

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 44.2.005.02,
созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения» (РОСЖЕЛДОР),
по диссертации на соискание ученой степени кандидата (доктора) наук
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 12.12.2023 № 6

О присуждении Агапову Александру Андреевичу, Российская Федерация, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Синтез интеллектуальных алгоритмов управления транспортными системами с использованием квазиоптимальных законов и нечеткого логического вывода» по специальности 2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы принята к защите 29.09.2023 г. (протокол заседания № 3) диссертационным советом 44.2.005.02, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения», РОСЖЕЛДОР, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2., Приказ Минобрнауки РФ № 227/нк от 14.02.2023, далее – ФГБОУ ВО РГУПС.

Агапов Александр Андреевич, 27 июня 1994 г.р., в 2016 г. с отличием окончил бакалавриат ФГБОУ ВО РГУПС по специальности 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», в 2018 г. с отличием окончил магистратуру ФГБОУ ВО РГУПС по специальности 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника», награжден знаком «За отличие в учебе» Министерства транспорта Российской Федерации (№ 0149, Приказ Минтранса России от 18 июня 2018 года № 108/н). В 2022 г. окончил аспирантуру по направлению 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника», направленность «Системный анализ, управление и обработка информации», с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь», был прикреплен для сдачи кандидатских экзаменов по научной специальности 2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы, а также прикреплен соискателем для написания диссертации по научной специальности 2.9.8 Интеллектуальные транспортные системы. В настоящее время работает ведущим инженером государственной телерадиокомпании «Дон-ТР» (Филиал ФГУП ВГТРК Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации) и ассистентом кафедры «Вычислительная техника и автоматизированные системы управления» ФГБОУ ВО РГУПС, РОСЖЕЛДОР.

Диссертация выполнена на кафедре «Связь на железнодорожном транспорте» ФГБОУ ВО РГУПС, РОСЖЕЛДОР.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Костоготов Андрей Александрович, заведующий кафедрой «Связь на железнодорожном транспорте» ФГБОУ ВО РГУПС.

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» – дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), г. Москва – в своем положительном отзыве, подписанном Гришаевым Сергеем Юрьевичем, кандидатом технических наук, заместителем генерального директора – директором Ростовского филиала АО «НИИАС», и утвержденном Долгим Александром Игоревичем, генеральным директором АО «НИИАС», кандидатом технических наук, указала, что диссертация Агапова А.А. «Синтез интеллектуальных алгоритмов управления транспортными системами с использованием квазиоптимальных законов и нечеткого логического вывода» выполнена на высоком научном и практическом уровне, на актуальную тему и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые, научно обоснованные технические и технологические разработки, обеспечивающие решение важных задач в области развития методов повышения эффективности алгоритмов управления в интеллектуальных транспортных системах. Содержание диссертации в достаточной степени отражено в автореферате. Диссертация написана соискателем Агаповым А.А. самостоятельно, обладает внутренним единством, а также содержит новые научные результаты и решения, которые свидетельствуют о личном вкладе соискателя в науку. Диссертация отвечает критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Агапов Александр Андреевич заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы.

Соискатель имеет 58 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 32 работы, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, опубликовано 10 работ, 5 статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus/Web of Science, получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Объем опубликованных работ по теме диссертации составляет 27,29 п.л., авторский вклад – 11,22 п.л. Все публикации достаточно полно отражают основные результаты исследований и посвящены проблемам синтеза интеллектуальных алгоритмов управления с применением квазиоптимальных законов управления и нечеткого логического вывода. Имеются ссылки на авторов и источники заимствования.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. 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.

2. Агапов А. А. Анализ эффективности квазиоптимальных законов управления с применением аппарата нечеткой логики в задачах интеллектуализации

транспортных систем / А. А. Агапов, А. А. Костоглотов, 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. 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” (ITI'19) : Advances in Intelligent Systems and Computing / S. Kovalev [et al.] eds. . – Cham : Springer International Publishing, 2020. – P. 531-540.

6. 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.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

– **ведущей организации** – Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»). Отзыв положительный. Замечания: **1.** В работе явным образом не приведено определение интеллектуальности разработанных алгоритмов. **2.** В работе представлено 2 варианта формирования интеллектуального алгоритма управления: с применением квазиоптимального закона на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого параметра и с применением двух квазиоптимальных законов, каждый из которых функционирует в своей области фазовой плоскости, определяемой нечетким логическим выводом. Предполагается, что выбор определенного варианта формирования интеллектуального алгоритма зависит от единства целей управления на фазовой плоскости «в большом» и «в малом» отклонениях от терминальной точки, однако данное обстоятельство в работе явно не указывается. **3.** В задаче построения системы автоматического управления скоростью электровоза ЭП20 на базе синтезированного интеллектуального алгоритма управления не учтены все возможные дополнительные сопротивления движению, а скорость представлена в м/с, а не в км/ч, что снижает наглядность результатов. В таблице 2 строка с 30 пассажирскими вагонами в составе выглядит излишней. **4.** Следует рассмотреть возможность применения других современных методов интеллектуализации помимо нечеткой логики, например, нейросетевых

методов, что позволит обеспечить автоматическую настройку параметров системы управления. Для применения нейронных сетей имеет смысл сформировать базу данных в качестве обучающей выборки.

– **официального оппонента** – д.т.н., доцента, заведующей кафедрой «Информационные технологии» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» **Колоденковой Анны Евгеньевны**. Отзыв положительный. Замечания: **1.** Во второй главе в качестве законов управления были рассмотрены релейные законы (sign) (формулы (24), (26), (33), (34)). Однако далее рассматривались законы с функцией насыщения (sat) (формулы (38), (39)). При этом не были указаны причины такого изменения. **2.** Настройка параметров функций принадлежности нечеткого логического вывода Такаги-Сугено успешно выполняется с применением адаптивной нейро-нечеткой системы ANFIS. Однако в работе не указана причина выбора модели Такаги-Сугено в сравнении с другими моделями. **3.** Во второй главе (стр. 41) рассмотрен синтез квазиоптимальных законов управления системами с несколькими степенями свободы (формула (35)). Однако в практических примерах беспилотного летательного аппарата и электровоза использованы синтезированные алгоритмы только для одной степени свободы, что не противоречит поставленной задаче, но свидетельствует об избыточности проведенных исследований в рамках одной диссертации. **4.** В постановке задачи (формула (1)) указано, что полученные решения распространяются на весь класс систем, удовлетворяющих уравнениям Лагранжа второго рода. Однако в работе не исследованы границы применимости синтезированных алгоритмов управления, включая область начальных условий и величину внешних возмущений. **5.** В третьей главе синтезирован алгоритм управления в соответствии с принципом двухзонного управления (формула 58). Для каждой зоны в качестве выводов продукционных правил были выбраны различные квазиоптимальные законы. Однако обоснование такого выбора было приведено без указания показателя, по которому каждый из этих законов считается близким к оптимальному.

– **официального оппонента** – к.т.н., профессора Института компьютерных технологий и информационной безопасности ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» **Родзина Сергея Ивановича**. Отзыв положительный. Замечания: **1.** На стр. 25 выбор нечеткого вывода Такаги-Сугено выглядит не вполне обоснованным. Утверждается, что он наиболее распространенный и представлен в среде Matlab. Однако это утверждение относится, например, и к выводу по Мамдани. Логический вывод Такаги-Сугено сложнее при формировании логических правил (необходимо подобрать коэффициенты функции целевой переменной), чем логический вывод Мамдани. К тому же в последние годы гораздо более популярной является адаптивная нейро-нечеткая система вывода Джанга, нежели Такаги-Сугено, поскольку результаты, полученные с ее помощью, более устойчивы. **2.** Автор утверждает (п. 1.3), что представлена «математическая постановка задачи синтеза интеллектуальных алгоритмов управления», предполагающая использование нечеткого логического вывода. Однако в постановке задачи отсутствуют нечеткие множества, нечеткие лингвистические переменные и нечеткие операции. **3.** Один из ключевых моментов работы транспортной системы управления связан с настройкой/контролем параметров алгоритмов управления, т. е. с поиском способа

автоматической корректировки параметров во время выполнения алгоритма. Автор ссылается (стр. 46 и стр. 68) на зарегистрированные программы для ЭВМ, представленные в Приложении А1 и А2 для объекта типа «обратный маятник на тележке» и для многорежимного нелинейного алгоритма. В соответствующих разделах диссертации (п. 2.2 и п. 3.3) необходимо было представить вычислительную процедуру корректировки параметров, оптимизации параметров функций принадлежности и нечетких правил Такаги-Сугено, оценить трудоемкость этой процедуры, поскольку известны эффективные способы оптимизации этих параметров с использованием метаэвристических алгоритмов, таких как оптимизатор роя частиц (PSO), генетический (GA) и муравьиный (ACO) алгоритмы.

4. Управление угловым движением беспилотного летательного аппарата в сложных условиях, включая системные неопределенности, неизвестный шум и/или помехи, является сложной задачей. Предлагаемый алгоритм управления сравнивается с классическим законом управления типа ПИД-регулятор. Однако подходы на основе нейронных сетей более эффективны, особенно когда динамика системы полностью или частично неизвестна. Кроме того, нейроконтроллер может обеспечивать стабильность системы на этапе обучения и компенсировать производительность системы при возникновении сбоя в системе.

На автореферат поступило 6 отзывов. Все отзывы положительные.

1. **Отзыв** начальника отдела подготовки научных кадров высшей квалификации ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи» Федерального научно-производственного центра, д.т.н., доц. **Елисеева Александра Вячеславовича**. Замечания: **1.** При математической постановке задачи сказано, что модель (1) соответствует процессу управления как БЛА, так и поезда, что требует пояснений, учитывая существенное отличие между этими объектами управления. **2.** В тексте автореферата в явном формализованном виде не приведены показатели и критерии эффективности разрабатываемых систем управления. При анализе результатов моделирования идет речь только о показателе быстродействия, хотя для системы управления важным является и точность регулирования, которая существенно влияет на эффективность транспортной системы. **3.** В выражении (5) используется целевая функция $F(\mathbf{q})$, которая в явном виде не приведена в автореферате, что несколько затрудняет анализ результатов моделирования, приведенных на страницах 10 и 11 автореферата. **4.** Из автореферата не ясно, проводилось ли обоснование выбора вида и параметров функций принадлежности, используемых в модели нечеткого логического вывода Такаги-Сугено и существенно влияющих на результат синтеза управлений. **5.** Имеются погрешности оформления автореферата в виде опечаток и «мелкого» масштаба рисунков 1-4, 8-10, затрудняющих их анализ.

2. **Отзыв** профессора кафедры «Электрическая тяга» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», д.т.н., доцента **Колпахчяна Павла Григорьевича**. Замечания: **1.** В автореферате не объяснена причина использования прикладного способа учета ограничений на управление – функция насыщения. **2.** На рисунке 8 отсутствует численная шкала по оси абсцисс.

3. **Отзыв** профессора кафедры «Цифровые технологии управления транспортными процессами» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», д.т.н., профессора **Ларина Олега Николаевича**. Замечание: отсутствует методика выбора коэффициентов рассматриваемых алгоритмов управления.

4. **Отзыв** ведущего инженера АО «ВНИИ «Градиент», к.т.н. **Ремизова Сергея Евгеньевича**. Замечание: не приведено сравнение полученных решений с решениями на основе нейронных сетей.

5. **Отзыв** профессора кафедры «Транспортные процессы и технологические комплексы» ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» д.т.н., профессор **Шевцова Юрия Дмитриевича**. Замечания: **1.** Не указан тип БПЛА, для которого ставится задача управления угловым движением, квадрокоптер или самолетного типа. **2.** Не указан метод, с помощью которого проводилось численное моделирование дифференциальных уравнений.

6. **Отзыв** заведующего кафедрой инфокоммуникаций ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» д.т.н., профессора **Линца Геннадия Ивановича**. Замечания: **1.** Часть моделей объектов управления, на которых проводится анализ эффективности полученных решений, являются абстрактными и могли бы быть заменены на известные модели реальных технических систем. **2.** Скорость поезда выражена в м/с, хотя более наглядным было бы представление в км/ч.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается соответствием исследуемых ими научных проблем в области построения интеллектуальных систем управления, интеллектуальных транспортных систем, интеллектуальных алгоритмов с применением нечеткой логики с темой диссертационного исследования соискателя, что подтверждено наличием публикаций по данной тематике. Выбор ведущей организации обусловлен научными направлениями и разработками ее ученых в области исследования интеллектуальных транспортных систем и алгоритмов управления техническими системами.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– **разработаны** интеллектуальный алгоритм управления, с использованием нечеткого логического вывода Такаги-Сугено и метода синтеза квазиоптимальных законов на основе условия максимума функции обобщенной мощности, интеллектуальный алгоритм управления нелинейной динамической системой с несколькими степенями свободы, интеллектуальный алгоритм управления угловым движением по крену беспилотным летательным аппаратом мультироторного типа, система автоматического управления скоростью электровоза с использованием синтезированного интеллектуального алгоритма.

– **предложены** подход к построению интеллектуальных алгоритмов управления транспортным средством с применением квазиоптимальных законов и нечеткого логического вывода; система управления угловым положением беспилотного летательного аппарата типа квадрокоптер по показателю быстродействия;

– **доказана** на основе численного моделирования возможность использования разработанных интеллектуальных алгоритмов для управления транспортными системами в условиях априорно неизвестных возмущений.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– **доказана** на основе численного моделирования эффективность интеллектуальных алгоритмов управления с применением квазиоптимальных законов и нечеткого логического вывода для управления нелинейными динамическими системами с несколькими степенями свободы в сравнении с известными решениями;

– **применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы** методы теории автоматического управления, системного анализа, теории нечетких множеств, лагранжевой механики;

– **раскрыты** особенности формирования нечеткого логического вывода при построении интеллектуальных алгоритмов управления. Проведен анализ эффективности решения с применением квазиоптимального закона на основе условия максимума функции обобщенной мощности в сравнении с известными законами;

– **изучены** подходы к формированию интеллектуальных алгоритмов управления с применением законов, квазиоптимальных по различным показателям эффективности, в априорно неизвестных условиях.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

– **разработаны и внедрены:** результаты диссертационного исследования использованы 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 НИОКР «Синтез интеллектуальных алгоритмов управления на основе построения гиперповерхности переключения с учетом динамических свойств управляемых объектов» (рег. номер АААА-А20-120080490051-6); в НИР «Разработка элементов беспилотных технологий на базе методов объединенного принципа максимума» по договору с ФГБОУ ВО РГУПС от 02 июля 2018 г. № 328; в НИОКР «Разработка системы безопасности транспортных средств на железнодорожных переездах «ЗАГРАДИТЕЛЬ-Т»» (Договор 468ГРНТИС5/45570 от 11.04.2019), что подтверждается актами внедрения. Результаты авторских научных исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» при подготовке специалистов по направлениям 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов» и 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»;

– **определены** перспективы практического использования разработанных интеллектуальных алгоритмов управления в задачах управления транспортными системами, включающими в себя беспилотные летательные аппараты для мониторинга инфраструктуры и системы автоматического управления скоростью электровоза с асинхронным тяговым двигателем;

– **создано** программное обеспечение для настройки параметров разработанных алгоритмов управления различными динамическими системами и моделирования процесса управления, зарегистрированы программы для ЭВМ;

– **представлены** результаты применения разработанных интеллектуальных алгоритмов в задаче управления транспортными системами для мониторинга инфраструктуры железных дорог и задаче управления скоростью железнодорожного состава.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

– **для экспериментальных работ** результаты получены с использованием официальных статистических данных, исследований российских ученых, методов статистического анализа, натурных наблюдений и исследований, публикаций специалистов железнодорожного транспорта, посвященных проблемам автоматического управления, международных публикаций, в том числе посвященных проблеме построения квазиоптимальных законов. Используются цифровые средства и программные комплексы Mathcad, MatLab, в том числе специализированные пакеты для обеспечения компьютерного моделирования;

– **теория** построена на известных и проверенных данных и фактах, согласуется с ранее опубликованными источниками по теме диссертации;

– **идея базируется** на анализе известных проблем в области автоматического управления транспортными системами с учетом стратегических направлений развития транспортной отрасли Российской Федерации;

– **использованы** современные апробированные методы синтеза квазиоптимальных законов управления и построения алгоритмов с применением нечеткого логического вывода.

Личный вклад соискателя 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, интерпретация полученных с применением методов компьютерного моделирования результатов и разработка программ для ЭВМ.

В ходе защиты были высказаны следующие критические замечания, связанные с критерием эффективности интеллектуальных алгоритмов управления, который на практике используется при построении систем управления скоростью поезда. Рекомендовано обратить внимание на разработку метода настройки и контроля параметров алгоритмов управления.

Соискатель Агапов А.А. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию. Вопросы выбора энергооптимального управления движением поездов рассматривались в большом количестве работ. Наиболее полное обобщение результатов можно найти в монографиях д.т.н., профессора Баранова Леонида Аврамовича и в других его работах совместно с Пудовиковым О.Е., Савоськиным А.Н. и Бестемьяновым П.Ф., где приведены решения задач ведения поездов перспективным методом виртуальной

сцепки. В диссертационной работе предложен интеллектуальный алгоритм управления скоростью локомотива, который может использоваться совместно с известными решениями в качестве алгоритма, реализующего достижение заданной скорости, которая выбирается исходя из критерия энергоэффективности. Диссертационное исследование охватывает вопросы определения структуры квазиоптимального закона управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и формирования интеллектуальных алгоритмов с применением нечеткого логического вывода Такаги-Сугено и квазиоптимальных законов.

Диссертация охватывает в полном объеме вопросы поставленных задач, обладает внутренним единством, что подтверждается корректной постановкой цели и задач исследований, содержит новые научные результаты, а также свидетельства личного вклада автора в науку. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На заседании «12» декабря 2023 года диссертационный совет принял решение за новые научно обоснованные технические и технологические решения и разработки, направленные на развитие научно-методических подходов по повышению эффективности алгоритмов управления транспортными системами, базирующихся на квазиоптимальных законах с применением нечеткого логического вывода, учитывающие априорную неопределенность условий функционирования и имеющие существенное значение для развития транспортной отрасли страны, присудить Агапову А.А. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 11 человек, из них 5 докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 13 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 11, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного
совета 44.2.005.02
д.т.н., профессор



Верескун Владимир Дмитриевич

Ученый секретарь диссертационного
совета 44.2.005.02
д.т.н., профессор

Числов Олег Николаевич

«12» декабря 2023 г.