

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.224.01,
созданного на базе Федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук», по диссертации
на соискание ученой степени доктора технических наук

Аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 10 декабря 2024 №14

О присуждении Шмалько Елизавете Юрьевне, гражданке Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Принцип синтезированного оптимального управления в робототехнических системах» по специальности 2.3.1 — «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» принята к защите 5 сентября 2024 г., протокол № 9, диссертационным советом 24.1.224.01, созданным на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН), 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 747/нк от 22 июня 2016 г.

Соискатель Шмалько Елизавета Юрьевна, 1982 года рождения, в 2007 году с отличием окончила магистратуру Российского университета дружбы народов, получив диплом магистра техники и технологии по направлению «Автоматизация и управление». Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Разработка и исследование метода сетевого оператора в задаче синтеза системы управления спуском космического аппарата» защитила в 2009 году в диссертационном совете на базе Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН (ВЦ РАН). С 2010 года работает в ВЦ РАН, вошедшего с 2015 года в состав ФИЦ ИУ РАН, в настоящее время в должности старшего научного сотрудника.

Диссертация выполнена в Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» Российской академии наук, в отделе № 55 «Управление робототехническими устройствами» отделения № 5.

Научный консультант — Дивеев Асхат Ибрагимович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФИЦ ИУ РАН, зав. отделом №55 «Управление робототехническими устройствами».

Официальные оппоненты:

1. Акопов Андраник Сумбатович, доктор технических наук, профессор, профессор РАН, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Центральный экономико-математический институт РАН».

Отзыв оппонента **положительный**. Имеются следующие замечания по работе:

- 1) В названии диссертации не прослеживаются все цели работы, в частности связанные с применением методов машинного обучения для автоматизации расчетов.
- 2) Проблема оптимального управления робототехническими системами в среде со сложными внешними характеристиками (например, управление беспилотным транспортным средством во время снегопада, при наличии множественных препятствий на дорогах и т.д.) обуславливает необходимость применения методов машинного зрения, алгоритмов распознавания образов и др., в том числе, использующих кластеризацию (например, нечёткую кластеризацию объектов-препятствий). Подобные алгоритмы позволяют оценить специфику окружающего пространства, осуществить поиск наилучших и безопасных маршрутов объезда препятствий, реализовать интеллектуальное маневрирование. Вместе с тем, подобные проблемы в диссертации не рассматриваются, что может несколько ограничить практическое применение предлагаемых методов и систем.

- 3) В рамках сформулированного принципа синтезированного оптимального управления на втором этапе в разделе 2.2.2 предполагается нахождение оптимального расположения значения координат точки устойчивости для каждого заданного интервала времени управления. Следовало бы рассмотреть вопрос определения количества требуемых интервалов, влияние параметров разбиения на значение критерия качества.
- 4) Для поиска оптимального расположения точек равновесия автор использует в основном эволюционные и популяционные алгоритмы, не имеющие строго обоснования сходимости, поэтому следовало бы говорить в данном контексте о субоптимальных решениях. Предложенные автором методы структурно-параметрического синтеза также в основе оптимизационного поиска используют эволюционный генетический алгоритм, требующий дополнительных обоснований, что найденное решение является оптимальным.

2. Пакшин Павел Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики Арзамасского политехнического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Отзыв оппонента **положительный**. Про недостатки диссертации отмечено следующее:

- 1) Выглядит несколько странно, что при анализе литературы не упомянута широко известная монография Я.З. Цыпкина "Адаптация и обучение в автоматических системах" - М.: Наука, 1968, тесно связанная с темой диссертационного исследования. Несмотря на почтенный возраст этой книги, многие изложенные в ней идеи не устарели и по сей день.
- 2) Теоретическая часть работы, связанная с исследованием введенного свойства реализуемости, которым должна обладать модель объекта управления, чтобы расчетные значения по модели не расходились бы с

реальными, требует более глубокой математической проработки. При решении задачи оптимального управления через синтез системы стабилизации как предложено в представленном подходе необходимо дополнительно исследовать вопрос потерь исходного функционала качества в сравнении с исходной задачей. В работе не сделано никаких предположений об ограниченности и непрерывности функционалов, о свойствах функции правых частей объекта управления (равномерность, ограниченность, управляемость).

- 3) Сравнение автором результатов работы, предложенных в третьей главе машинных методов синтеза системы стабилизации с известными подходами, представленными в обзоре методов во второй главе, позволило бы более объективно судить об их теоретической значимости.
- 4) Не акцентировано внимание на реализации предложенного подхода в режиме реального времени с соблюдением условий перерасчета положения точек равновесия на борту объекта.

3. Демидова Лилия Анатольевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет».

Отзыв оппонента **положительный**, имеются следующие замечания по диссертации:

- 1) следовало бы расширить название диссертации, так как из текущего названия не прослеживается идея применения методов машинного обучения для автоматизированного поиска законов управления для робототехнических систем;
- 2) в рамках диссертационного исследования, функция управления (2.26) рассматривается в форме кусочно-постоянной функции времени путем разбиения временного отрезка на интервалы Δt . Но в работе практически

не рассматриваются вопросы исследования интервалов разбиения, их длины и количества, представляющие несомненный интерес.

- 3) из текста диссертации не ясно как следует выбирать базисное решение в предлагаемых методах символьной регрессии, насколько выбор базисного решения влияет на сходимость встроенного алгоритма оптимизации. Следовало бы представить рекомендации по выбору базисного решения, а также по заданию исходного алфавита базисных функций.
- 4) автор предполагает, что в каждый момент времени робот получает достоверную информацию о своем положении. На практике было бы интересно рассмотреть вопрос взаимодействия разрабатываемой системы управления с существующей системой навигации робототехнического объекта.

Ведущая организация — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН) — в своем положительном заключении, подписанном Осиповым Василием Юрьевичем, доктором технических наук, профессором, директором Санкт-петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук», а также Савельевым Антоном Игоревичем, кандидатом технических наук, старшим научным сотрудником, руководителем лаборатории автономных робототехнических систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук», и утвержденном Ронжиным Андреем Леонидовичем, доктором технических наук, профессором РАН, директором Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук, указала:

«Диссертация Е.Ю. Шмалько «Принцип синтезированного оптимального управления в робототехнических системах» является

законченной научно-квалификационной работой. В ней на основании выполненных автором исследований разработана новая методология автоматизированного получения законов управления для робототехнических систем. Предложены новые методы, алгоритмы и комплексы программ для практической реализации такого управления. Диссертация содержит значимые научные результаты в области решения научной проблемы управления робототехническими системами, которые способствуют ускорению процессов разработки систем управления роботами. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности «2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» по пунктам 2, 4 и 7. Требования к оформлению диссертаций выполнены. Диссертация выполнена единолично, имеет внутреннее единство. Результаты работы свидетельствуют о личном вкладе автора в науку.

Диссертационная работа Е.Ю. Шмалько по своей актуальности, новизне, теоретической и научно-практической значимости, достоверности полученных результатов и обоснованности выводов основных научных положений полностью удовлетворяет требованиям к докторским диссертациям, установленным п. 9-11 и 13-14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г., а ее автор Шмалько Елизавета Юрьевна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Диссертационная работа и отзыв на нее рассмотрены и одобрены на расширенном научном семинаре лаборатории автономных робототехнических систем СПб ФИЦ РАН 24 октября 2024 года, протокол №11.

Замечания:

- 1) Замена классических подходов теории управления предлагаемым комплексным подходом позволяет снизить трудоёмкость создания системы управления и расширить сферу его применения. Однако, любая

универсальность расширяет сферу применения и ухудшает качество решения. Известно, например, что генетический алгоритм в общем случае не гарантирует нахождения глобального оптимума. Следовательно, предлагаемый подход обеспечивает создание не оптимальной, а приемлемой для практики системы управления движением робота. Это следовало бы отразить и в названии подхода.

- 2) Для доказательства эффективности следовало бы сопоставить трудоёмкость настройки и согласования ПИД-регуляторов с затратами на реализацию новых информационных технологий.
- 3) Следует признать не вполне удачным название диссертации, которое является слишком узким и касается только первого научного результата. Формулировка решаемой проблемы очень расплывчатая, она перепутана с целью.
- 4) Новизна полученных новых аналитических выражений целевых функций и условий их достижения отражена не явно. При реализации первого этапа управления необходимо исходить из прогнозируемых состояний системы, в противном случае из-за задержек по выработке управляющих решений для обеспечения устойчивости относительно точки равновесия могут возникать ошибки.
- 5) В автореферате не четко отражены результаты повышения уровня автоматизации выработки оптимальных управлений робототехническими системами на основе разработки и применения новых принципов, моделей, методов и алгоритмов получения этих управлений.

Соискатель имеет всего более 120 опубликованных научных работ. По теме диссертации соискателем опубликовано 90 научных работ, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, опубликовано 12 работ, включая 10 публикаций в изданиях, отнесенных к категориям К-1 или К-2 из Перечня ВАК, 34 – в научных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus, включая 7 статей в изданиях Q1 и Q2, 1 монография, 15 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Недостовверные сведения об опубликованных соискателем работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, в диссертации отсутствуют. Диссертация не нарушает п. 14 Положения о присуждении ученых степеней. Автор подробно указал личный вклад в опубликованные с соавторами работы.

Наиболее значимые работы Шмалько Е.Ю. по теме диссертации:

1. Diveev A., Shmalko E. Machine Learning Control by Symbolic Regression. Springer, Cham, 2021. – 155 p. (монография, Scopus)
2. Shmalko E. Computational Approach to Optimal Control in Applied Robotics // In: Ronzhin, A., Pshikhopov, V. (eds) Frontiers in Robotics and Electromechanics. Smart Innovation, Systems and Technologies. Springer, Singapore – 2023. – vol. 329. – pp. 387-401. (Scopus)
3. Шмалько Е.Ю. Машинно синтезированное управление нелинейным динамическим объектом на основе оптимального расположения точек равновесия // Информатика и автоматизация (Труды СПИИРАН). – 2023. – Т. 22. – № 1. – С. 87-109. (К-1, RSCI)
4. Шмалько Е.Ю. Машинное обучение систем управления с обратной связью на базе принципа синтезированного оптимального управления // Надежность и качество сложных систем. – 2023. – № 3 (43). – С. 38-49. (К-2)
5. Diveev, A., Shmalko, E. Adaptive Synthesized Control for Solving the Optimal Control Problem // Mathematics. – 2023. – 11, 4035. (Scopus, WoS, Q1)
6. Diveev A. I., Shmalko E. Y. Machine-Made Synthesis of Stabilization System by Modified Cartesian Genetic Programming. // IEEE Transactions on Cybernetics. – July 2022. – vol. 52. – no. 7. – pp. 6627-6637. (Scopus, WoS, Q1)
7. Diveev A., Shmalko E., Serebrenny V., Zentay P. Fundamentals of synthesized optimal control // Mathematics. – 2021. – 9(1). – pp. 1–18. (Scopus, WoS, Q1)

8. Shmalko E., Diveev A. Extended Statement of the Optimal Control Problem and Machine Learning Approach to Its Solution // Mathematical Problems in Engineering. – 2022. – vol. 2022. – Article ID 1932520. (Scopus, WoS, Q2)
9. Diveev A., Shmalko E. Machine Learning Feedback Control Approach Based on Symbolic Regression for Robotic Systems // Mathematics. – 2022. – 10(21), 4100. (Scopus, WoS, Q1)
10. Shmalko E. Feasibility of Synthesized Optimal Control Approach on Model of Robotic System with Uncertainties. // In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds) Electromechanics and Robotics. Smart Innovation, Systems and Technologies. – Springer, Singapore. – 2022. – vol 232. – pp.131-143. (Scopus)
11. Shmalko E., Diveev A. Control Synthesis as Machine Learning Control by Symbolic Regression Methods // Applied Sciences. – 2021. – 11(12): 5468. (Scopus, WoS, Q2)
12. Diveev A., Shmalko E. Synthesized optimal control based on machine learning // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – 1727(1). – 012006. (Scopus, Q4)
13. Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю., Хуссейн О. Управление квадрокоптером методом сетевого оператора на основе многоточечной стабилизации // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – № 7. – Т.21. – С. 428-438. (К-1, RSCI)
14. Diveev, A., Shmalko, E. Comparison of Direct and Indirect Approaches for Numerical Solution of the Optimal Control Problem by Evolutionary Methods // In: Optimization and Applications. OPTIMA 2019. Communications in Computer and Information Science. – Springer, Cham. – 2020. – vol. 1145. (Scopus, WoS, Q4)
15. Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю. Метод синтезированного оптимального управления для группы роботов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 4 (24). – С.40-47. (К-2)

На автореферат поступило одиннадцать положительных отзывов,
которые подписали:

1. Сидняев Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». В отзыве имеются следующие замечания:

- 1) В работе рассматриваются эволюционные и популяционные алгоритмы оптимизации для определения положения управляющих точек. Другие известные методы, например, на основе градиентного спуска не применяются.
- 2) Представленные в автореферате примеры из области робототехники принимают во внимание только кинематические модели, в то время как важна и динамика. Как работает метод при существенном усложнении модели объекта (и повышении размерности) не оговаривается.

2. Куприянов Михаил Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники, руководитель перспективных проектов, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)». В качестве замечания отмечено, что «из автореферата остается неясным вопрос о сокращении сроков проектирования за счет использования полученных автором результатов».

3. Фомичев Василий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой нелинейных динамических систем и процессов управления факультета ВМК МГУ. По тексту автореферата имеются следующие вопросы:

- 1) Согласно сформулированному принципу синтезированного оптимального управления предложена дискретная форма управления на основе оптимального расположения точек стабилизации. Не ясно,

на сколько предложенная дискретная форма управления ухудшает исходную задачу оптимального управления?

- 2) Для синтеза системы стабилизации используются приближенные численные методы машинного обучения. Каким образом, в таком случае, обосновано достижение устойчивости?
- 3) В разделе 3.7 диссертации представлены разработанные вариационные методы символьной регрессии, которые основаны на применении опорного базисного решения. Какие могут быть выдвинуты требования по формированию базисного решения?

4. Фуртат Игорь Борисович, доктор технических наук, профессор, Главный научный сотрудник ФГБУН «Институт проблем машиноведения Российской академии наук» (ИПМаш РАН). Имеются следующие вопросы:

- 1) Рассматриваемые объекты управления даны в общей форме, например, уравнение (1.1). Для любых ли типов моделей может существовать искомое оптимальное решение с использованием методов машинного обучения?
- 2) В поставленных задачах достигается точная минимизация критерия качества. Каким образом она достигается за счет методов машинного обучения?
- 3) Большинство целей управления должны быть выполнены на конечном заданном интервале времени. Методы машинного обучения применяются в качестве офлайн или онлайн алгоритмов? Если онлайн, то как гарантировать выполнение задачи данным алгоритмом за конечное время?

5. Магид Евгений Аркадьевич, PhD, доцент, заведующий кафедрой «Интеллектуальная робототехника» Казанского (Приволжского) федерального университета. К тексту автореферата имеются следующие замечания:

- 1) Положения научной новизны описаны детально и качественно, но в них не отражены в явном виде отличия от существующих решений.

При этом, отличия в явном виде просматриваются в формулировках основных положений, выносимых на защиту, например, в п.2 «Двухэтапный подход разработки системы управления на основе принципа синтезированного оптимального управления (...) в отличие от общего синтеза является более адаптивным к изменениям условий функционирования».

- 2) Не ясно, разработан ли автором единый пакет по методам символьной регрессии или разработан набор прикладных программ для решения конкретных частных задач?
- 3) Из автореферата не ясно, какие версии ОС ROS и симулятора Gazebo были использованы при реализации программного обеспечения.

6. Оскорбин Николай Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретической кибернетики и прикладной математики ФГБОУ ВО Алтайского государственного университета. «Основное замечание по автореферату и, соответственно, по диссертации по мнению рецензента состоит в неудачном выборе названия работы, которое охватывает лишь предложенный методологический подход к получению законов управления для робототехнических объектов в классе реализуемых систем, но в явном виде не отражает возможности применения методов машинного обучения для автоматизации процесса разработки. При этом по мнению рецензента разработанные в диссертации методы машинного обучения на основе символьной регрессии и эволюционных алгоритмов являются весомым достоинством диссертационного исследования.»

7. Затучный Дмитрий Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Вычислительных машин, комплексов, систем и сетей» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА). В качестве замечания указано, что «Несмотря на все преимущества автоматизации процесса синтеза систем регулирования и стабилизации, хотелось бы увидеть сравнительные результаты испытаний систем управления, полученных с помощью

предлагаемых соискателем подходов машинного обучения и наиболее распространенных классических регуляторов типа ПИ или ПИД.»

8. Юрков Николай Кондратьевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет». В качестве недостатков отмечено следующее:

- 1) В автореферате представлены результаты исследования влияния неопределенностей при введенных возмущениях в модели b и в начальных условиях b_0 , как предполагается представленных в виде аддитивного шума. Однако, в самом тексте автореферата данное предположение неочевидно и следовало бы привести соответствующие математические выражения для более ясного понимания.
- 2) Так же представлялось бы интересным рассмотреть вопросы надежности и качества функционирования разрабатываемых систем управления в случае влияния неточностей параметров модели при использовании предлагаемых подходов на основе машинного обучения.
- 3) Следовало бы рассмотреть вопросы вычислительной сложности предложенных методов машинного обучения в зависимости от сложности объекта управления, а также требования к бортовым вычислителям?

9. Карпенко Анатолий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы автоматизированного проектирования» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». В отзыве указаны следующие замечания:

- 1) недостаточный обзор по эволюционным и популяционным методам, предлагаемым в качестве основных оптимизационных алгоритмов на этапе расчета оптимального расположения управляющих точек равновесия;
- 2) не ясно, чем объясняется выбор конкретных популяционных алгоритмов в решении практических задач;

- 3) отсутствуют четкие рекомендации по выбору базового набора функций в методах символьной регрессии и их «привязке» к решаемой задаче.

10. Захарова Алена Александровна, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. К автореферату имеются следующие замечания:

- 1) Было бы полезным апробировать и сравнить предлагаемый подход к разработке системы управления на более универсальных и широко распространенных моделях реальных роботов, в частности, таких моделей как Khepera, Roomba и др. для робота с дифференциальной схемой управления, как рассматривается в разделе 4.1.
- 2) Для того чтобы исполнить задачи, сформулированные в Определениях 2 и 3, следовало бы сделать предположение о наблюдаемости объекта.
- 3) В автореферате отсутствует обоснование выбора того или иного метода машинного обучения для синтеза системы стабилизации объекта управления.

11. Становов Владимир Вадимович, кандидат технических наук, доцент, кафедра высшей математики ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий им. Академика М.Ф. Решетнева». В качестве замечания отмечено, что «предложенные эволюционные методы хотя и демонстрируют высокую эффективность недостаточно обоснованы в рамках работы, в примерах не указан сам процесс сходимости и время сходимости».

Имеется 4 акта о внедрении результатов диссертации, полученных от следующих организаций: Инжиниринговый центр «Автоматика и робототехника МГТУ им. Н.Э. Баумана», ФАУ ЦАГИ, ООО «Научно-производственное объединение НаукаСофт», АО «ВПК «НПО Машиностроения».

Выбор официальных оппонентов обосновывается их компетентностью в области теории управления, робототехники, вычислительной математики, методов оптимизации и машинного обучения, что подтверждается их исследованиями и публикациями в высокорейтинговых научных журналах. **Выбор ведущей организации** основан на том, что СПб ФИЦ РАН является одним из ведущих отечественных научных учреждений в области интеллектуальных систем автоматизации и информационных технологий, в котором работают специалисты в области управления, численных методов, математического моделирования и робототехники.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **сформулирован** новый принцип синтезированного оптимального управления. Согласно предложенному подходу, решение задачи оптимального управления производится для объекта, стабилизированного относительно точки равновесия в пространстве состояний, что позволяет автоматизировать процесс создания систем управления за счет внедрения универсальных технологий машинного обучения при использовании классических формулировок задач управления;

- **предложен** подход двухэтапной реализации принципа синтезированного оптимального управления, когда первоначально решается задача синтеза управления, чтобы обеспечить стабилизацию робототехнического объекта относительно точки в пространстве состояний, а затем решается задача оптимального управления за счет изменения положения устойчивой точки равновесия;

- **представлено** обоснование применения принципа синтезированного управления для получения решения задачи оптимального управления, обладающего свойством реализуемости за счет обеспечения в каждый момент времени существования у объекта устойчивой точки равновесия;

– **разработаны** численные методы реализации этапов синтезированного оптимального управления. На первом этапе для решения задачи синтеза системы стабилизации объекта управления используется машинное обучение управления методами символьной регрессии. На втором этапе решается задача оптимального размещения точек равновесия, для которой применяются эволюционные алгоритмы. Представленные подходы позволяют гарантированно получать решения, близкие к оптимальным, даже в задачах со сложным пространством поиска. Разработанные численные методы расчета синтезированного оптимального управления являются универсальными, не зависят от типа модели объекта управления и целевого функционала, что обеспечивает автоматизацию процесса построения реализуемой системы управления, причем задача оптимального размещения точек равновесия может решаться в режиме реального времени;

– **разработаны** новые вариационные методы машинного обучения управления на основе символьной регрессии для реализации этапа синтеза системы стабилизации в рамках принципа синтезированного оптимального управления. Методы позволяют находить и структуру, и параметры математического выражения функции управления, в отличие от известных подходов, когда структура функции задана и определяются только параметры; **предложены** уникальные типы малых вариаций и способы их кодирования; **разработана** многослойная конструкция метода символьной регрессии, **разработаны** программные комплексы реализации методов.

– **созданы** программные комплексы расчета синтезированного оптимального управления, на основе разработанных алгоритмов машинного обучения для решения задач управления робототехническими системами;

– **представлены** разработанные системы управления в различных задачах управления робототехническими устройствами, такие как управление мобильным роботом в условиях фазовых ограничений, группой мобильных роботов, управление движением квадрокоптера и группы квадрокоптеров в задаче совместного взаимодействия. Представленные решения задач

демонстрируют эффективность предложенного подхода при автоматической разработке систем управления. Преимущества разработанного подхода состоят в том, что все этапы разработки реализуются автоматически на ЭВМ, исходя из сформулированной математической постановки задачи, подход является универсальным и не привязан к типу модели или функционала качества. Экспериментально показана эффективность предложенного подхода при наличии неопределенностей моделей и начальных условий.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- **разработан** методологический подход синтезированного оптимального управления, который позволяет разрабатывать законы управления для робототехнических систем на основе формализованных математических постановок с учетом критерия оптимальности и обладающие свойством реализуемости;

- **сформулированы** постановки задач управления в терминах функционала качества, решаемые в робототехнике.

- **предложено** обоснование обеспечения свойства реализуемости, согласно которому ошибка состояния объекта по модели не увеличивается более, чем на заданную величину на интервале времени, для систем управления, полученных на основе использования принципа синтезированного оптимального управления;

- **разработаны** численные методы на основе интеллектуальных алгоритмов эволюционного машинного обучения, которые позволяют автоматизировать процесс разработки законов управления.

Значение полученных результатов исследования **для практики** подтверждается тем, что разработанные подходы и алгоритмы на их основе, а также созданные комплексы программ, применены для решения различных задач управления робототехническими системами, экспериментально для различных робототехнических объектов продемонстрирована их эффективность, при этом предложенные подходы могут использоваться для решения ряда актуальных практических и исследовательских задач

управления не только в робототехнике, а так же и в других областях науки и техники, включая широкий класс задач отыскания формульного описания функциональных зависимостей. Разработанный математический и программный аппарат применен для решения сложных задач управления робототехническими системами в рамках проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 075-15-2024-544 «Математические модели и численные методы как основа для разработки робототехнических комплексов, новых материалов и интеллектуальных технологий конструирования».

Достоверность представленных результатов диссертационного исследования, подтверждается соответствием полученных теоретических и экспериментальных результатов, проводимых как на математических моделях, так и на опытных образцах Роботоцентра ФИЦ ИУ РАН, а также экспертизой научных статей, опубликованных в ведущих научных российских и международных изданиях, апробацией и обсуждением результатов на международных и российских научных конференциях и семинарах.

В работах, опубликованных в соавторстве, **личный вклад** соискателя является определяющим. Соискателю принадлежит разработка принципа синтезированного оптимального управления, математическая постановка задач двух этапов подхода, соискателем предложены и исследованы численные методы реализации принципа синтезированного оптимального управления, предложены способы реализации принципа вариаций базисного решения для различных методов символьной регрессии, предложен подход многослойной структуры, разработаны программные модули для реализации предложенных методов, проведены исследования эффективности методов для решения различных задач управления робототехническими системами.

Соискатель Шмалько Е. Ю. ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию, удовлетворившую авторов вопросов.

