

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.224.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ»
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА
НАУК

Аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета 24.1.224.03 от 25 декабря 2025 г. № 18

О присуждении Дарьиной Анне Николаевне, гражданке Российской Федерации, учёной степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Методы решения задач оптимального управления с фазовыми ограничениями, возникающими в робототехнике» по специальности 1.2.3 «Теоретическая информатика, кибернетика» принята к защите 18 сентября 2025 г., протокол №8, диссертационным советом 24.1.224.03, 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 № 1732/нк от 13.12.2022.

Соискатель Дарьина Анна Николаевна, дата рождения 10.05.1979 г., в 2002 году закончила Российский университет дружбы народов по специальности «Прикладная математика и информатика». Диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук «Ньютоновские методы решения смешанных комплементарных задач» защитила в 2005 году в диссертационном совете факультета Вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. В настоящее время работает доцентом кафедры исследования операций факультета ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова и по совместительству старшим научным сотрудником отдела №55 (управления робототехническими устройствами) ФИЦ ИУ РАН.

Диссертация выполнена в отделе № 55 ФИЦ ИУ РАН.

Научный консультант – Карамзин Дмитрий Юрьевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела № 55 ФИЦ ИУ РАН.

Официальные оппоненты:

1. Бекларян Лева Андреевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории динамических моделей экономики и оптимизации Центрального экономико-математического института Российской академии наук;

2. Пакшин Павел Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики Арзамасского политехнического института (филиала) ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»;

3. Масина Ольга Николаевна, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры математического моделирования, компьютерных технологий и информационной безопасности ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» – в своем положительном отзыве, подписанном Неусыпиным Константином Авенировичем, доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой системы автоматического управления, указала:

Результаты диссертации нашли применение в учебном процессе и научных проектах, реализуемых в МГУ имени М.В. Ломоносова. А также могут быть использованы в образовательном процессе, в том числе в рамках магистерских и аспирантских программ по направлениям «Робототехника», «Интеллектуальные системы управления» и «Прикладная математика».

Разработанные программные модули и алгоритмы могут быть интегрированы в существующие ROS/ROS2-стеки и использованы при создании автономных наземных транспортных средств нового поколения.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.2.3 – «Теоретическая информатика, кибернетика» по пунктам 6 и 9. В отзыве ведущей организации отмечается, что диссертация Дарьиной А.Н. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена

научная проблема – получение точного решения задачи оптимального управления с фазовыми ограничениями, применительно к мобильному роботу, с целью последующего использования этого решения для управления роботом в режиме реального времени и в робототехнических системах нового поколения; внедрение результатов работы вносит значительный вклад в развитие образовательного процесса, а ее автор, Дарьина Анна Николаевна, заслуживает присуждения искомой учёной степени.

Соискатель имеет 98 опубликованных научных работ. По теме диссертации соискателем опубликовано 29 работ, из них 7 публикаций в научных изданиях из Перечня ВАК (отнесенных к категориям К-1 или К-2), 10 публикаций в изданиях, индексируемых в БД Scopus и Web of Science.

Недостовверные сведения об опубликованных соискателем работах в диссертации отсутствуют. Диссертация соответствует п. 14 Положения о присуждении учёных степеней. Автор подробно указал личный вклад в опубликованные с соавторами работы.

Наиболее значимые работы Дарьиной А.Н. по теме диссертации:

1. Дарьина А.Н., Дивеев А.И., Карамзин Д.Ю., Перейра Ф.Л., Софронова Е.А., Чертовских Р.А. Регулярные аппроксимации наибыстрейшего движения мобильного робота при ограниченных фазовых координатах // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2022. Т. 62. № 9. С. 1564-1584. (К-2, RSCI)

2. Белотелов В.Н., Дарьина А.Н. Метод поиска касательных в задаче быстродействия для колесного мобильного робота // Компьютерные исследования и моделирование. 2025. Т. 17. № 3. С. 401-421. (К-1, RSCI)

3. Дарьина А.Н., Прокопьев И.В. Метод активной одновременной локализации и картографирования на основе модели прогнозирующего интегрального пути для мобильных роботов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2021. Т. 23. № 6. С. 12-23. (К-2)

4. Chertovskih R.A., Daryina A.N., Karamzin D.Yu., Pereira F.L. On some regularization of the control problem for a tracked mobile robot in a steady flow field under state constraints // IFAC-Papers OnLine, 2022, 55(16), pp. 226-230. (Scopus, WoS, Q3)

5. Дарьина А.Н., Прокопьев И.В. Метод нейросетевого управления в реальном времени на основе синтеза функции выбора // Надежность и качество сложных систем. 2019. Т. 28. № 4. С. 41-50. (К-2)

6. Дарьина А.Н., Прокопьев И.В. Метод оптимизации параметров контроллера беспилотного транспортного средства на основе оптимизации роя частиц // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3 (31). С. 80-87. (К-2)
7. Дарьина А.Н., Прокопьев И.В. Отказоустойчивые системы управления динамическими объектами специального назначения // Надежность и качество сложных систем. 2022. №4. С. 82-88. (К-2)
8. Дарьина А.Н., Прокопьев И.В. Синтез живучих робототехнических систем управления с переменной структурой // Научные технологии. 2016. Т. 17. № 6. С. 16-20. (К-3)
9. Pereira F.L., Chertovskih R., Daryina A., Diveev A., Karamzin D., Sofronova E. A Regularization Approach to Analyze the Time-Optimal Motion of a Mobile Robot under State Constraints using Pontryagin's Maximum Principle // Procedia Computer Science, 2021, 186, pp. 11-20. (Scopus)
10. Daryina A.N., Prokopiev I.V. Unmanned vehicle's control real-time method based on neural network and selection function // Procedia Computer Science, 2021, 186, pp. 217-226. (Scopus, WoS)
11. Daryina A.N., Prokopiev I.V. Active Simultaneous Localization and Mapping Method Based on Model Prediction // Engineering Proceedings. 2023, 33(1), 16. (Scopus, WoS, Q3)

На автореферат и диссертацию дали положительные отзывы:

1. Воронина Вера Эдуардовна, кандидат физико-математических наук, доцент Института Экономики и Управления в Промышленности. В отзыве имеется следующее замечание:

• в автореферате недостаточно подробно раскрыты условия сходимости предложенных регуляризованных алгоритмов. В частности, отсутствует строгое обоснование скорости сходимости решений ε -задач к решению исходной задачи при $\varepsilon \rightarrow 0$, а также анализ устойчивости получаемых экстремалей по отношению к возмущениям начальных данных и параметров модели.

2. Фомичев Василий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой нелинейных динамических систем и процессов управления факультета ВМК МГУ. В отзыве имеются следующие замечания:

– Несмотря на то, что в работе формулируются условия 2-регулярности фазовых ограничений и доказываются леммы о непрерывности множителя

Лагранжа, не предложен явный алгоритм, позволяющий проверять выполнение этих условий для произвольной нелинейной системы.

– Не описаны ситуации, при которых предложенные подходы могут оказаться неприменимыми или привести к недостаточно точным решениям.

3. Ильин Александр Владимирович, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры нелинейных динамических систем и процессов управления МГУ имени М.В. Ломоносова. В отзыве имеются следующие замечания:

– в автореферате не указаны параметры сходимости итерационных процедур, критерии останова, а также оценки погрешности аппроксимации;

– отсутствует информация о программной реализации: используемые библиотеки, язык программирования, возможность воспроизведения результатов.

4. Бецков Александр Викторович, доктор технических наук, доцент, начальник кафедры информационных технологий ФГКОУ ВО «Ордена Трудового Красного Знамени» Академии управления МВД России. Имеются следующие замечания:

• Работа демонстрирует успешное применение методов на плоских и частично трёхмерных сценариях, остаётся открытым вопрос масштабируемости предложенных алгоритмов на задачи с большим числом динамических препятствий или в сложных городских условиях, т.е. средах, типичных для применения робототехнических систем в правоохранительной деятельности.

• В автореферате недостаточно раскрыта возможность применения предложенных методов в условиях ограниченной информированности и высокой неопределённости обстановки, характерных для многих практических сценариев правоохранительной деятельности (например, при ликвидации чрезвычайных ситуаций, работе в зонах с ограниченной видимостью или при противодействии дезинформации). Учитывая, что в главе 4 рассматриваются методы адаптации к неопределённостям, было бы целесообразно более чётко обозначить границы применимости разработанных алгоритмов в условиях частичного или неточного знания о конфигурации окружающей среды, что особенно актуально для робототехнических систем специального назначения.

5. Юрков Николай Кондратьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры»

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет». Имеются следующие замечания:

– В экспериментальных разделах автореферата и, судя по описанию, в самой диссертации используется среднеквадратичная ошибка отклонения от эталонной траектории в качестве основной метрики качества. Однако не приведено обоснование выбора именно этой метрики и не обсуждается возможность применения альтернативных критериев оценки, таких как интеграл модуля ошибки, максимум отклонения или другие показатели, более чувствительные к локальным нарушениям ограничений. Это могло бы усилить методологическую проработку сравнительного анализа.

– Несмотря на впечатляющую интеграцию классических и современных подходов, в автореферате недостаточно подробно освещена проблема масштабируемости предложенных методов на задачи с большим числом препятствий или в трёхмерных средах. Учитывая стремление к практическому применению, было бы полезно указать границы применимости разработанных алгоритмов с точки зрения вычислительной сложности и требований к ресурсам бортовых систем.

6. Ганигин Сергей Юрьевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Радиотехнические устройства» ФГАОУ ВО «Самарский государственный технический университет». К тексту автореферата имеются следующие замечания:

- Не приведены теоремы о сходимости и оценке погрешности для численных процедур (например, для метода касательных или ASLAM-MPPI).

- Не указаны случаи, в которых предложенные методы не работают или дают неудовлетворительные результаты.

7. Гасников Александр Владимирович, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, ректор Университета «Иннополис». К тексту автореферата имеются следующие замечания:

– Автореферат не раскрывает детали архитектуры и обучения нейросетевых моделей: выбор функции потерь, методы регуляризации, объём обучающей выборки. Без этих сведений сложно оценить воспроизводимость и надёжность полученных результатов.

– Не ясно моделируются ли типичные для робототехники неопределённости: изменение массы, проскальзывание колёс, задержки в управлении, шумы измерений, динамические препятствия.

8. Вязьмин Андрей Валентинович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии» Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова РТУ МИРЭА. Замечание носит рекомендательный характер.

9. Радионов Андрей Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и управления Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет». В отзыве имеется следующее замечание: в автореферате недостаточно освещены вопросы реализации – требования к вычислительным ресурсам, время выполнения алгоритмов в реальном времени, чувствительность к шуму сенсоров. Эти аспекты критически важны для внедрения разработок в промышленные системы.

10. Кафедра исследования операций факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (ВМК МГУ). Отзыв на диссертацию и автореферат подписан заместителем заведующего кафедрой исследования операций ВМК МГУ доктором физико-математических наук, профессором Васиным Александром Алексеевичем, учёным секретарем кафедры исследования операций ВМК МГУ кандидатом физико-математических наук, доцентом Пospelовой Ириной Игоревной. В отзыве имеются следующие замечания:

а) В главе 4 отсутствует чёткая математическая постановка задачи: не указаны пространства состояний и управлений, класс допустимых управлений, условия гладкости, тип ограничений (неравенства, равенства, смешанные).

б) Не всегда ясно, что именно минимизируется: время, энергия, отклонение от траектории? В разных разделах используются разные критерии, но их сравнительный анализ и обоснование выбора отсутствуют.

Также имеется акт о внедрении результатов диссертации в образовательный процесс, полученный от ВМК МГУ.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их достижениями в области оптимального управления, что подтверждается их исследованиями и публикациями в научных журналах.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– **проведен** теоретический анализ метода регуляризации для задачи оптимального управления с фазовыми ограничениями для мобильных роботов. На основе анализа получены аналитические выражения для меры множителя Лагранжа и разработан алгоритм решения задачи управления мобильным роботом. Данный подход позволил получать точные решения задачи оптимального управления мобильным роботом при наличии фазовых ограничений. Точные решения использовались при построении управления в режиме реального времени как «ядро» управления, а методы машинного обучения – как слой адаптации и устойчивости к неопределённостям.

– **разработан, теоретически обоснован и численно проверен** метод стрельбы для нахождения решения задачи о перемещении мобильного робота при фазовых ограничениях глубины 2. Метод применялся к задаче с динамикой управления ньютоновского типа. Предложенный метод **позволил** находить точные решения, которые впоследствии использовались для улучшения структуры пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора, применяемого при нахождении траекторий мобильного робота в режиме реального времени.

– **разработан** метод поиска касательных, которые используются в принципе разделения траекторий на прямолинейные участки и движение по границе фазового ограничения для поиска моментов переключения между разными видами траекторий. Идея заключалась в построении графа вершинами, которого были точки переключения, а ребрами -- траектории. Метод позволил находить оптимальную траекторию при наличии большого количества препятствий. Проведено теоретическое исследование и обоснование метода.

– **предложены** подходы к решению задачи оптимального управления с фазовыми ограничениями для нелинейных робототехнических систем, включающих новые методы формирования допустимых траекторий движения, учитывающих ограничения на обобщенные координаты, скорости, ускорения и управляющие воздействия. В отличие от существующих решений, предложенные методы обеспечивают высокую точность управления и устойчивость при снижении вычислительной сложности за счёт использования адаптивных стратегий прогнозирования и коррекции траектории.

– **разработаны** новые методы интеграции управления с технологиями машинного обучения и восприятия окружающей среды, что позволило реализовать адаптивное поведение робота в условиях частичной информации о

состоянии объекта и внешней среды: новый метод идентификации модели мобильного робота, метод генерации траекторий с помощью нейронных сетей и метод определения функции выбора интегрального управления на основе сгенерированной траектории с помощью модели с использованием адаптивного функционала. Это дало возможность повысить автономность и устойчивость робототехнических систем при выполнении задач в неструктурированных условиях.

– **создан** гибридный алгоритм, который с помощью модифицированного метода модели предиктивного управления, предлагает новую структуру функции выбора для учета оптимального управления, а с помощью метода одновременной локализации и картографии использует навигационную информацию. Этот метод ориентирован на реальное время и ограниченные вычислительные ресурсы бортовых контроллеров роботов, но позволяет учитывать фазовые ограничения, обеспечивая при этом гладкость переходных процессов и минимизацию энергетических затрат.

Теоретическая значимость обусловлена полученными в работе новыми методами, изложенными в главах 1, 2, 3, теоретически обоснованными, которые можно применять к различным моделям мобильных роботов. Кроме того, метод регуляризации, представленный в главе 1, может быть модифицирован многими новыми способами. Полученное методом регуляризации точное решение используется как «эталон» для методов машинного обучения. Рассмотренный в главе 2 метод стрельбы также дает точное решение задачи ньютоновского типа, которое служит «эталоном» для ПИД-регулятора.

Практическая значимость заключается в возможности использования на реальных роботах для планирования в режиме реального времени передвижения по местности с препятствиями. Материалы диссертационной работы используются в образовательном процессе.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается совпадением теоретических выводов и экспериментальных данных, полученных на математических моделях и опытных образцах в Робототехническом центре ФИЦ ИУ РАН, а также подтверждается экспертизой научных статей, опубликованных в ведущих научных российских и международных изданиях, апробацией и обсуждением результатов на международных и российских научных конференциях и семинарах.

Личный вклад соискателя в основные результаты работы является определяющим. Все положения, выносимые на защиту, изложенные в диссертации, принадлежат лично автору. Автором сформированы направления исследования, теоретические обоснования, проведен вывод формул для вычислений, выполнена программная реализация, и проведен выбор экспериментальных задач и проведены вычислительные эксперименты. Автору принадлежит математическая формализация методов, проведение численных экспериментов для выбора наиболее подходящего метода, подбор параметров для практических экспериментов, непосредственное участие в проведении экспериментов, анализ полученных результатов. Автор принимал участие в разработке метода регуляризации и доказательстве ключевой теоремы, лично выводил формулы, необходимые для построения алгоритма, проводил численные эксперименты с предложенным методом. Автору принадлежит развитие метода разделения траекторий.

В ходе защиты диссертации были заданы вопросы, уточняющие главные результаты диссертации и используемые обозначения и термины. Был высказан ряд замечаний, в частности следующие:

1. В докладе приводятся условия 2-регулярности фазовых ограничений и доказываются леммы о непрерывности множителя Лагранжа. Был ли разработан четкий алгоритм проверки этих условий для произвольной нелинейной системы?

2. На слайде 21 было сказано о добавлении малого кинетического воздействия. Какова природа этого воздействия? Чего мы добиваемся за счёт его введения?

3. Из доклада следует, что эксперименты проводились преимущественно на полигонах с искусственными препятствиями (окружности, линии). Проводилось ли тестирование методов на более сложных, неструктурированных средах (например, лесистая местность, городская застройка с шумными сенсорами), чтобы продемонстрировать робастность методов в условиях высокой неопределенности?

4. Термины «фазовые ограничения глубины 2», «препятствия», «фазовые переменные» используются как синонимы, хотя в теории оптимального управления они имеют разный смысл. Поясните.

Соискатель Дарьина А.Н. ответила на задаваемые ей вопросы и привела собственную аргументацию, удовлетворившую авторов вопросов.

