

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и цифровому развитию,
д.э.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана

П.А. Дроговоз

« 28 » октября 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Дарьиной Анны Николаевны «Методы решения задач оптимального управления с фазовыми ограничениями, возникающими в робототехнике», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.3 – «Теоретическая информатика, кибернетика»

Диссертационная работа А.Н. Дарьиной посвящена актуальной и фундаментально значимой научной проблеме – разработке теоретически обоснованных и практически применимых методов решения задач оптимального управления мобильными роботами при наличии фазовых ограничений.

Актуальность диссертационной работы

Актуальность темы обусловлена стремительным развитием автономных систем, где обеспечение безопасного, эффективного и оптимального движения в условиях жестких фазовых и управляющих ограничений становится критически важной задачей. Автор предложены оригинальные подходы к решению ряда сложных задач, включая регуляризацию нерегулярных задач, разработку численных алгоритмов стрельбы, методов поиска касательных и синтеза адаптивных систем управления в реальном времени.

Новизна и достоверность исследования и полученных результатов

1. Проведен теоретический анализ метода регуляризации для задачи оптимального управления с фазовыми ограничениями для мобильных роботов. На основе анализа разработан алгоритм решения задачи управления мобильным роботом. С помощью данного метода получены точные решения задачи оптимального управления мобильным роботом при наличии фазовых ограничений, которые использовались при построении управления в режиме реального времени.

2. Разработан, теоретически обоснован и численно проверен метод стрельбы для нахождения решения задачи с динамикой управления ньютоновского типа.

3. Разработан принцип деления траекторий на прямолинейные участки и участки движения по границе фазового ограничения. Разработан метод поиска касательных, которые используются в принципе деления траекторий для поиска моментов переключения между разными видами траекторий.

4. 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.

5. Разработан гибридный алгоритм, предназначенный для работы в реальном времени на бортовых контроллерах роботов с ограниченными вычислительными ресурсами, способный учитывать фазовые ограничения.

Достоверность результатов подтверждается:

- строгими математическими доказательствами;
- соответствием теоретических и численных результатов;
- успешной экспериментальной апробацией на реальных роботах;
- публикациями в ведущих рецензируемых научных журналах и докладами на международных конференциях.

Значимость полученных результатов

Теоретическая значимость работы обусловлена разработкой и строгим обоснованием новых подходов к решению неклассических задач оптимального управления, в которых нарушены стандартные условия регулярности. В частности, предложенный метод ε -регуляризации позволяет корректно применять принцип максимума Понтрягина даже в случаях, когда траектория касается границы фазового ограничения и множитель Лагранжа приобретает сингулярную компоненту. Это решение имеет фундаментальное значение не только для робототехники, но и для всей теории экстремальных задач с фазовыми ограничениями.

Практическая значимость подтверждена как имитационным, так и натурным моделированием. Автором разработаны и реализованы алгоритмы для широкого спектра моделей мобильных роботов – от кинематических унициклических систем до динамических моделей с ньютоновской динамикой и гусеничным приводом. Следует отметить результативную интеграцию точных аналитических решений с современными методами машинного обучения, SLAM и эволюционных вычислений (сетевой оператор), что позволило создать гибридные архитектуры управления, пригодные для работы в реальном времени на бортовых вычислителях (NVIDIA Jetson/Xavier).

Инновационность и междисциплинарность исследования заслуживают особого внимания. Работа органично объединяет методы теории управления, вычислительной математики, теории графов, нейросетевого моделирования и компьютерного зрения. Предложенный метод ASLAM-MPPI, сочетающий активное SLAM и стохастическую оптимизацию траекторий, продемонстрировал высокую надёжность в сложных условиях – включая прохождение участка с подъёмом, где традиционные методы локализации часто терпят неудачу. Средняя абсолютная ошибка траектории составила всего 0,99%.

Рекомендации по использованию результатов, полученных в диссертации

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.

Характеристика содержания диссертации

Работа имеет четкую структуру, логически выстроенное изложение, подкрепленное обширным экспериментальным и программным материалом.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Содержание работы изложено на 354 страницах, включает 11 таблиц, 122 рисунка, 3 приложения и список литературы из 271 наименования.

Введение содержит чёткую постановку научной проблемы, обоснование актуальности, цели и задач исследования, а также перечень выносимых на защиту положений, охарактеризованы научная новизна, теоретическая и практическая значимость, указаны используемые методы исследования. Автор демонстрирует глубокое владение предметной областью, приводя обширный обзор современных подходов – от классических (принцип максимума Понтрягина, динамическое программирование) до современных (MPC, MPPI, RRT*, методы машинного обучения).

Глава 1 посвящена математическим основам робототехники и развитию метода регуляризации для задач оптимального управления с фазовыми ограничениями. Сначала анализируются классические методы, в частности принцип максимума Понтрягина, и демонстрируются их недостатки в задачах

с фазовыми ограничениями: возможная негладкость оптимальных траекторий, вырождение условий оптимальности и отсутствие регулярности, что особенно характерно для робототехнических моделей, где количество фазовых переменных превышает число управляющих воздействий.

Поскольку классический принцип максимума часто неприменим напрямую, автор предлагает метод регуляризации – построение последовательности регулярных возмущённых задач, для которых условия оптимальности корректны. Вводится параметр регуляризации $\varepsilon > 0$ и исходная задача заменяется на ε -регулярную, в которой фазовые ограничения сглаживаются, устраняются сингулярные режимы управления, обеспечивается непрерывность меры-множителя Лагранжа $\mu(t)$. Доказано, что при $\varepsilon \rightarrow 0$ решения регуляризованных задач сходятся к решению исходной задачи.

Предложенная модификация регуляризованного метода обеспечивает корректную обработку участков траектории, лежащих на границе фазовых ограничений, и гарантирует сходимость к точному решению. Особенно ценным является теоретическое обоснование непрерывности меры-множителя Лагранжа, что уточняет известные результаты и повышает строгость анализа.

В главе 1 разработан и реализован алгоритм численного решения на основе метода адаптивного шага интегрирования с учетом переключений режимов управления (например, при переходе на границу фазового ограничения). Алгоритм протестирован на моделях трёхколёсного мобильного робота с передним приводом, гусеничного робота, одноколёсного велосипеда. Во всех случаях метод регуляризации позволил найти точные траектории.

В главе 2 рассмотрены задачи с фазовыми ограничениями глубины 2, то есть ограничениями, накладываемыми не только на положение $x(t)$, но и на скорость $y(t) = \dot{x}(t)$. Такие ограничения типичны для робототехнических систем, где, например, запрещено не только находиться в определённой зоне, но и входить в неё с высокой скоростью.

На основе теоретических условий разработан модифицированный метод стрельбы, для реализации которого решается краевая задача с неизвестными начальными условиями для сопряжённых переменных, в точках пересечения границы ограничения используется информация о непрерывности $u(t)$ и её производной, реализован адаптивный механизм обработки точек стыка (вход/выход на границу). Алгоритм учитывает скачки производной $\dot{\mu}(t)$ и корректирует шаг интегрирования вблизи таких точек. Это существенно повышает точность и надёжность численного решения. Метод применён к задаче быстрогодействия для мобильного робота с динамикой Ньютона ($\ddot{x} = u$) в присутствии кругового препятствия.

Приведённое сопоставление с ПИД-регулятором позволяет использовать полученные оптимальные решения в качестве «эталона» при настройке практических систем управления.

Глава 3 содержит оригинальный подход к задаче быстрогодействия с фазовыми ограничениями — принцип разделения траектории на прямолинейные участки и участки движения по границе препятствий. Теоретически установлено, что для кинематических моделей роботов кратчайший по длине путь совпадает с траекторией, оптимальной по времени, что даёт возможность применять геометрические методы, в частности, построение графов касательных, для решения задач быстрогодействия. Предложен эффективный метод поиска касательных и построения графа переключений, обеспечивающий нахождение оптимальных траекторий даже при большом числе препятствий. Теоретические результаты подтверждены строгими доказательствами и иллюстрированы численными экспериментами.

Глава 4 представляет интеграцию теоретических методов с современными технологиями восприятия и машинного обучения.

Глава посвящена управлению мобильным роботом в режиме реального времени при наличии фазовых ограничений и неопределённости внешней среды. Рассматривается кинематическая модель робота с геометрией Аккермана, а также задача быстрогодействия с терминальными условиями и

ограничениями на положение. Разработан гибридный метод ASLAM-MPPI, сочетающий активную одновременную локализацию и картографирование (ASLAM) с моделью прогностического интегрального управления (MPPI). Это позволяет решать задачи оптимального управления в реальном времени даже при частичной неопределённости и сбоях в работе сенсоров.

Предложены два режима навигации: первый с использованием ArUco-маркеров и сетевого оператора для точной локализации и коррекции траектории; второй – по внутренней модели, активируемый при полной потере связи и сенсорных данных (обеспечивает «живучесть» системы). Эксперименты продемонстрировали, что средняя ошибка локализации составляет менее 1 % от пройденного пути, а также показали возможность продолжения движения даже при отказах датчиков.

Особое внимание уделено практической реализации: использованию встраиваемых платформ (NVIDIA Jetson), нейросетевой идентификации динамики робота и синтезу функции выбора на основе сетевого оператора.

В **заключении** обобщены полученные результаты, подчеркнуты их научная новизна и практическая ценность. Автором создан комплекс программных средств, который был апробирован как в симуляторах (Gazebo), так и на реальных аппаратных платформах в Робототехническом центре ФИЦ ИУ РАН.

Замечания по диссертации

Несмотря на высокое качество работы, ведущая организация считает целесообразным высказать следующие замечания:

1. Хотя в работе приводятся условия 2-регулярности фазовых ограничений и доказываются леммы о непрерывности множителя Лагранжа, отсутствует четкий алгоритм проверки этих условий для произвольной нелинейной системы.

2. Эксперименты проводились преимущественно на полигонах с искусственными препятствиями (окружности, линии). Желательно расширить

тестирование на более сложные, неструктурированные среды (например, лесистая местность, городская застройка с шумными сенсорами), чтобы продемонстрировать робастность методов в условиях высокой неопределенности.

3. В главе 4 приведен метод ASLAM-MPPI и использование ArUco-маркеров для навигации, однако не хватает информации о масштабируемости предложенных алгоритмов: как они ведут себя при увеличении числа препятствий или размерности пространства?

4. В Приложении А приведены листинги программ, однако отсутствует описание используемых библиотек и зависимостей, что затрудняет воспроизводимость результатов. Желательно дополнить приложения метаданными о программной среде.

Несмотря на указанные замечания, они носят рекомендательный характер и не снижают ценности и общего высокого уровня работы.

Заключение по диссертации

Работа выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченное исследование, сочетающее глубокий теоретический анализ, новаторские вычислительные подходы и успешную экспериментальную реализацию на реальных робототехнических платформах и демонстрирует глубокое владение автором как классическими, так и современными подходами в теории оптимального управления, вычислительной математике и робототехнике.

Основные результаты диссертации опубликованы автором в 29 публикациях, из них 7 изданы в журналах из перечня ВАК, 10 - в научных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus. Результаты диссертации доложены на российских и международных конференциях, что подтверждает их признание научным сообществом.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.2.3 – «Теоретическая информатика, кибернетика»: в ней развита математическая

теория оптимального управления с фазовыми ограничениями (п. 6 паспорта специальности) и предложены новые методы исследования операций в условиях неопределённости и сложных ограничений (п. 9 паспорта). Автореферат полностью отражает основное содержание работы.

Таким образом, диссертация Дарьиной Анны Николаевны «Методы решения задач оптимального управления с фазовыми ограничениями, возникающими в робототехнике» 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, полностью соответствует требованиям к докторским диссертациям, установленным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а ее автор, Дарьина Анна Николаевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.3 – «Теоретическая информатика, кибернетика».

Диссертационная работа и отзыв рассмотрены и обсуждены на заседании кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Присутствовало на заседании 24 чел. Результаты голосования: «за» – 24 чел., «против» – 0 чел., «воздержались» – 0 чел., протокол № 4 от 9 октября 2025 г.

Заведующий кафедрой
системы автоматического управления
доктор технических наук, профессор



К.А. Неусыпин

Выходные данные организации:

Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	МГТУ им. Н.Э. Баумана
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Место нахождения	г. Москва
Почтовый индекс, адрес организации	105005, г. Москва, Басманный муниципальный район, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1
Адрес официального сайта в сети Интернет	https://bmstu.ru
Телефон	+7 (499) 263 63 91
Адрес электронной почты	bauman@bmstu.ru