

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
«Санкт-Петербургский
Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук»
(СПб ФИЦ РАН)**

14-я линия, д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178
Тел.: (812) 328-33-11, факс: (812) 328-44-50,
e-mail: info@spcras.ru, web: http://www.spcras.ru
ОКПО 04683303, ОГРН 1027800514411,
ИНН/КПП 7801003920/780101001



УТВЕРЖДАЮ

Директор СПб ФИЦ РАН
доктор технических наук,
профессор РАН

Ронжин А.Л.

« 28 » 10 2024 года

« 28 » октября 2024 № 60/01-01-01/766

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Шмалько Елизаветы Юрьевны

**«Принцип синтезированного оптимального управления в
робототехнических системах»**, представленной на соискание ученой
степени доктора технических наук по специальности 2.3.1 – «Системный
анализ, управление и обработка информации, статистика»

Актуальность. Диссертационное исследование Шмалько Е.Ю. посвящено решению научно-технической проблемы получения реализуемых на практике оптимальных управлений робототехническими системами в автоматизированном режиме с помощью машинного обучения управлению. В работе обосновывается сложность программной реализации классической теории управления движением роботизированной системы по причине многообразия воздействующих на неё факторов, обуславливая необходимость разработки новых адаптивных подходов. При этом исследователь рассматривает возможности автоматизации процесса разработки за счет применения современных информационных технологий, что способствует

ускорению процессов разработки и отвечает современным тенденциям универсализации подходов.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что предложена новая методология управления робототехническими системами на основе машинного обучения. Согласно предложенной методологии, решение задачи оптимального управления производится для объекта, стабилизированного относительно точки равновесия в пространстве состояний. Предусматривается двухэтапная реализация синтезированного оптимального управления в робототехнических системах. Первоначально решается задача синтеза управления, чтобы обеспечить стабилизацию робототехнического объекта относительно точки в пространстве состояний, а затем решается задача оптимального управления. Управление на этом этапе реализуется за счет изменения положения устойчивой точки равновесия. Разработаны оригинальные модели, методы и алгоритмы реализации управлений этими системами, позволяющие существенно снизить трудоемкость создания систем управления и расширить сферу применения. Разработка законов управления робототехническими объектами происходит автоматически. Для решения задачи синтеза управления и обеспечения устойчивости объекта используется машинное обучение методом символьной регрессии. Предложены новые вариационные методы такого обучения. Для решения задачи глобальной оптимизации при определении оптимального положения точек равновесия применяются специально отобранные эволюционные алгоритмы.

Теоретическая значимость исследования состоит в развитии теории синтезированного оптимального управления робототехническими системами на основе машинного обучения, в разработке новых моделей, методов и алгоритмов управления.

Практическая значимость заключается в реальной возможности повышения эффективности управления робототехническими системами на основе применения полученных новых научных результатов.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертации соискателя опубликованы в 90 научных работах, из них 1 монография, опубликованная в международном издательстве Springer, 12 публикаций в изданиях, включенных в перечень рецензируемых журналов, рекомендованных ВАК, 34 работы в научных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus, включая 7 статей в журналах Q1 и Q2 квартиля. Это соответствует требованиям п.13 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в ред. Постановления Правительства РФ от 16.10.2024 № 1382). Для публикаций в соавторстве в диссертации описан личный вклад автора. Предложенный автором подход и алгоритмы прошли успешную апробацию на ряде научно-практических конференций и семинаров.

Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается тем, что разработанная методология, модели и методы проверялись с помощью многочисленных вычислительных экспериментов для решения различных прикладных задач, что подтверждается представленным программным инструментарием, реализованы в среде имитационного моделирования, а затем проходили апробацию на реальных робототехнических системах. Полученные 15 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ подтверждают оригинальность и новизну предложенных решений и подходов в области машинного обучения систем управления.

Анализ содержания диссертационного исследования.

Диссертационная работа Е.Ю. Шмалько состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 236 наименований и трех приложений. Диссертация содержит 316 страниц текста, включает 5 таблиц и 70 рисунков.

Во введении отражены актуальность обозначенной темы, основные полученные и выносимые на защиту результаты, их новизна, теоретическая и практическая значимость.

Первая глава посвящена изложению результатов аналитического анализа подходов классической теории оптимальных систем управления с точки зрения их практической реализации для робототехнических объектов. В диссертации представлены формальные постановки разнообразных задач оптимального управления в робототехнике, которые могут включать различные сложные фазовые ограничения, задачи с групповым взаимодействием роботов, а также с различными критериями качества управления. Автор рассматривает основные подходы к решению задачи оптимального управления, связанные с применением принципа максимума Понтрягина и прямого подхода на основе кусочно-полиномиальной аппроксимации функции управления, а также методы решения задачи синтеза управления. Автор обосновано указывает на проблемы реализации существующих классических подходов в виду сложности получения решений в задачах с нелинейными моделями описания объектов управления, с большим количеством фазовых ограничений и, самое главное, в виду изменчивости среды функционирования и необходимости пересчета полученных законов управления. В этой связи, как отмечается в диссертационной работе, разработчики робототехнических комплексов часто не формулируют решаемые задачи, как задачи оптимального управления в виду сложности их описания и отсутствию универсальных подходов к их решению. Данное обстоятельство подтверждает актуальность диссертационного исследования и необходимость разработки современных адаптивных численных подходов.

Вторая глава посвящена изложению и обоснованию предложенной методологии синтезированного оптимального управления, названной принципом такого управления. Основная идея заключается в том, что оптимальный режим управления определяется после решения задачи синтеза системы стабилизации, поэтому подход назван синтезированным управлением. Далее задача оптимального управления переводится в задачу конечномерной оптимизации множества устойчивых точек равновесия, отражающих стабильность управления.

В работе представлены обоснования, что предложенная методология позволяет получать законы управления, удовлетворяющие введенному свойству реализуемости. Реализация осуществляется путем последовательного решения сначала задачи синтеза системы стабилизации, а затем задачи оптимизации положения точек равновесия. Предполагается, что в рамках предложенной методологии можно использовать уже известные аналитические и численные методы, обзор которых представлен во второй главе, а можно применять и современные методы машинного обучения, которые позволят автоматизировать процесс нахождения искомых функций управления.

Применение методов машинного обучения открывает широкие перспективы с точки зрения решения тех задач, которые раньше считались трудно разрешимыми. *В третьей главе* диссертационного исследования подробно рассматриваются данные методы и представлены результаты, достигнутые с помощью применения данных методов в расчетах управлений для различных технических задач.

Второй этап предполагает нахождение оптимального расположения точек равновесия с помощью методов глобальной оптимизации. Рассмотрены как существующие подходы, так и предложены новые гибридные алгоритмы на основе эволюционных подходов.

Большой блок в третьей главе диссертационного исследования посвящен разработанным автором методам символьной регрессии, которые представляют большой интерес с точки зрения решения задач синтеза управления. Данный класс методов машинного обучения позволяет осуществлять структурно-параметрический поиск функций управления без построения обучающей выборки, что в задачах управления имеет большую актуальность в виду сложности получения достаточных объемов обучающей выборки. По этой причине данные методы представляют альтернативу распространенным методам искусственных нейронных сетей, расширяя возможности применения методов машинного обучения, что представляет

большой научно-исследовательский интерес не только в области управления, но и в других областях знаний, где требуется реализовать поиск неизвестных функций с заранее неизвестной структурой.

Четвертая глава диссертации посвящена решению различных прикладных задач на основе предложенной методологии. Представлены решения таких задач управления робототехническими системами, как управление мобильным роботом с дифференциальным приводом в условиях фазовых ограничений, задача управления гомогенной группой мобильных роботов с фазовыми ограничениями, задача управления для робота с всенаправленными механум колесами, задачи управления движением квадрокоптера и группы квадрокоптеров в задаче совместного взаимодействия. Представленные решения задач демонстрируют эффективность предложенного подхода к автоматической разработке систем управления на основе принципа синтезированного оптимального управления.

Преимущества такого подхода состоят в том, что все этапы разработки реализуются автоматически на ЭВМ, исходя из сформулированной математической постановки задач. Подход является универсальным и не ограничивается определенными типами моделей объектов управления или функционалов качества управления.

Апробация рассмотренных задач проводилась не только на уровне вычислительных экспериментов, но и на реальных робототехнических системах.

В заключении обобщаются основные результаты диссертационной работы и сформулированы итоги проведенных исследований.

Автореферат в полной мере отражает содержание и основные положения диссертационного исследования. Текст диссертации и автореферата оформлен аккуратно и хорошо структурирован, язык и стиль соответствуют принятым в научно-технической литературе нормам.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты диссертационного исследования, направленные на автоматизированное получение законов управления робототехническими системами на основе современных технологий машинного обучения, нашли свое применение в исследованиях, проводимых в Роботоцентре ФИЦ ИУ РАН по государственному заданию № 0063-2019-0010, были использованы в Инжиниринговом центре «Автоматика и робототехника МГТУ им. Н.Э. Баумана» в части реализации системы управления автономным движением мобильных комплексов, в ФАУ ЦАГИ в части исследований по обеспечению устойчивого автономного движения БЛА в условиях случайных помех, в ООО «Научно-производственное объединение НаукаСофт» в части реализации системы управления автономным движением беспилотного радиолокационного комплекса, АО «ВПК «НПО Машиностроения» при проведении ряда исследований в части эффективного функционирования беспилотных аэрокосмических систем, о чем свидетельствуют представленные акты о внедрении результатов диссертационного исследования.

Разработанная методология, модели, методы, алгоритмы и программные комплексы реализации могут быть полезны для технических инновационных компаний и лабораторий, занимающихся разработкой систем управления движением робототехнических комплексов, в частности в ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, а также могут быть включены в курсы лекций и использованы при организации практических занятий по современным методам теории управления в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого, Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения и других ВУЗах.

Замечания по диссертационной работе

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.

В целом, в работе есть значимые научные результаты и указанные замечания не влияют на высокую оценку диссертации.

Заключение.

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., № 842, 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. Присутствовало на заседании 10 человек.

Результаты голосования: «за» – 10 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.

Директор Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук Федерального государственного бюджетного

учреждения науки «Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук»,

доктор технических наук,

профессор

Осипов Василий Юрьевич

Старший научный сотрудник, руководитель лаборатории автономных робототехнических систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук»,

кандидат технических наук,

Савельев Антон Игоревич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН)
199178, Санкт-Петербург, В.О., 14 линия, д. 39. Тел. 8 (812) 328-33-11, факс 328-44-50, E-mail: info@spcras.ru,

Адрес официального сайта: <https://spcras.ru>

«Я, Ронжин Андрей Леонидович, директор СПб ФИЦ РАН даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.224.01 и их дальнейшую обработку»

доктор технических наук, профессор РАН

Ронжин Андрей Леонидович

«Я, Осипов Василий Юрьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.224.01 и их дальнейшую обработку»

доктор технических наук, профессор

Осипов Василий Юрьевич

Я, Савельев Антон Игоревич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.224.01 и их дальнейшую обработку

кандидат технических наук

Савельев Антон Игоревич