x) := \begin{bmatrix} x_1 \\ \frac{g}{L}(x_2 - 2 \cdot x_0) + U_{\text{cher1}}(t, x) \\ x_3 \\ 2 \cdot \frac{g}{L} \cdot (x_0 - x_2) + U_{\text{cher2}}(t, x) \end{bmatrix}$$

$$Z_{\text{cher}} := \text{runge_kutta}(X0, t_1, t_2, n, F_{\text{cher}}, U_{\text{cher1}}, U_{\text{cher2}})$$

$$F_{\text{form}}(t, x) := \begin{bmatrix} x_1 \\ \frac{g}{L}(x_2 - 2 \cdot x_0) + U_{\text{form1}}(t, x) \\ x_3 \\ 2 \cdot \frac{g}{L} \cdot (x_0 - x_2) + U_{\text{form2}}(t, x) \end{bmatrix}$$

$$Z_{\text{form}} := \text{runge_kutta}(X0, t_1, t_2, n, F_{\text{form}}, U_{\text{form1}}, U_{\text{form2}})$$

Показатели по времени достижения цели:

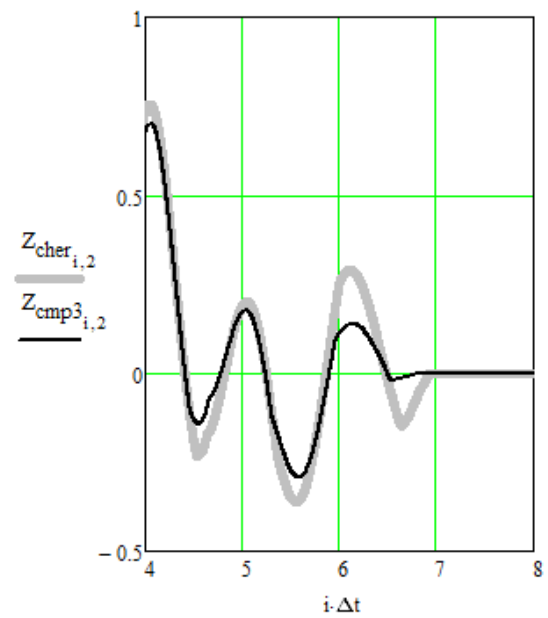
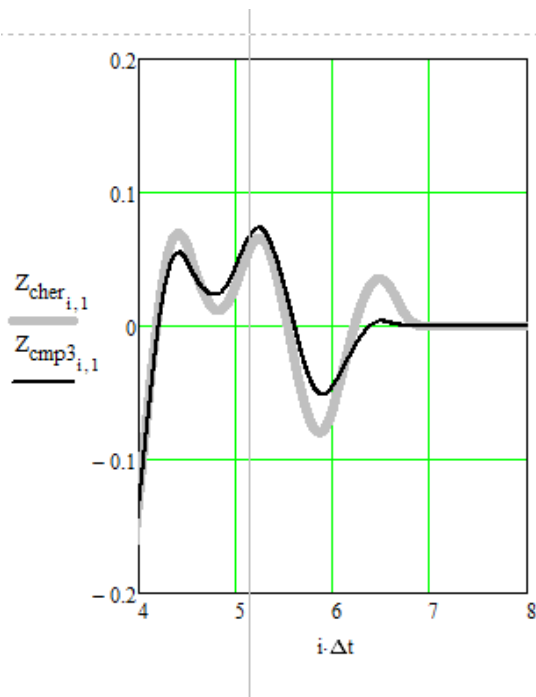
$$J_{\text{time}}(Z_{\text{pyat}}) = 8.785$$

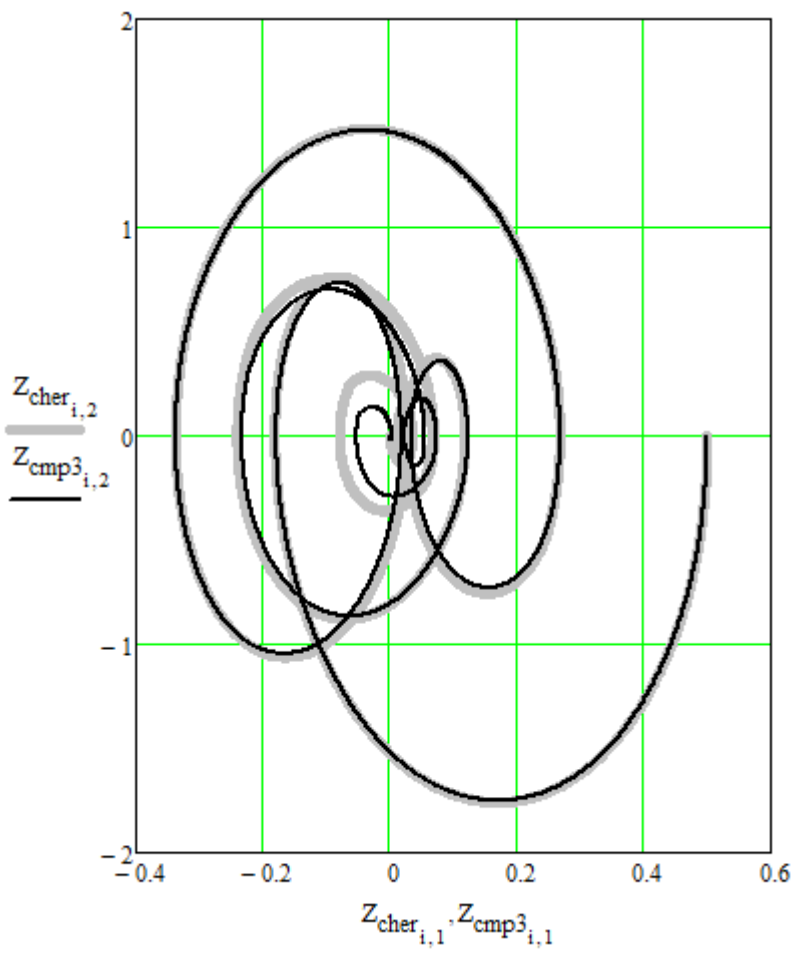
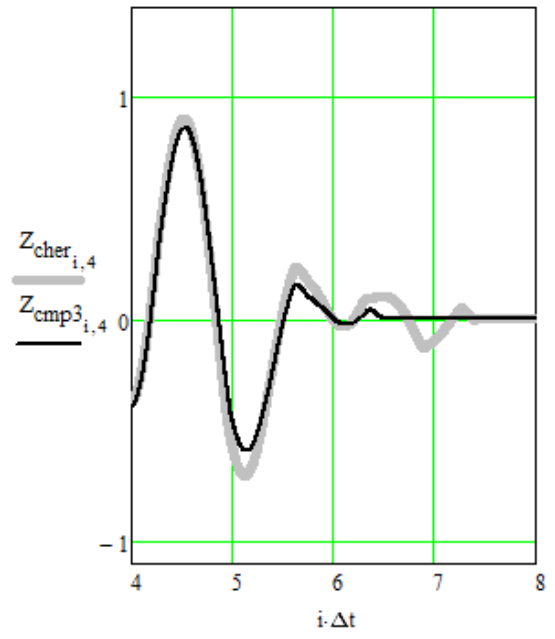
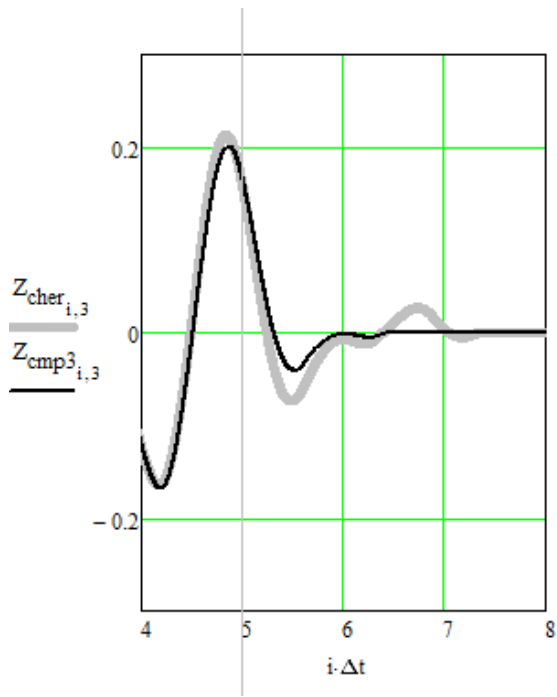
$$J_{\text{time}}(Z_{\text{cher}}) = 7.372$$

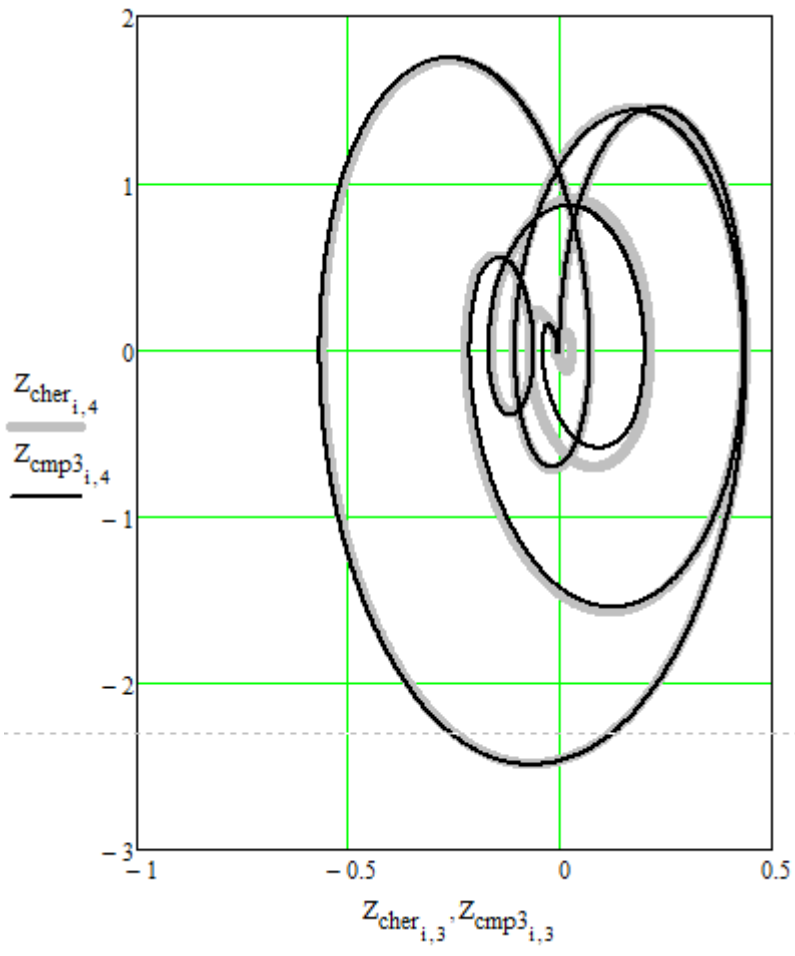
$$J_{\text{time}}(Z_{\text{form}}) = 7.512$$

$$J_{\text{time}}(Z_{\text{cmp3}}) = 6.824$$

$$\frac{J_{\text{time}}(Z_{\text{cher}}) - J_{\text{time}}(Z_{\text{cmp3}})}{J_{\text{time}}(Z_{\text{cher}})} \cdot 100 = 7.434$$







A5 Программа моделирования системы типа маятник на тележке

Параметры модели:

Масса тележки (кг):

$$m_c := 1$$

Масса маятника (кг):

$$m_p := 0.1$$

Ускорение свободного падения (м/с²):

$$g := 9.807$$

Расстояние от центра масс маятника до оси подвеса (м):

$$l_p := 0.6315$$

Момент инерции маятника:

$$I_p := \frac{m_p \cdot l_p^2}{3}$$

Приведенная (эффективная) длина маятника:

$$L := \frac{I_p + m_p \cdot l_p^2}{m_p \cdot l_p}$$

$$L = 0.842$$

Коэффициент трения:

$$\mu := 1$$

Сила, приложенная к тележке (Н):

$$F_e := 0$$

Метод Рунге-Кутты 4 порядка для решения систем ДУ:

- X0 - вектор начальных состояний
- t0 - начальное значение интервала времени
- tk - конечное значение интервала времени
- n - количество шагов на интервале времени
- F - вектор F(t, x) функций, полученных из системы ДУ

```

runge_kutta(X0, t0, tk, n, F, U1, U2) :=
  h ← (tk - t0) / n
  X0 ← X0
  row ← rows(X0)
  t0 ← t0
  for i ∈ 0..n - 1
    ti+1 ← ti + h
    k1 ← F(ti, Xi)
    k2 ← F(ti + h/2, Xi + h*k1/2)
    k3 ← F(ti + h/2, Xi + h*k2/2)
    k4 ← F(ti + h, Xi + h*k3)
    Xi+1 ← Xi + h * (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4) / 6
  -----
  Zi,0 ← t0 + i*h
  Zi,row+1 ← U1(ti, Xi)
  Zi,row+2 ← U2(ti, Xi)
  for j ∈ 1..row
    Mi ← Xi
    Zi,j ← Mi,j-1
  Z
  
```

Моделирование:

- t0 := 0 - начальное время (с)
- tk := 15 - конечное время (с)
- Δt := 0.001 - шаг дискретизации времени (с)
- n := $\frac{tk - t0}{\Delta t}$ - количество шагов на интервале времени

Создадим вектор шагов вычислений (для графика):

i := 0..n - 1

Целевой функционал:*стремимся к минимуму*

Получение вектора состояний на каждую итерацию:

 $x(Z) := \text{for } i \in 0..n$

$$\begin{cases} x_{0,i} \leftarrow Z_{i,1} \\ x_{1,i} \leftarrow Z_{i,2} \\ x_{2,i} \leftarrow Z_{i,3} \\ x_{3,i} \leftarrow Z_{i,4} \end{cases}$$

 $\phi(Z) := \text{for } i \in 0..\text{rows}(Z^{(3)}) - 1$

$$\phi_i \leftarrow \text{asin}\left(\frac{Z_{i,3} - Z_{i,1}}{l_p}\right)$$

Функционал по перемещению:

$$J_{\text{time}}(x) := \sum_{i=0}^n \left[(x_{i,1})^2 \cdot \Delta t \right] + (x_{i,3})^2 \cdot \Delta t$$

 $d\phi(Z) := \text{for } i \in 0..\text{rows}(Z^{(2)}) - 1$

$$\phi_i \leftarrow \text{asin}\left(\frac{Z_{i,2} - Z_{i,0}}{l_p}\right)$$

Функционал по времени достижения цели:

 $J_{\text{time}}(Z) := \text{for } i \in 0..\text{rows}(Z^{(3)}) - 1$

$$\begin{cases} \text{if } |Z_{i,3}| \leq 0.01 \wedge |Z_{i,4}| \leq 0.01 \wedge |Z_{i,1}| \leq 0.01 \wedge |Z_{i,2}| \leq 0.01 \\ \quad \left| \begin{array}{l} J_{\text{time}} \leftarrow i \cdot \Delta t \\ \text{break} \end{array} \right. \\ J_{\text{time}} \leftarrow \text{"null"} \text{ otherwise} \end{cases}$$

Начальные условия:*Перемещение тележки s* *Скорость тележки**Угол маятника ϕ* *Скорость изменения угла маятника*

$$X_0 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.15 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Управление Пятницкого

$$U_{\text{pyat}}(t, x) := U_{\text{max}} \cdot \text{sign}(1 \cdot x_0 + x_1 + 1 \cdot x_2 + x_3)$$

Ограничение управления

$$U_{\max} := 10$$

$$\text{sat}(u) := \begin{cases} U_{\max} & \text{if } u > U_{\max} \\ -U_{\max} & \text{if } u < -U_{\max} \\ u & \text{otherwise} \end{cases}$$

Квакернаак (с. 227) пересчитанный в этот вектор состояний

$$U_{\text{kvak}}(t, x) := \text{sat}(6.95 \cdot x_0 + 10.27 \cdot x_1 + 61.1292 \cdot x_2 + 17.9 \cdot x_3)$$

$$\alpha 1 := \begin{pmatrix} 2.5 \\ 4 \\ 0.1 \end{pmatrix} \quad \lambda := -1 \quad \alpha 2 := \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\Psi 1(x, t) := \alpha 1_0 \cdot \left(x_0 + \alpha 1_1 \cdot \frac{|x_1| \cdot x_1}{|x_0| + \alpha 1_2} \right) \quad \Psi 2(x, t) := \alpha 2_0 \cdot \left(x_2 + \alpha 2_1 \cdot \frac{|x_3| \cdot x_3}{|x_2| + \alpha 2_2} \right)$$

$$U_{\text{cmp}}(t, x) := \text{sat} \left[\lambda^{-1} \cdot \Psi 1(x, t) \cdot \frac{\cos(x_2)}{(m_p \cdot \sin(x_2))^2 + m_c} + \lambda^{-1} \cdot \Psi 2(x, t) \cdot \left[\frac{1}{(m_p \cdot \sin(x_2))^2 + m_c} \cdot \frac{m_p + m_c}{m_p \cdot L^2} \right] \right]$$

$$F_{\text{kvak.lin}}(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ U_{\text{kvak}}(t, x) - \frac{\mu}{m_c} \cdot x_1 \\ x_3 \\ \frac{g}{L} \cdot x_2 - \frac{1}{L} \cdot U_{\text{kvak}}(t, x) \end{pmatrix} \quad F_{\text{pyat.lin}}(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ U_{\text{pyat}}(t, x) \\ x_3 \\ \frac{g}{L} \cdot x_2 - \frac{1}{L} \cdot U_{\text{pyat}}(t, x) \end{pmatrix} \quad F_{\text{cmp.lin}}(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ U_{\text{cmp}}(t, x) \\ x_3 \\ \frac{g}{L} \cdot x_2 - \frac{1}{L} \cdot U_{\text{cmp}}(t, x) \end{pmatrix}$$

Линейная модель Квакернаака учитывает трение тележки об опору и рассчитано с этим учетом, поэтому добавим этот элемент в его управляющее воздействие

$$F_{kvak}(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ U_{kvak}(t, x) - \frac{\mu}{m_c} \cdot x_1 \\ x_3 \\ \frac{g}{L} \cdot \sin(x_2) - \frac{1}{L} \cdot \cos(x_2) \cdot U_{kvak}(t, x) \end{pmatrix} +$$

$$F_{cmp}(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ U_{cmp}(t, x) \\ x_3 \\ \frac{g}{L} \cdot \sin(x_2) - \frac{1}{L} \cdot \cos(x_2) \cdot U_{cmp}(t, x) \end{pmatrix} \quad F_{pyat}(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ U_{pyat}(t, x) \\ x_3 \\ \frac{g}{L} \cdot \sin(x_2) - \frac{1}{L} \cdot \cos(x_2) \cdot U_{pyat}(t, x) \end{pmatrix}$$

Линейная модель Квакернаака учитывает трение тележки об опору и рассчитано с этим учетом, поэтому добавим этот элемент в его управляющее воздействие

$$Q_3(t, x) := U_{kvak}(t, x) - \frac{\mu}{m_c} \cdot x_1 \quad Q_{\phi}(t, x) := 0$$

$$F_{kvak.full}(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ \left[\frac{1}{m_p + m_c} + \frac{m_p \cdot L \cdot \cos(x_2)^2}{(m_p + m_c)(m_p \cdot \sin(x_2)^2 + m_c)} \right] Q_3(t, x) - \frac{m_p \cdot L \cdot \cos(x_2) \cdot g \cdot \sin(x_2)}{(m_p + m_c)(m_p \cdot \sin(x_2)^2 + m_c)} + \left[\frac{m_p^2 \cdot L \cdot \cos(x_2)^2 \cdot \sin(x_2)}{(m_p + m_c)(m_p \cdot \sin(x_2)^2 + m_c)} + \frac{m_p \cdot L \cdot \sin(x_2)}{m_p + m_c} \right] (x_3)^2 - \frac{m_p \cdot L \cdot \cos(x_2)}{m_p \cdot \sin(x_2)^2 + m_c} \cdot Q_{\phi}(t, x) \\ x_3 \\ \frac{1}{(m_p \cdot \sin(x_2)^2 + m_c)} \left[g \cdot \sin(x_2) - \cos(x_2) \right] Q_3(t, x) - m_p \cdot \cos(x_2) \cdot \sin(x_2) \cdot (x_3)^2 + \frac{m_p + m_c}{m_p \cdot L^2} \cdot Q_{\phi}(t, x) \end{pmatrix}$$

Управление происходит только через воздействие на тележку, непосредственно наклон маятника не регулируем.

$$Q_{s1}(t, x) := U_{cmp}(t, x) \quad Q_{\phi1}(t, x) := 0$$

$$F_{cmp.full}(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ \left[\frac{1}{m_p + m_c} + \frac{m_p \cdot L \cdot \cos(x_2)^2}{(m_p + m_c)(m_p \cdot \sin(x_2)^2 + m_c)} \right] Q_{s1}(t, x) - \frac{m_p \cdot L \cdot \cos(x_2) \cdot g \cdot \sin(x_2)}{(m_p + m_c)(m_p \cdot \sin(x_2)^2 + m_c)} + \left[\frac{m_p^2 \cdot L \cdot \cos(x_2)^2 \cdot \sin(x_2)}{(m_p + m_c)(m_p \cdot \sin(x_2)^2 + m_c)} + \frac{m_p \cdot L \cdot \sin(x_2)}{m_p + m_c} \right] (x_3)^2 - \frac{m_p \cdot L \cdot \cos(x_2)}{m_p \cdot \sin(x_2)^2 + m_c} \cdot Q_{\phi1}(t, x) \\ x_3 \\ \frac{1}{(m_p \cdot \sin(x_2)^2 + m_c)} \left[g \cdot \sin(x_2) - \cos(x_2) \right] Q_{s1}(t, x) - m_p \cdot \cos(x_2) \cdot \sin(x_2) \cdot (x_3)^2 + \frac{m_p + m_c}{m_p \cdot L^2} \cdot Q_{\phi1}(t, x) \cdot 0 \end{pmatrix}$$

$$Q_{s2}(t, x) := U_{pyat}(t, x) \quad Q_{\phi2}(t, x) := 0$$

$$F_{pyat.full}(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ \left[\frac{1}{m_p + m_c} + \frac{m_p \cdot L \cdot \cos(x_2)^2}{(m_p + m_c)(m_p \cdot \sin(x_2)^2 + m_c)} \right] Q_{s2}(t, x) - \frac{m_p \cdot L \cdot \cos(x_2) \cdot g \cdot \sin(x_2)}{(m_p + m_c)(m_p \cdot \sin(x_2)^2 + m_c)} + \left[\frac{m_p^2 \cdot L \cdot \cos(x_2)^2 \cdot \sin(x_2)}{(m_p + m_c)(m_p \cdot \sin(x_2)^2 + m_c)} + \frac{m_p \cdot L \cdot \sin(x_2)}{m_p + m_c} \right] (x_3)^2 - \frac{m_p \cdot L \cdot \cos(x_2)}{m_p \cdot \sin(x_2)^2 + m_c} \cdot Q_{\phi2}(t, x) \\ x_3 \\ \frac{1}{(m_p \cdot \sin(x_2)^2 + m_c)} \left[g \cdot \sin(x_2) - \cos(x_2) \right] Q_{s2}(t, x) - m_p \cdot \cos(x_2) \cdot \sin(x_2) \cdot (x_3)^2 + \frac{m_p + m_c}{m_p \cdot L^2} \cdot Q_{\phi2}(t, x) \cdot 0 \end{pmatrix} +$$

$$Z_{\text{kvak.lin}} := \text{rkfixed}(X0, t0, tk, n, F_{\text{kvak.lin}}) \quad Z_{\text{cmp.lin}} := \text{rkfixed}(X0, t0, tk, n, F_{\text{cmp.lin}})$$

$$Z_{\text{kvak}} := \text{rkfixed}(X0, t0, tk, n, F_{\text{kvak}}) \quad Z_{\text{cmp}} := \text{rkfixed}(X0, t0, tk, n, F_{\text{cmp}})$$

$$Z_{\text{kvak.full}} := \text{runge_kutta}(X0, t0, tk, n, F_{\text{kvak.full}}, U_{\text{kvak}}, U_{\text{kvak}})$$

$$Z_{\text{pyat.lin}} := \text{rkfixed}(X0, t0, tk, n, F_{\text{pyat.lin}})$$

$$Z_{\text{pyat}} := \text{rkfixed}(X0, t0, tk, n, F_{\text{pyat}})$$

$$Z_{\text{cmp.full}} := \text{runge_kutta}(X0, t0, tk, n, F_{\text{cmp.full}}, U_{\text{cmp}}, U_{\text{cmp}})$$

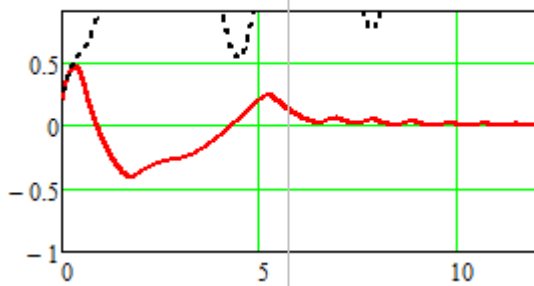
$$Z_{\text{pyat.full}} := \text{runge_kutta}(X0, t0, tk, n, F_{\text{pyat.full}}, U_{\text{pyat}}, U_{\text{pyat}})$$

$$J_{\text{time}}(Z_{\text{cmp.full}}) = 11.024 \quad J(Z_{\text{cmp}}) = 75.033 \quad J_{\text{time}}(Z_{\text{cmp}}) = 10.263$$

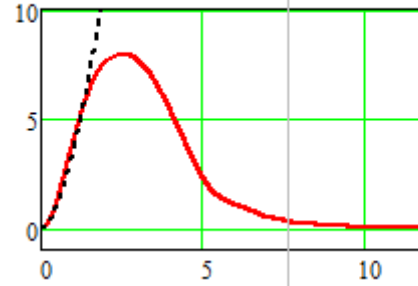
$$J_{\text{time}}(Z_{\text{kvak.full}}) = \text{"null"} \quad J(Z_{\text{kvak}}) = 8.498 \times 10^4 \quad J_{\text{time}}(Z_{\text{kvak}}) = \text{"null"}$$

$$J_{\text{time}}(Z_{\text{pyat.full}}) = \text{"null"} \quad J(Z_{\text{pyat}}) = 3.798 \times 10^6 \quad J_{\text{time}}(Z_{\text{pyat}}) = \text{"null"}$$

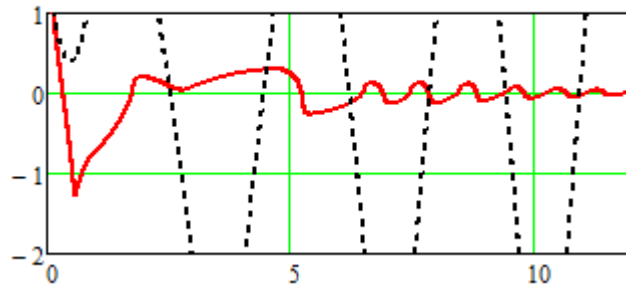
Угол маятника



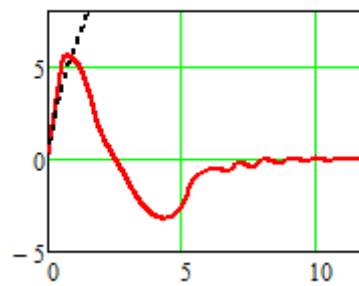
Перемещение тележки



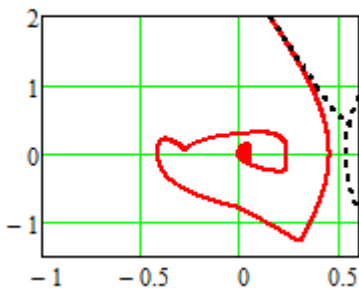
Скорость изменения угла маятника



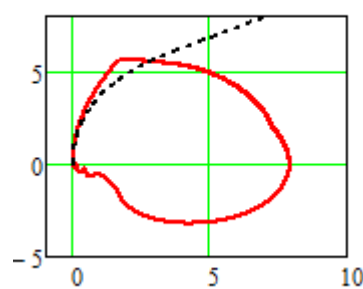
Скорость тележки



Фазовая маятника



Фазовая тележки



А6 Программа моделирования интеллектуального алгоритма управления динамической системой

```

%% Начальные условия
%
global q0;
% Время начала процесса
t0 = 0;
% Время окончания процесса
global tk h;
tk = 2;
% Шаг дискретизации
h = 0.001;
% Количество отсчетов
n = (tk-t0)/h;
%
global Umax rho eps fis;
Umax = 5;
rho = 0.76;
eps = 0.001;

fis = readfis('fis_CMP_alpha');

%% Расчет систем под управлениями
q0 = [1; 0.7];
% Управление 1
z1 = runge_kutta_4_order(q0, t0, tk, n, @model, @control_sat1);
%find_J_time(z1)
J1 = find_J_time(z1);
% Управление ОПМ
z_cmp = runge_kutta_4_order(q0, t0, tk, n, @model, @control_cmp_int);
z2 = z_cmp;
%find_J_time(z_cmp)
J2 = find_J_time(z2);
[J1, J2]
[find_J_x(z1), find_J_x(z2)]
[find_J_v(z1), find_J_v(z2)]

%% Графики при разных начальных условиях. Двумерные

%
figure(1)
plot(z1(:,1), z1(:,2))
hold on;
plot(z2(:,1), z2(:,2), '--')
hold off;
title('');
xlabel('$t$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', 14)
ylabel('$x$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', 14)
set(get(gca, 'ylabel'), 'rotation', 0)
legend('A', 'B');

figure(2)
plot(z1(:,1), z1(:,3))

```

```

hold on;
plot(z2(:,1), z2(:,3), '--')
hold off;
title('');
xlabel('$t$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', 14)
ylabel('$\dot{x}$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', 14)
set(get(gca, 'ylabel'), 'rotation', 0)
legend('A', 'B');

figure(3)
plot(z1(:,2), z1(:,3))
hold on;
plot(z2(:,2), z2(:,3), '--')
hold off;
title('');
xlabel('$x$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', 14)
ylabel('$\dot{x}$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', 14)
set(get(gca, 'ylabel'), 'rotation', 0)
legend('A', 'B');

%% Функции

function u = control_cmp_int(x)
% Интеллектуальное управление ОПМ
global Umax rho q0 fis;
k2 = 1 / (2 * Umax * (1 - rho));
%a = membership_func_L(q0(1), -1, 1);
%k3 = a * 0.5 + (1 - a) * 1;
output = evalfis(fis, x(1));
k3 = output;
u = - Umax * sat(x(1) + k2 * x(2) * abs(x(2)) / (abs(x(1)) + k3));
end

function u = control_cmp(x)
% Интеллектуальное управление ОПМ
global Umax rho q0;
k2 = 1 / (2 * Umax * (1 - rho));
a = membership_func_L(q0(1), -1, 1);
k3 = a * 2 + (1 - a) * 1.3;
u = - Umax * sat(x(1) + k2 * x(2) * abs(x(2)) / (abs(x(1)) + k3));
end

function L = membership_func_L(x, a, b)
%
    if x <= a
        L = 1;
    elseif x >= b
        L = 0;
    else
        L = (b - x) / (b - a);
    end
end

function f = model(x, u)
% Из [2]
T_1 = 1.44;
T_2 = 2.53;
f = [x(2);
      ((T_1 + T_2) * x(2) + x(1) + u(x)) / (T_1 * T_2)];
end

```

```

function u = control_opt(x)
% Оптимальное управление
global Umax rho;
k_x = Umax * (1 - rho);
u1 = x(1) + x(2) * abs(x(2)) / (2 * k_x);
if u1 == 0
    u = - Umax * sign(x(1));
else
    u = - Umax * sign(u1);
end
end

function u = control_sat1(x)
% Управление с насыщением из (5.1)
global Umax rho;
k_x = Umax * (1 - rho);
u1 = x(1) + x(2) * abs(x(2)) / (2 * k_x);
u = - Umax * sat(u1);
end

function u = control_sat2(x)
% Управление с насыщением из (5.2)
global Umax rho;
k_x = Umax * (1 - rho);
u2 = - sign(x(1)) * sqrt(2 * k_x * abs(x(1)));
u = - Umax * sat(x(2) * abs(x(2)) - (u2 * abs(u2))) / (2 * k_x);
end

function f = sat(x)
% Функция насыщения из [1]
global Umax eps;
if x > eps
    f = Umax;
elseif x < - eps
    f = - Umax;
else
    f = x / eps;
end
end

function J = find_J_time(z)
% Функционал быстродействия
rows = size(z, 1);
global tk;
J = tk;
for i = 1 : 1 : rows
    if abs(z(i,2)) < 0.001 && abs(z(i,3)) < 0.001
        J = z(i,1);
        break
    end
end
end

function J = find_J_x(z)
% Функционал квадратичный
global h;
rows = size(z, 1);
J = 0;
for i = 1 : 1 : rows
    J = J + z(i,2) * z(i,2) * h;
end

```



```
end
end
```

```
function J = find_J_v(z)
% Функционал квадратичный
global h;
rows = size(z, 1);
J = 0;
for i = 1 : 1 : rows
    J = J + z(i,3) * z(i,3) * h;
end
end
```

```
function z = runge_kutta_4_order(x0, t0, tk, n, f, u)
% Решение дифф. уравнения методом Рунге-Кутта 4 порядка
%
% Функция моделирования системы, состояния которой определяются
% функцией f, которая может включать в себя управление u.
% Основана на методе Рунге-Кутта 4 порядка.
%
% x0 - вектор начальных состояний
% t0 - начальное время
% tk - конечное время
% n - количество шагов времени
% f - функция изменения состояний
% u - функция управления
% На выходе массив:
% первый столбец - время,
% последний - управление,
% между ними - состояния.
h = (tk - t0) / n;
S(:,1)=x0;
rows = size(x0, 1);
for i = 1 : 1 : (n)
    % Запись времени
    z(i,1) = t0 + i * h;
    % Расчет состояния
    k1=f(S(:,i), u);
    k2=f(S(:,i)+h*k1/2, u);
    k3=f(S(:,i)+h*k2/2, u);
    k4=f(S(:,i)+h*k3, u);
    S(:,i+1)=S(:,i)+h*(k1+2*k2+2*k3+k4)/6;
    % Запись состояния
    for j = 1 : 1 : rows
        z(i,j+1)=S(j,i);
    end
    % Запись управления
    z(i,rows+2)=u(S(:,i));
end
end
```

Приложение Б. Акты реализации



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО РГУПС

д.т.н., профессор А.Н. Гуда

« 14 » 09 2023 г.

АКТ

**о внедрении научных результатов кандидатской диссертационной работы
Агапова А.А. «Синтез интеллектуальных алгоритмов управления
транспортными системами с использованием квазиоптимальных законов и
нечеткого логического вывода»**

Настоящим актом подтверждается, что разработанные в диссертационном исследовании Агапова Александра Андреевича интеллектуальные алгоритмы управления, опубликованные в статье «Method for Synthesis of Intelligent Controls Based on Fuzzy Logic and Analysis of Behavior of Dynamic Measures on Switching Hypersurface» (Advances in Intelligent Systems and Computing. – Cham : Springer International Publishing, 2020. – P. 531-540. – DOI: 10.1007/978-3-030-50097-9_54), использованы в НИОКТР «Разработка методов синтеза интеллектуальных алгоритмов управления и оценки состояния нелинейных динамических систем с использованием объединенного принципа максимума» (рег. номер АААА-А18-118010990089-6) в рамках гранта РФФИ № 18-01-00385. Полученные в результате диссертационного исследования решения, опубликованные в статье «Development of a Structurally Fuzzy Regulator Based on the Condition of the Maximum of the Generalized Power Function Under Constraints on Control» (Lecture Notes in Networks and Systems. – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 582-588. – DOI: 10.1007/978-3-030-87178-9_57), использованы в НИОКТР «Синтез интеллектуальных алгоритмов управления на основе построения гиперповерхности переключения с учетом динамических свойств управляемых объектов» (рег. номер АААА-А20-120080490051-6) в рамках гранта на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре («Аспиранты»), РФФИ № 19-31-90134\19.

Заведующий кафедрой «Связь на
железнодорожном транспорте»
д.т.н., проф.

А.А. Костоглов

Декан факультета «Информационные
технологии управления»
к.т.н., доцент

А.М. Лященко

Директор научно-исследовательской
части
к.т.н.

В.Н. Носков

**УТВЕРЖДАЮ:**

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО РГУПС
д.т.н., профессор А.Н. Гуда

« 14 » 09 2023 г.

АКТ**о внедрении научных результатов работы Агапова А.А.**

Разработанная в ходе диссертационного исследования «Синтез интеллектуальных алгоритмов управления транспортными системами с использованием квазиоптимальных законов и нечеткого логического вывода» Агапова А.А. «Программа обработки экспериментальных данных изменения состояния нелинейного объекта управления типа «квадрокоптер» под действием системы управления» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022612590) использована в экспериментальных исследованиях беспилотного летательного аппарата в решении задачи анализа эффективности функционирования алгоритмов управления, результаты которых опубликованы в статье «Анализ и синтез нелинейных многорежимных законов управления с использованием объединенного принципа максимума» (Вестник Ростовского Государственного Университета Путей Сообщения. – 2019. – № 1 (73)), и проведенных в рамках НИР «Разработка элементов беспилотных технологий на базе методов объединенного принципа максимума» по договору о предоставлении гранта ФГБОУ ВО РГУПС от 02 июля 2018 г. № 328.

Руководитель работ по проекту
д.т.н., проф.

А.А. Костоглов

Декан факультета «Информационные
технологии управления»
к.т.н., доцент

А.М. Лященко

Директор научно-исследовательской
части
к.т.н.

В.Н. Носков



УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор
ФГБОУ ВО РГУПС
к.ф.н., доцент М.А. Кравченко

« 18 » 09 2023 г.

АКТ

использования результатов кандидатской диссертации А.А. Агапова «Синтез интеллектуальных алгоритмов управления транспортными системами с использованием квазиоптимальных законов и нечеткого логического вывода» в учебном процессе федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС)

Разработанные в диссертационном исследовании Агапова А.А. алгоритмы управления динамическими системами, опубликованные в статьях «Synthesis of Multimode Regulators Based on the Decomposition of the Control Space Using the Maximum Condition of the Generalized Power Function» (Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 8934058. – DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934058. – EDN WOXFLT.), «Оценка параметров динамических систем на основе объединенного принципа максимума и итерационной регуляризации» (Актуальные проблемы науки и техники. 2017 : Материалы национальной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 15–17 мая 2017 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2017. – С. 386. – EDN IZDKBF), использованы для формирования учебного пособия «Научно-технические задачи в области профессиональной деятельности» (Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. – 108 с. – ISBN 978-5-88814-890-7. – EDN MNBENW) и учебного пособия «Методы аналитической и поисковой оптимизации» (ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д: [б. и.], 2019. – 62 с.), предназначенных для студентов, обучающихся по специальности 25.05.05 «Системы обеспечения движения поездов», а также студентов, магистрантов и аспирантов направления подготовки «Информатика и вычислительная техника», дисциплина «Методы аналитической и поисковой оптимизации».

Декан факультета «Информационные технологии управления»
к.т.н., доцент

А.М. Лященко

Ученый секретарь совета факультета «Информационные технологии управления»
к.ф.-м.н., доцент

А.А. Ячменов

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «Донтехмаш»

И.В. Дерябкин

АКТ

о внедрении научных результатов кандидатской диссертационной
работы Агапова А.А.

Комиссия в составе:

Председатель – генеральный директор АО «Донтехмаш»,
руководитель проекта НИОКР, к.т.н., Дерябкин И.В.

Члены комиссии: – полномочный директор Воробьев А.А.
– руководитель ЦИР э.о.м.ч. пропр
Таран В.Н.


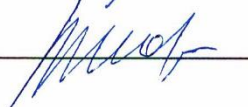
Настоящим актом подтверждается, что результаты исследований в области синтеза квазиоптимальных законов управления нелинейными динамическими системами в условиях неопределенности, опубликованные в статьях «Анализ и синтез нелинейных многорежимных законов управления с использованием объединенного принципа максимума» (Вестник Ростовского Государственного Университета Путей Сообщения. – 2019. – № 1), «Synthesis of Multimode Regulators Based on the Decomposition of the Control Space Using the Maximum Condition of the Generalized Power Function» (International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. – DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934058) использованы в НИОКР «Разработка системы безопасности транспортных средств на железнодорожных переездах «ЗАГРАДИТЕЛЬ-Т»» (Договор 468ГРНТИС5/45570 от 11.04.2019) и реализованы в виде алгоритмов, которые использованы в прогнозировании динамики движения маневрирующей системы в условиях априорной неопределенности в составе модуля системы обеспечения безопасности транспортных средств на железнодорожных переездах.

Председатель комиссии



И.В. Дерябкин

Члены комиссии

А.А. Воробьев
В.Н. Таран