

**Агапов Александр Андреевич**

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

2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону

2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС)

**Научный руководитель:** *Костоглотов Андрей Александрович,*  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Связь на железнодорожном транспорте» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»

**Официальные оппоненты:** *Колоденкова Анна Евгеньевна,*  
доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Информационные технологии» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

*Родзин Сергей Иванович,*  
кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

**Ведущая организация:** Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), г. Москва

Защита состоится 12 декабря 2023 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета 44.2.005.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС) по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, и на сайте [http:// www.rgups.ru](http://www.rgups.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 44.2.005.02  
доктор технических наук, профессор

О.Н. Числов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность** темы исследования подтверждается «Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года», где указано, что развитие интеллектуальных транспортных систем (ИТС) становится одним из важнейших инструментов повышения конкурентоспособности транспортного комплекса и экономики в целом. В документе отмечена необходимость развития технологий управления автономными беспилотными системами в таких областях, как беспилотные летательные аппараты (БПЛА), используемые для доставки грузов и для автономного перемещения съемочного оборудования в задаче мониторинга функционирования транспортных систем и инфраструктуры, и ИТС на железной дороге.

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-технический проект «Цифровая железная дорога»», согласно которым 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 и т.д.

Применение беспилотных технологий на транспорте требует совершенствования бортовых систем управления. Расширение области применения этих систем, а также усложнение объектов управления приводят к необходимости учета новых условий их функционирования. Существует практическая проблема: 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.

Вопросы разработки интеллектуальных алгоритмов рассматривали Ф.Ф. Пашенко, 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, 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. Формаль-

ский, 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», однако практическое его использование 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 современные методы синтеза квазиоптимальных законов.

Функционирование объектов управления в различных режимах движения требует изменения параметров 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, с помощью которого реализуется нечеткий логический вывод.

**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.

**Научная задача** – синтез интеллектуальных алгоритмов управления транспортными системами с использованием квазиоптимальных законов 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 освобожденности 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 быстрдействию 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 быстрдействия 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 изменение 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 быстрдействию 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 быстрдействия в сравнении с известными решениями.

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

**Соответствие содержания диссертации специальности.** Тематика диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы (технические науки):

- п. 1. Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач управления транспортными системами, процессами и транспортными средствами;
- п. 6. Средства и методы проектирования технического, математического, лингвистического, информационного и других видов обеспечения интеллектуальных транспортных систем, систем управления транспортными технологическими процессами и транспортными средствами;
- п. 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.

**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 изменения 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.

**Методы исследования.** Для достижения поставленной цели и решения обозначенных задач применялись подходы теории управления, нечеткой логики, в частности методы синтеза квазиоптимальных законов управления и нечеткий логический вывод Такаги-Сугено. Для проведения компьютерного моделирования и обработки экспериментальных данных были использованы программные комплексы Mathcad и MatLab (Simulink, Fuzzy Logic Designer), а также специально разработанные программы для ЭВМ на языках Python и C#.

**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 выполнении НИОКР и НИР, что подтверждается полученными актами:

- актом о внедрении научных результатов кандидатской диссертационной работы в НИОКР «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 и в НИОКР «Синтез интеллектуальных алгоритмов управления на основе построения гиперповерхности переключения с учетом динамических свойств управляемых объектов» (рег. номер АААА-А20-120080490051-6) в рамках гранта РФФИ № 19-31-90134;

- актом о внедрении научных результатов в 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;

- актом о внедрении научных результатов кандидатской диссертации в НИОКР «Разработка системы безопасности транспортных средств на железнодорожных переездах «ЗАГРАДИТЕЛЬ-Т»» (Договор 468ГРНТИС5/45570 от 11.04.2019);

- актом использования результатов кандидатской диссертации в учебном процессе ФГБОУ ВО РГУПС для подготовки специалистов по специальности 23.05.05 Системы обеспечения движения поездов (учебный план утвержден на заседании Ученого совета от 28.04.2023 № 10) и для магистратуры по направлению подготовки 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи (учебный план утвержден на заседании Ученого совета от 26.03.2021 № 8).

**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 пе-

речня ВАК), – 10 (из них по специальности – 7); изданиях, включенных в наукометрические базы данных Scopus, – 5; программ для ЭВМ – 3; методических материалов, внедренных в учебном процессе ФГБОУ ВО РГУПС, – 2. Результаты исследования были представлены на 17 всероссийских и международных конференциях, доклады и тезисы на которые были опубликованы. Была получена положительная экспертная оценка отчета об исследованиях в рамках проектов РФФИ и РГУПС. 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.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре («Аспиранты») № 19-31-90134, а также грантом ФГБОУ ВО РГУПС от 02 июля 2018 г. № 328 и стипендией Губернатора Ростовской области в сфере образования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о структуре диссертации.

**В первой главе** проведен анализ области применения и методов построения алгоритмов управления транспортными системами. 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, удовлетворяющих современным требованиям. Эффективное решением поставленной задачи синтеза интеллектуальных алгоритмов может быть найдено с применением метода синтеза квазиоптимальных законов на основе условия максимума функции обобщенной мощности в совокупности с нечетким логическим выводом.

**Математическая постановка задачи.** Процессы управления ориентацией БПЛА и управляемого движения поезда удовлетворяют уравнениям Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = u_i(t) + Q_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \quad i = \overline{1, n}, \quad t \in [t_0, t_1] \subset R, \quad (1)$$

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;  
 $\mathbf{Q}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = [Q_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \dots, Q_n(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})]$  – вектор остальных априорно неизвестных 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. Положим, что управляющие обобщенные силы на конечном замкнутом интервале времени  $[t_0, t_1] \subset R$  принимают значения в ограниченной замкнутой области суммируемых функций  $\mathbf{u} \in \bar{G}$ , а остальные обобщенные силы  $\mathbf{Q}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  не превышают возможностей управления:

$$\bar{G} = \{u_i(t) : |u_i| \leq h_i, |Q_i| < h_i, h_i = \text{const}, i = \overline{1, n}\}, \quad (2)$$

Пусть задано начальное состояние системы

$$t = t_0, \mathbf{q}(t_0) = [q_{10}, \dots, q_{n0}]^T, \dot{\mathbf{q}}(t_0) = [\dot{q}_{10}, \dots, \dot{q}_{n0}]^T \quad (3)$$

и терминальное состояние с некоторой окрестностью

$$\begin{aligned} |q_i^* - q_i(t_k)| < \delta_{i1}, \quad |\dot{q}_i^* - \dot{q}_i(t_k)| < \delta_{i2}, \\ \delta_{i1}, \delta_{i2} > 0, \quad i = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (4)$$

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

$$J[\mathbf{q}] = \int_{t_0}^{t_1} F(\mathbf{q}) dt \rightarrow \min_{\mathbf{u} \in \bar{G}}, \quad (5)$$

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

Задача синтеза интеллектуального алгоритма управления состоит в поиске управляющих обобщенных сил (2) на множестве квазиоптимальных законов по критерию (5) и нечеткого логического вывода, приводящих систему (1) из заданных начальных условий (3) в конечное состояние (4) в условиях неопределенности.

**Во второй главе** установлена структура управляющей обобщенной силы для лагранжевой динамической системы при стационарных связях с применением метода синтеза квазиоптимальных законов управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности. С использованием прикладных способов учета ограничений на класс допустимых управлений структура имеет вид

$$u_i(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = h_i \text{sat}(\lambda^{-1} \Psi_i(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))) = \begin{cases} h_i, & \lambda^{-1} \Psi_i > h_i, \\ \lambda^{-1} \Psi_i, & |\lambda^{-1} \Psi_i| \leq h_i, \\ -h_i, & \lambda^{-1} \Psi_i < -h_i, \end{cases} \quad (6)$$

где функция

$$\Psi_i(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = \mu_i(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) \dot{q}_i(t) + V_i(\mathbf{q}(t))$$

определяет поверхность переключения,  $\mu_i(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))$  – знакопостоянная синтезирующая функция,  $\lambda$  – неопределенный множитель Лагранжа,  $V_i = \frac{\partial F}{\partial q_i}$ . При  $\lambda \rightarrow 0$  управление (6) имеет релейный характер

$$u_i(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = h_i \text{sign}(\mu_i(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) \dot{q}_i(t) + V_i(\mathbf{q}(t))). \quad (7)$$

Синтезирующая функция  $\mu$  может быть определена из условия краевой задачи  $[\lambda(A - T) + F]_t^{t_k} = 0$ , в соответствии с которым при учете того, что на линии переключения работа управляющих сил равна нулю, т.е.  $A = 0$ , для каждого момента времени обобщенный кинетический потенциал принимает вид

$$L = T - \lambda^{-1} F = 0, \quad (8)$$

откуда определяются кинематические связи системы и соответствующая им работа сил реакции связей  $E$ , в результате чего получаем расширенный гамильтониан  $H = \lambda T + F + E$ . Управление на линии переключения равно нулю

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

где  $k$  – весовой коэффициент критерия  $F$ .

Для того, чтобы линия переключения являлась интегралом движения, необходимо, чтобы выполнялось условие обращения в ноль скобок Пуассона

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

тогда с учетом знакопостоянства синтезирующей функции, критерия управления и ограничения на управление закон управления (7) примет вид

$$u(q, \dot{q}) = h \cdot \text{sat} \left[ \lambda^{-1} \left( \alpha_1 q + \alpha_2 \frac{|\dot{q}| \dot{q}}{|q| + \alpha_3} \right) \right], \quad (9)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – неопределенные параметры управления.

Рассмотрим пример использования закона (9) для управления нелинейной неустойчивой системой

$$\ddot{x} = u - 0.8\dot{x}^2 \quad (10)$$

при ограничении на управление  $h = 1$  в сравнении с известным управлением на основе игрового подхода

$$u_{\text{game}} = h \cdot \text{sat}(\psi(x, \dot{x})),$$

$$\psi(x, \dot{x}) = -x - \alpha_2 \cdot \dot{x} |\dot{x}|, \quad (11)$$

$$\alpha_2 = [2h(1 - \rho)]^{-1},$$

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

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 рисунке 1. Закон управления (9) приводит систему (10) в терминальное состояние за 2,0550 с, закон (11) – за 2,4880 с, показатель

квадратичного функционала для (9) – 0,8026, для (11) – 0,8250. Результаты моделирования показывают, что полученный квазиоптимальный закон доставляет выигрыш 17.4 % по показателю быстродействия и 2.7 % по показателю квадратичного функционала в сравнении с известным законом (11).

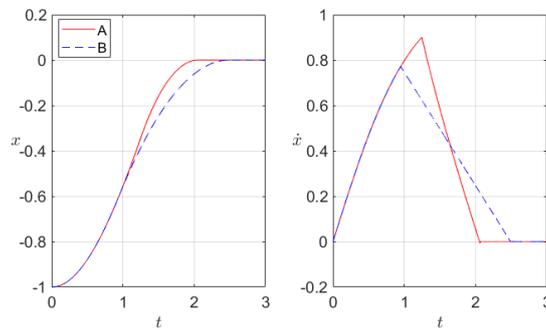


Рисунок 1 – Координата и скорость системы: А – полученный закон (9), В – известный закон (11)

Результаты моделирования системы (10) и других нелинейных систем с синтезированными 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.

**В третьей главе** синтезирован интеллектуальный алгоритм управления с применением рассмотренного метода на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода Такаги-Сугено. Нечеткий логический вывод можно применять различными способами в зависимости от динамики системы и условий ее функционирования, например, использовать для формирования отдельных нечетких параметров в алгоритме управления, что обеспечивает их изменение в соответствии с текущим состоянием системы, либо формировать алгоритм, руководствуясь принципом двухзонного регулирования.

Рассмотрим первый способ построения алгоритма с нечетким параметром на основе нечеткого логического вывода Такаги-Сугено, управление имеет вид

$$u_{fuzzy} = h \cdot sat \left[ \lambda^{-1} \left( \alpha_1 x + \alpha_2 \frac{\dot{x}|\dot{x}|}{|x| + \tilde{\alpha}_3} \right) \right], \quad (12)$$

где  $\tilde{\alpha}_3$  – нечеткий параметр,

$$\tilde{\alpha}_3 = \beta_1 m_1 + m_2 \beta_2, \quad (13)$$

$m_1$  и  $m_2$  – функции принадлежности входной переменной,  $m_2 = 1 - m_1$ ,  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – выходные значения, определенные для области, формализуемой функциями принадлежности  $m_1$  и  $m_2$  соответственно.

Определим функцию принадлежности  $m_1$  класса L:

$$m_1(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < a_1, \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2, \\ 0, & a_2 < x, \end{cases} \quad (14)$$

где  $a_1, a_2$  – параметры функции принадлежности, определяющие область ее действия.

Оценим эффективность синтезированного интеллектуального алгоритма (12) в задаче управления нелинейной динамической системой (10). Результаты моделирования системы (10), (11) и системы (10), (12) при параметрах  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = [2h(1-\rho)]^{-1}$ ,  $a_1 = 0$ ,  $a_2 = 1$ ,  $\beta_1 = 2$ ,  $\beta_2 = 0,53$ ,  $\lambda^{-1} = 1$ ,  $\rho = 0,5$ ,  $h = 1$  на области начальных условий  $x_0 \in [-1; 1]$ ,  $\dot{x}_0 = 0$  представлены на рисунке 2. Синтезированный интеллектуальный алгоритм (12) позволяет получить выигрыш по показателю быстродействия до 17,5 % в сравнении с известным управлением (11).

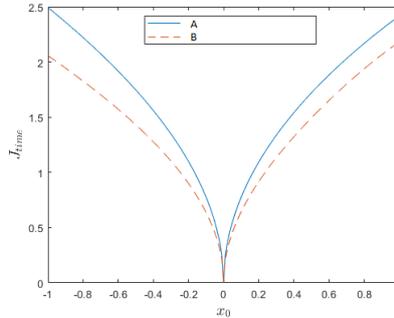


Рисунок 2 – Значения показателя быстродействия в зависимости от начальных условий системы (10) в диапазоне  $x_0 \in [-1; 1]$ : А – (11), В – (12)

Анализ результатов моделирования показывает, что применение закона управления (12) на основе условия максимума функции обобщенной мощности с нечетким параметром для управления системой (10) позволяет получить выигрыш по функционалу быстродействия до 17,5 % в сравнении с законом (11) на области начальных условий  $x_0 \in [-1; 1]$ ,  $\dot{x}_0 = 0$ .

Рассмотрим синтез интеллектуального алгоритма с применением принципа двухзонного управления для нелинейной динамической системы с несколькими степенями свободы. Для этого необходимо определить законы, действующие «в большом» и «в малом» отдалении от терминальной точки, а также нечеткий логический вывод, позволяющий объединить их, избегая точек разрыва. Для переключения между режимами определим нечеткий логический вывод Такаги-Сугено с базой правил

$$\begin{aligned} D_1 : r = A_1 &\Rightarrow y_1 = u_1, \\ D_2 : r = A_2 &\Rightarrow y_2 = u_2, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $r = \sqrt{x^2 + \dot{x}^2}$  – расстояние до терминальной точки,  $A_1, A_2$  – 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 (заключения продукционных правил).

Интеллектуальный закон на базе законов и нечеткого логического вывода с базой правил будет иметь вид

$$u_{\text{int}} = \frac{m_1(x)y_1 + m_2(x)y_2}{m_1(x) + m_2(x)}. \quad (16)$$

В качестве закона  $u_1$ , действующего вдали от терминальной точки, выберем квазиоптимальный по быстродействию закон (11), который обладает малой чувствительностью к изменению параметров системы.

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, который имеет вид

$$u_2 = \begin{cases} h, & \gamma(x + \dot{x}) \geq h, \\ \gamma(x + \dot{x}), & |\gamma(x + \dot{x})| < h, \\ -h, & \gamma(x + \dot{x}) \leq -h, \end{cases} \quad (17)$$

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

Рассмотрим систему (10)  $\ddot{x} = u - 0,8\dot{x}^2$ , начальные условия  $x(t_0) = -1$ ,  $\dot{x}(t_0) = 0$ . Построим управление (16) и оценим эффективность, параметры моделирования  $\delta_1 = 0,01$  град,  $\delta_2 = 0,01$  град/с,  $\rho = 0,717$ ,  $\gamma = 4$ , результаты представлены на рисунке 3, управляющие сигналы показаны на рисунке 4.

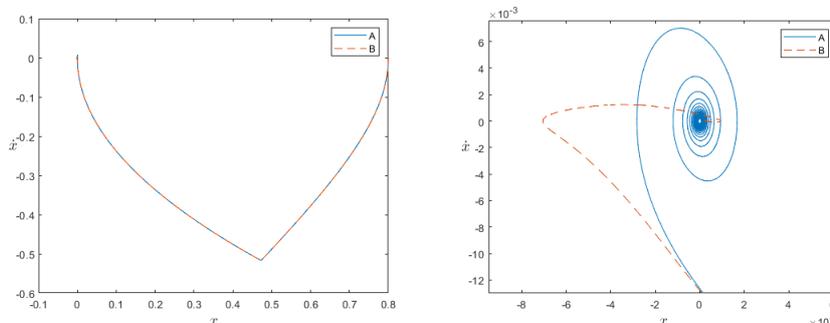


Рисунок 3 – Поведение системы на фазовой плоскости: А – управление (11), В – управление (16), справа – вблизи терминальной точки

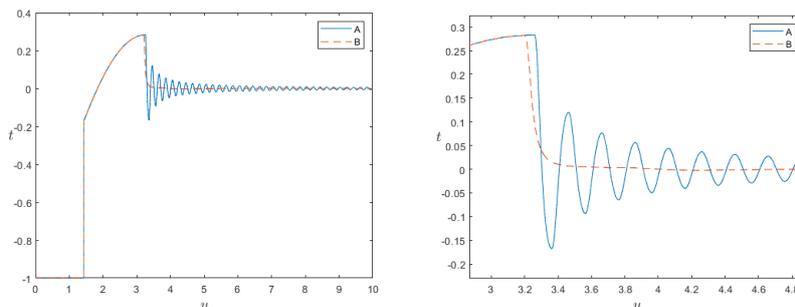


Рисунок 4 – Управляющие сигналы для системы: А – (11), В – (16), справа – вблизи терминальной точки

Управление (11) приводит систему в окрестность терминальной точки за 3,26 с, (16) – за 3,33 с. При этом в отличие от закона (11) синтезированный интеллектуальный алгоритм (16) позволяет избежать появления колебательного режима управляющего сигнала вблизи терминальной точки.

Эффективность полученного решения также проверена для системы  $\ddot{x} = u + \sin x$ . Анализ результатов моделирования показывает, синтезированный интеллектуальный алгоритм управления обеспечивает достижение окрестности терминальной точки систем 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.

**В четвертой главе** синтезирован интеллектуальный алгоритм управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода Такаги-Сугено, который позволяет повысить эффективность управления углом крена БПЛА по показателю быстродействия в сравнении с известными решениями. Построена САУ скоростью электровоза нового поколения с асинхронным тяговым двигателем с использованием синтезированного интеллектуального алгоритма управления, который может обеспечить повышение быстродействия достижения заданной скорости в сравнении с известным решением.

В программно-аппаратном комплексе макета БПЛА установлен и настроен классический алгоритм управления, который имеет вид

$$u_{pid} = k_p \Delta\theta + k_d \dot{\theta} + k_i \int_0^t \Delta\theta d\tau, \quad (18)$$

где  $k_p = 5$ ,  $k_d = 1$ ,  $k_i = 2,5$  – коэффициенты закона управления, настроены по результатам натурального эксперимента,  $\Delta\theta = \theta - \theta^*$  – рассогласование текущего положения по углу крена  $\theta$  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.

По результатам эксперимента, в ходе которого осуществлялось изменение угла крена от 0 до 20 градусов макета БПЛА, была построена модель БПЛА вида

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial T}{\partial \theta} = u + Q(\theta, \dot{\theta}), \quad (19)$$

где  $T = \frac{1}{2} c_2 \dot{\theta}^2$ ,  $Q = c_1 \dot{\theta} + c_0 \theta$ ,  $u$  – алгоритм управления, для идентификации параметров модели принято  $u = u_{pid}$ ;  $c_2$ ,  $c_1$ ,  $c_0$  – параметры модели. В результате проведения идентификации параметров модели (19) были получены значения  $c_2 = -0,068$ ,  $c_1 = 4,399$ ,  $c_0 = 0,385$ . Построен интеллектуальный алгоритм управления с нечетким логическим выводом

$$u_{int} = m(\theta, \dot{\theta}) u_{pid} + (1 - m(\theta, \dot{\theta})) u_{cmp}, \quad (20)$$

$$u_{cmp} = h \cdot \text{sat} \left( \lambda^{-1} \left( \alpha_1 \Delta \theta + \alpha_2 \frac{|\dot{\theta}| \dot{\theta}}{|\theta| + \alpha_3} \right) \right), \quad m(\theta, \dot{\theta}) = \begin{cases} 1, & 0 \leq r \leq a_1, \\ \frac{a_2 - r}{a_2 - a_1}, & a_1 < r \leq a_2, \\ 0, & r > a_2, \end{cases}$$

где  $\alpha_1 = 60$ ,  $\alpha_2 = 12$ ,  $\alpha_3 = 2$ ,  $\lambda^{-1} = 1$ ,  $a_1 = 0,1$ ,  $a_2 = 3$ ,  $r = \sqrt{\Delta \theta^2 + \dot{\theta}^2}$ .

Проведем моделирование систем (19), (18) и (19), (20) с учетом наличия априорной неточности измерения угла крена, которую примем равной  $\pm 0,017$  рад. Результаты моделирования одной реализации представлены на рисунке 5. Проведено моделирование 1000 реализаций рассмотренного случая. В среднем выигрыш по быстродействию разработанной системы (19), (20) в сравнении с используемой в макете БПЛА (19), (18) составил 5,8 %, что позволяет сделать вывод: синтезированный интеллектуальный алгоритм управления позволяет повысить эффективность управления по показателю быстродействия в сравнении с классическим алгоритмом управления.

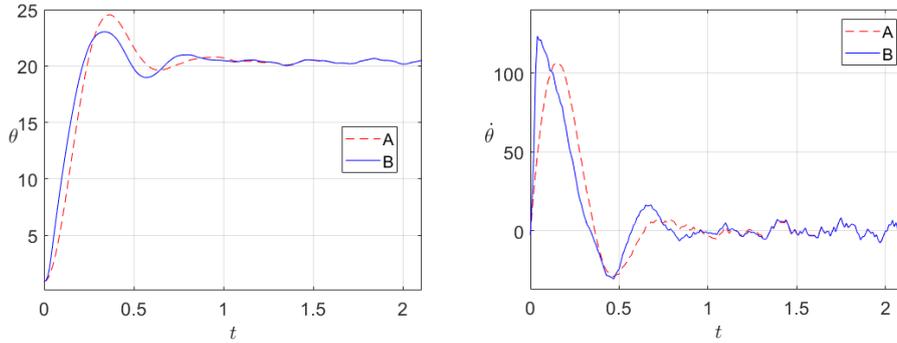


Рисунок 5 – Угол крена и скорость изменения угла крена на одной реализации:  
А – (19), (18), В – (19), (20)

Также проведем сравнение с известным алгоритмом (17), позволяющим максимизировать область притяжения системы, который, напомним, имеет вид

$$u_2 = \begin{cases} h, & \gamma(\theta + \dot{\theta}) \geq h, \\ \gamma(\theta + \dot{\theta}), & |\gamma(\theta + \dot{\theta})| < h, \\ -h, & \gamma(\theta + \dot{\theta}) \leq -h, \end{cases} \quad (21)$$

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

Моделирование при тех же параметрах показало, что в среднем на 1000 реализаций выигрыш по быстродействию разработанной системы (19), (20) в сравнении с (19), (21) составил 15 %.

В задаче управления поездом рассмотрено уравнение движения поезда в установившемся режиме

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial v} - \frac{\partial T}{\partial s} = F_{тяги} - R, \quad (22)$$

где  $T = \frac{1}{2}Mv^2$ ,  $M = 1000 \frac{(P+Q)}{g}$  – масса поезда,  $P$  – вес локомотива ЭП20, равен 1265 кН,  $Q$  – вес состава из 20 пассажирских вагонов, принят 12740 кН,  $g$  – ускорение свободного падения,  $v$  – скорость поезда,  $s$  – пройденный путь поезда,  $F_{тяги}$  – сила тяги/электрического торможения,  $R$  – равнодействующая сил основного и дополнительного сопротивления движению.

Удельное сопротивление локомотива равно, Н/кН:

$$w_{лок} = 2,4 + 0,011v + 0,00035v^2. \quad (23)$$

Удельное сопротивление пассажирского состава, Н/кН:

$$w_{сост} = 0,7 + (8 + 0,18v + 0,003v^2) / 160. \quad (24)$$

Разработана система автоматического управления (САУ) скоростью электровоза ЭП20, которая представлена на рисунке 6. САУ скоростью электровоза содержит автоматический регулятор скорости, построенный с использованием синтезированного интеллектуального алгоритма управления (Рисунок 7).

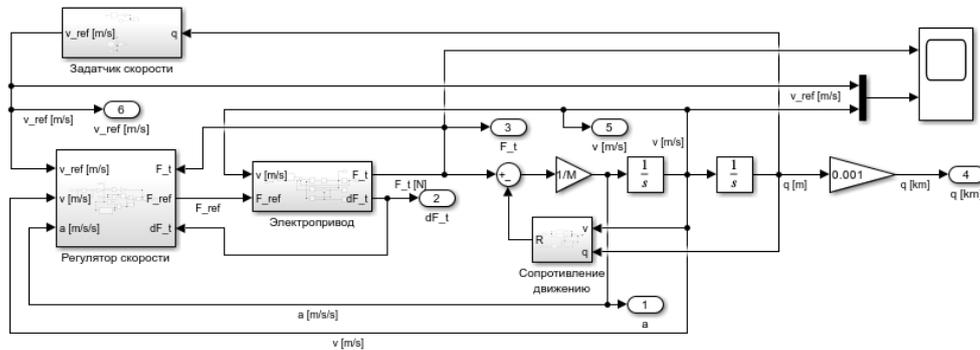


Рисунок 6 – Структурная схема САУ скоростью электровоза ЭП20

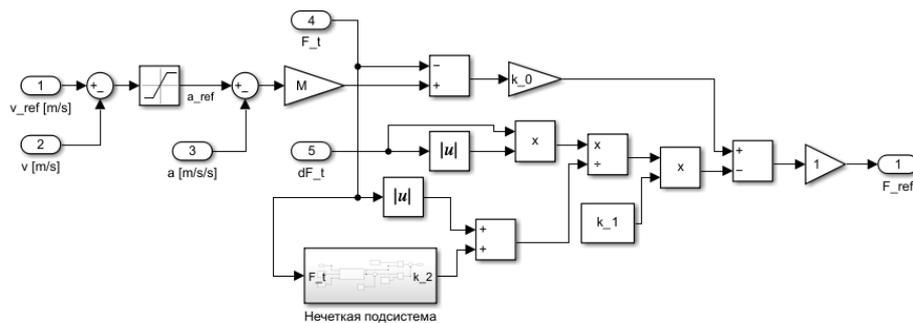


Рисунок 7 – Структурная схема разработанного блока регулятора скорости электровоза ЭП20

Рассмотрим движение поезда на равнинном участке Москва-Рязань. 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. Результаты моделирования представлены на рисунках 8 и 9. Разработанная САУ скоростью электровоза ЭП20 на основе синтезированного интеллектуального алгоритма управления позволяет поддерживать заданную скорость, обеспечивая движение в режиме тяги и в режиме рекуперативного торможения.

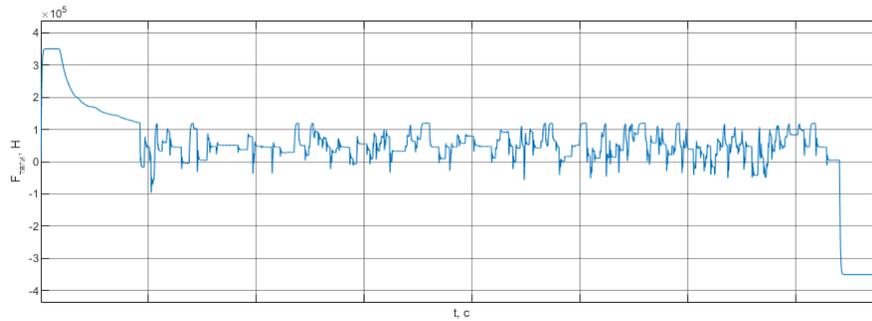


Рисунок 8 – Тяга локомотива с разгоном и торможением до заданной скорости на участке Москва-Рязань с разработанной САУ скоростью ЭП20

Аналогичные результаты получены в результате моделирования на участке Москва-Адлер. САУ с разработанным алгоритмом достигает области  $\pm 1$  км/ч заданной скорости быстрее на 2,5 с, чем известная САУ, построенная по условию устойчивости (рисунок 10). Также разработанный интеллектуальный алгоритм обеспечивает меньшее перерегулирование по скорости – 0,2 км/ч против 0,4 км/ч.

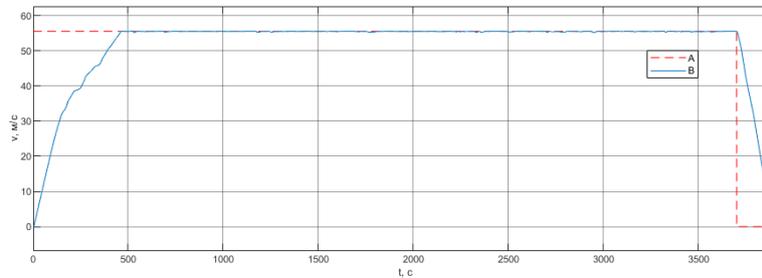


Рисунок 9 – Заданная (А) и действительная (В) скорости поезда на участке Москва-Рязань под управлением разработанной САУ скоростью ЭП20

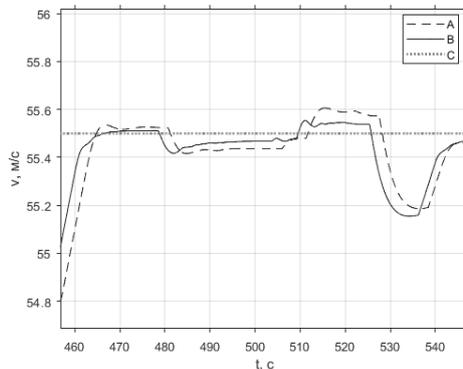


Рисунок 10 – Момент достижения поездом заданной скорости: А – известная САУ, В – разработанная САУ, С – заданная скорость

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что разработанный интеллектуальный алгоритм управления применим 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 дает возможность 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, 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. 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 натурального 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 заданной скорости в сравнении с известной САУ, построенной по условию устойчивости.

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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:**

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Агапов А. А. Построение закона управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода / А. А. Агапов, А. А. Костоглотов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2022. – № 4 (216). – С. 35-40.

2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.

*Статьи в журналах, входящих в базу Scopus:*

11. 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” (IITI’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.

12. 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” (IITI’19) : Advances in Intelligent Systems and Computing / S. Kovalev [et al.] eds. . – Cham : Springer International Publishing, 2020. – P. 531-540.

13. 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” (IITI’21) : Lecture Notes in Networks and Systems / S. Kovalev [et al.] eds. . – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 582-588.

14. 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” (IITI’21) : Lecture Notes in Networks and Systems / S. Kovalev [et al.] eds. . – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 601-609.

15. 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.

*Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ:*

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665509 Российская Федерация. Программа настройки параметров много-режимного 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. Костоглотов, З. В. Лященко [и др.]. / А. А. Агапов, А. А. Костоглотов, З. В. Лященко, [и др.]. – 2021.

17. 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.

18. 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.

*Другие публикации:*

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. Костоготов А. А. Синтез закона управления нелинейными неустойчивыми объектами в условиях возмущений на основе условия максимума функции обобщенной мощности / А. А. Костоготов, 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.

29. Анализ эффективности закона управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности / А. А. Костоготов, 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.

30. 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.

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

32. 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.

**Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве.** [1, 2, 15, 24, 28, 29] – идеи технических решений, анализ публикаций по теме исследования, разработка моделей и алгоритмов, проведение компьютерного моделирования и обобщение полученных результатов. [3, 25, 26] – анализ публикаций по теме исследования, разработка моделей и алгоритмов, проведение компьютерного моделирования и обобщение полученных результатов. [4, 17, 18, 27, 30] – единоличная разработка. [5–10, 11–14, 19–23] – разработка моделей и алгоритмов, проведение компьютерного моделирования и обобщение полученных результатов. [16] – реализация алгоритма на языке программирования. [31, 32] – разработка отдельных глав, анализ и структурирование материала.

**Агапов Александр Андреевич**

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 29.09.2023. Формат 60x84/16.  
Усл. печ. л. 1,34. Тираж 100 экз. Заказ

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

---

Адрес университета: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка  
Народного Ополчения, д. 2, [www.rgups.ru](http://www.rgups.ru)