

На правах рукописи



У Цюе

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНОГО
ГУСЕНИЧНО-КОЛЕСНОГО РЕКОНФИГУРИРУЕМОГО РОБОТА**

Специальность: 2.5.4 - «Роботы, мехатроника и робототехнические
системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре «Автоматика и управление» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва.

Научный руководитель:

Рачков Михаил Юрьевич

доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», кафедра «Автоматики и управления», профессор.

Официальные оппоненты:

Афонин Андрей Николаевич,

доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», кафедра информационных и робототехнических систем, профессор.

Семёнов Евгений Александрович

кандидат технических наук, ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, лаборатория робототехники и мехатроники, старший научный сотрудник.

Ведущая организация:

Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис».

Защита состоится «10» июня 2026 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.276.07 созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 242.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» и на сайте www.bstu.ru по ссылке https://gos_att.bstu.ru/dis/Wu%20Que.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Гапоненко Елена Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Наряду с развитием высокотехнологичных производств и ростом числа природных и техногенных чрезвычайных ситуаций стратегически значимой задачей становится обеспечение безопасности и эффективности проведения поисково-спасательных работ. В условиях разрушенной городской инфраструктуры, завалов, пожаров и радиационного загрязнения выполнение операций человеком сопряжено с недопустимым риском. В связи с этим возникает острая необходимость в применении мобильных роботизированных комплексов (МРК), способных выполнять инженерную разведку и доставку грузов в неструктурированных средах.

Современные мобильные роботы традиционно строятся на базе колесных или гусеничных движителей. Колесные платформы обладают высокой скоростью и энергоэффективностью, но их проходимость критически снижается на сыпучих грунтах и при преодолении вертикальных препятствий (ступеней, порогов). Гусеничные системы, напротив, обеспечивают высокое сцепление и устойчивость, однако уступают в маневренности, динамике и требуют значительных энергетических затрат. Таким образом, ни одна из существующих традиционных схем передвижения робота не способна в полной мере удовлетворить противоречивым требованиям мобильности и проходимости, что ограничивает их применение в реальных условиях ЧС.

Мировая практика развития современной робототехники показывает, что решение данной проблемы находится в плоскости создания новых типов, реконфигурируемых (трансформируемых) мобильных роботов, способных адаптировать геометрию шасси и кинематическую структуру под текущие условия рельефа местности. Кроме того, анализ существующих решений выявляет ряд нерешенных научно-технических проблем. Во-первых, большинство аналогов реализуют механическое совмещение движителей без возможности жесткой фиксации конструкции, что приводит к тому, что вся весовая и динамическая нагрузка воспринимается непосредственно валами электроприводов, снижая при этом надежность и ресурс системы. Во-вторых, для автономной навигации и управления трансформацией часто используются дорогостоящие и энергоемкие системы технического зрения (лидары, стереокамеры), что зачастую является неприемлемым для создания малогабаритных роботов массового применения.

Вклад в развитие теории реконфигурируемых систем внесли ведущие российские научные школы. К ним можно отнести: работы А.В. Мельникова (ЦНИИмаш), в которых заложены основы проектирования многоопорных платформ; Ю.А. Капустина и А.Н. Куприянова (МГТУ им. Баумана), которые развили принципы управления мехатронными приводами; С.В. Емельянова (ИПУ РАН) – создание базы для построения робастного управления с переменной структурой. Существенные результаты в области общей теории робототехники получены учеными Белгородской школы под руководством Л.А. Рыбак (БГТУ им.

В. Г. Шухова) - методы оптимизации, управления и проектирования роботизированных систем различного назначения, а также учеными Волгоградской школы (ВолгГТУ) в области механики шагающих роботов. Несмотря на значительный теоретический задел, задача создания относительно недорогой, надежной и автономной мобильной платформы, способной преодолевать препятствия с использованием минимального набора сенсоров, остается нерешенной.

В связи с этим, актуальной научной задачей является разработка теории и конструктивных решений мобильных реконфигурируемых роботов, в которых высокая проходимость и энергоэффективность обеспечиваются за счет использования нового типа механизма с системой геометрической блокировки («мертвых точек»), а автономность обеспечивается за счет интеллектуальных алгоритмов активного сканирования среды и адаптивного управления приводами в условиях неопределенности.

Целью диссертационной работы является повышение производительности и безопасности работ в труднодоступных и опасных зонах с использованием гусенично-колесного реконфигурируемого робота за счет автономного распознавания и преодоления препятствий на основе активного вертикального сканирования и адаптивного управления механизмом реконфигурации.

Для достижения поставленной цели в процессе работы решались следующие **задачи**:

1. Разработка математической модели механизма реконфигурации, определение и оптимизация конструктивных параметров (длин рычагов и хода штоков), минимизирующих нагрузку на приводы в транспортном режиме.

2. Разработка архитектуры системы автономного управления роботом с интегрированным модулем автоматического восстановления работоспособности, реализованная на базе специализированных состояний диагностики и возвратных переходов, активируемых при сбоях позиционирования, реализующая возможность автономного выхода робота из аварийных режимов без участия оператора.

3. Синтез алгоритма автономного определения геометрических параметров препятствия (высоты) с использованием ультразвукового датчика методом активного вертикального сканирования (реализация стратегии «остановка — сканирование — реконфигурация»).

4. Разработка алгоритма управления линейными приводами робота, обеспечивающего компенсацию нелинейностей (сухое трение, зазоры в кинематических парах) и синхронизацию движения рычагов механизма трансформации в режиме реального времени.

Научная новизна работы:

1. Разработана методика параметрической оптимизации механизма реконфигурации, включающая систему геометрических ограничений, учитывающих эффект механической блокировки рычагов («мертвых точек»), и

позволяющая определить оптимальные конструктивные параметры, при которых удержание веса робота и восприятие динамических нагрузок осуществляется не за счет движения штоков линейных приводов, а силовым контуром механических упоров, что гарантирует высокую конструктивную жесткость платформы и защиту приводов от разрушения.

2. Разработана архитектура системы управления робота с интегрированным модулем автоматического восстановления работоспособности, реализованная на базе иерархических конечных автоматов. Новизна заключается во введении специализированных состояний диагностики и возвратных переходов, активируемых при сбоях позиционирования, реализующая возможность автономного выхода робота из аварийных режимов без участия оператора.

3. Разработан алгоритм активного вертикального сканирования препятствий с использованием одной управляемой степени свободы по информации ультразвукового дальномера для построения профиля высоты объекта. В отличие от традиционных систем технического зрения (лидаров, стереокамер), предложенный подход позволяет реализовать точное определение геометрических параметров препятствий (с погрешностью менее 5%) на базе микроконтроллеров с ограниченными вычислительными ресурсами, исключая характерные для стационарных датчиков «слепые зоны».

4. Синтезирован алгоритм управления электроприводами механизма реконфигурации в режиме насыщения управляющего сигнала, основанный на нелинейной модели динамики с учетом сухого трения в телескопических приводах. Отличительной особенностью алгоритма является использование форсированных коэффициентов пропорционального усиления, что позволяет компенсировать инерционность и наличие зазоров в линейных приводах без применения наблюдателей состояния, обеспечивая гарантированную синхронизацию движения рычагов механизма.

Объектом исследования является мобильный реконфигурируемый робот на основе гибридной кинематической схемы (гусенично-колесный), оснащенный системой линейных приводов для изменения геометрии шасси.

Предмет исследования – алгоритмы управления реконфигурацией робота и методы обработки сенсорной информации, обеспечивающие автономное преодоление препятствий в условиях неопределенности.

Методология и методы исследования. Методологическую основу диссертационного исследования составляет комплексный подход, объединяющий теоретические аспекты, математическое моделирование и экспериментальную верификацию. Для решения поставленных задач использовались следующие методы:

1. Методы теоретической механики и теории механизмов и машин: применялись для кинематического анализа механизма реконфигурации как для замкнутой кинематической цепи, так и для построения динамических моделей системы с использованием уравнений Лагранжа второго рода. Особое внимание

уделялось анализу сингулярных конфигураций («мертвых зон») для реализации механической блокировки.

2. Методы классической и нелинейной теории автоматического управления: использовались при синтезе законов управления приводами на основе ПИД-регулирования, анализе устойчивости замкнутых систем (частотный критерий Найквиста) и разработке алгоритмов компенсации нелинейностей типа «насыщение» и «сухое трение».

3. Методы математического моделирования: использовались в программной среде MATLAB/Simulink. Разработанные имитационные модели позволили исследовать поведение робота при преодолении препятствий, оценить энергопотребление и оптимизировать параметры регуляторов до этапа натурных испытаний.

4. Методы алгоритмизации и программирования: применялись при разработке встроенного программного обеспечения для микроконтроллера (C++), реализации конечных автоматов (FSM) для управления режимами работы и обработки сигналов ультразвуковых датчиков (медианная фильтрация).

5. Экспериментальные методы: включали проведение исследований на разработанном физическом образце робота. Осуществлялась верификация точности позиционирования механизма, проверка адекватности математических моделей и оценка эффективности предложенных алгоритмов в реальных условиях эксплуатации.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в следующем:

1. Обоснована методика синтеза специальных законов управления нелинейными исполнительными механизмами (линейными приводами) в режиме насыщения управляющего сигнала. Теоретически доказана эффективность применения повышенных коэффициентов пропорционального усиления регулятора для компенсации сил сухого трения без потери устойчивости замкнутой системы, что расширяет применимость классических методов ПИД-регулирования для недорогих компонентов мехатроники.

2. Установлены аналитические зависимости между геометрическими параметрами механизма реконфигурации и распределением статических нагрузок в элементах конструкции. Полученные зависимости позволяют проектировать шасси с функцией механической разгрузки, обеспечивающей замыкание силового контура на раму робота (эффект блокировки), что гарантирует высокую эксплуатационную надежность и жесткость конструкции при движении по пересеченной местности.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение для встраиваемых систем управления (на базе микроконтроллера Arduino Mega 2560), включающее модули активного вертикального сканирования среды и автоматического восстановления работоспособности. Данное ПО обеспечивает

автономность функционирования робота в неструктурированных средах при ограниченных вычислительных ресурсах.

2. Создан действующий экспериментальный образец мобильного робота с гибридной силовой установкой и изменяемой геометрией шасси. Экспериментальные исследования подтвердили возможность автономного преодоления вертикальных препятствий с высотой, превышающей высоту гусеничной группы робота, с использованием стандартной элементной базы (приводы, двигатели VEX, датчики HC-SR04).

3. Предложенные технические решения, программно-алгоритмическое обеспечение и результаты испытаний могут быть использованы при проектировании и производстве малогабаритных разведывательных и поисково-спасательных роботов, предназначенных для работы в зонах чрезвычайных ситуаций и техногенных аварий.

Положения, выдвигаемые на защиту:

1. Методика параметрической оптимизации механизма реконфигурации, включающая систему геометрических ограничений, учитывающих эффект механической блокировки рычагов, и позволяющая определить оптимальные конструктивные параметры, при которых удержание веса робота и восприятие динамических нагрузок осуществляется силовым контуром механических упоров.

2. Архитектура системы автономного управления с интегрированным модулем автоматического восстановления работоспособности, обеспечивающая автономный выход робота из аварийных режимов без участия оператора.

3. Алгоритм активного вертикального сканирования препятствий с использованием одной управляемой степени свободы ультразвукового дальномера, обеспечивающий построение профиля высоты объекта и точное определение геометрических параметров препятствий.

4. Алгоритм управления электроприводами механизма реконфигурации в режиме насыщения управляющего сигнала, основанный на нелинейной модели динамики с учетом существенного сухого трения в телескопических приводах.

Соответствие паспорту научной специальности. Область исследования и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 2.5.4 - «Роботы, мехатроника и робототехнические системы» в части:

– п. 5 «Методы, алгоритмы, программные и аппаратные средства управления роботами, робототехническими и мехатронными системами, включая адаптивное, оптимальное, распределенное, интеллектуальное и супервизорное управление»;

– п. 6 «Математическое и программное обеспечение, компьютерные методы и средства обработки информации в реальном времени в роботах, робототехнических и мехатронных системах».

– п. 8 «Планирование и реализация действий и движений, индивидуальное и групповое управление мобильными роботами наземного, воздушного, надводного, подводного, многосредного и космического применения».

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается:

1. Корректным использованием фундаментальных законов теоретической механики (уравнения Лагранжа) и теории автоматического управления (критерии устойчивости, методы синтеза регуляторов) при построении математических моделей.

2. Применением апробированных программных средств численного моделирования (среда MATLAB/Simulink), широко используемых в научной и инженерной практике для анализа динамики мехатронных систем.

3. Удовлетворительной сходимостью результатов теоретических расчетов и экспериментальных исследований. Установлено, что расхождение между расчетной и реальной траекториями движения штоков приводов не превышает 5%, что подтверждено серией испытаний на экспериментальном образце робота.

4. Воспроизводимостью результатов экспериментов по определению высоты препятствий методом активного вертикального сканирования в различных условиях освещенности и на различных типах поверхностей, что свидетельствует о робастности предложенных алгоритмов.

Реализация результатов исследования. Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы реализованы и апробированы на действующем экспериментальном образце мобильного реконфигурируемого робота на основе программно-алгоритмического комплекса управления на базе микроконтроллера Arduino Mega 2560.

Теоретические результаты диссертации внедрены в учебный процесс кафедры «Автоматика и управление» Московского Политеха для лабораторных практикумов на базе лаборатории робототехники.

Полученные в диссертационной работе результаты внедрены и используются в проектно-конструкторской и производственной деятельности ООО «РобоКомпонент» (г. Москва).

Апробация результатов работы. Основные результаты представлены на следующих конференциях:

– XXIV Международная научно-практическая конференция "Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации" (Москва, 2022);

– V Международная научно-практическая конференция «SCIENCE AND TECHNOLOGY RESEARCH» (Петрозаводск, 2022);

– XI Международная научно-практическая конференция «Актуальные научные исследования» (Пенза, 2023);

– Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг 2023» (Сочи, 2023);

– Международная научно-практическая конференция «Современные исследования высшей школы – 2024» (Петрозаводск, 2024);

- Международная научно-практическая конференция «Индустрия 4.0» (Сочи, 2024);
- Международная научно-техническая конференция «СМиС-2025. Технологии управления качеством» (Москва, 2025);
- Международная научно-практическая конференция «Индустрия 4.0» (Сочи, 2025).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 20 печатных работах, 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 11 статей в изданиях, индексируемых в РИНЦ, получены 2 патента РФ на полезную модель, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации: 159 страниц. Диссертационная работа содержит 6 таблиц, 51 рисунок и 6 приложений. Список литературы включает 106 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и положения, выносимые на защиту. Описаны методы исследования, используемые в работе. Представлены сведения об апробации работы, публикациях, теоретической и практической значимости результатов исследования.

В первой главе проведен системный анализ современного состояния исследований в области мобильной робототехники и выявлены фундаментальные ограничения традиционных колесных, гусеничных и шагающих локомоторных систем при работе в условиях неструктурированной среды. Обоснована необходимость перехода к реконфигурируемым гусенично-колесным платформам, сочетающим высокую скорость перемещения с адаптивностью кинематической структуры к сложному рельефу местности.

Осуществлен сравнительный анализ архитектур систем управления, по результатам которого доказано преимущество гибридной архитектуры. Показано, что сочетание иерархического планирования на базе конечных автоматов (FSM) с реактивностью модулей нижнего уровня позволяет минимизировать временные задержки и обеспечить надежную синхронизацию исполнительных механизмов при смене режимов движения.

Представлена математическая формализация задачи реконфигурации как процесса динамического управления геометрией опорного многоугольника и положением центра масс системы для обеспечения статической устойчивости. Описана динамика мобильной платформы с использованием уравнений Лагранжа второго рода, что позволило выявить проблему параметрических возмущений при трансформации и обосновать необходимость применения адаптивных методов управления.

На основе анализа энергетического функционала теоретически доказана целесообразность использования механизмов с системой геометрической блокировки («мертвых точек»). Обосновано, что использование сингулярных конфигураций позволяет переводить конструкцию в режим статической фермы, исключая электроприводы из силового контура при удержании веса робота, что существенно снижает энергопотребление и повышает надежность системы.

Во второй главе изложен комплексный подход к проектированию механизма реконфигурации, включающий разработку математической модели кинематики с выявлением сингулярных конфигураций, выполнение многокритериальной параметрической оптимизации и конструктивную реализацию прототипа с комбинированным применением материалов.

Механизм реконфигурации представляет собой плоский рычажный механизм с одной степенью свободы (рисунок 1). Выходное звено – колесный рычаг, угол φ_3 определяет режим движения. Управление осуществляется линейным приводом переменной длины $L(t)$. Для аналитического описания движения механизма и решения прямой задачи кинематики введем неподвижную декартову систему координат xAy , начало которой совпадает с центром шарнира А (рисунок 2). Ось Ax направим горизонтально вдоль основания платформы, а ось Ay — вертикально вверх.

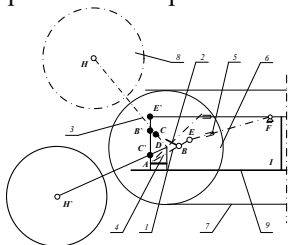


Рисунок 1 – Компоновочная схема механизма реконфигурации: 1 – поворотный рычаг, 2 – шатун, 3 – колесный рычаг, 4 – основание, 5 – электрический цилиндр, 6 – колесо гусеничной группы, 7 – гусеница, 8 – колесо колесной группы, 9 – платформа робота

Прямая задача кинематики решается из условия замкнутости векторного контура

$$\begin{cases} l_{AB} \cos \varphi_1 + l_{BC} \cos \varphi_2 = l_{AD} + l_{AD} \cos \varphi_3 \\ l_{AB} \sin \varphi_1 + l_{BC} \sin \varphi_2 = l_{CD} \sin \varphi_3 \end{cases} \quad (1)$$

Исключая из (1) промежуточный угол φ_2 , получим зависимость угла подъема φ_3 от длины привода L

$$\varphi_3(L) = 2 \arctan\left(\frac{b \pm \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}}{a - c}\right), \quad (2)$$

где коэффициенты a, b, c являются функциями текущей геометрии и угла θ

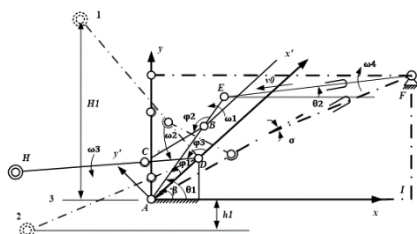


Рисунок 2 – Расчетная кинематическая модель механизма: $L(t)$ – переменная длина привода (звено AE), 1 – верхнее положение колеса, 2 – нижнее положение колеса, 3 – уровень платформы

$$\begin{cases} a = 2l_{CD}(l_{AD} - l_{AB}\cos\theta) \\ b = -2l_{CD}l_{AB}\sin\theta \\ c = l_{AD}^2 + l_{AB}^2 + l_{CD}^2 - l_{BC}^2 - 2l_{AB}l_{AD}\cos\theta \end{cases}, \quad (3)$$

где θ — угол поворота ведущего рычага, однозначно определяемый длиной штока L по теореме косинусов в $\triangle ABE$.

Полученная зависимость (2) является математической основой для алгоритма управления, позволяя микроконтроллеру в реальном времени пересчитывать требуемую высоту подъема шасси в необходимую длину выдвигания штока привода.

Для оценки динамических нагрузок и синтеза закона управления скоростью необходимо установить аналитическую связь между линейной скоростью штока привода $V_{act} = \dot{L}$ и угловой скоростью выходного звена $\omega_3 = \dot{\varphi}_3$, которая получена путем дифференцирования системы уравнений (1)

$$\omega_3 = V_{act} \cdot \frac{l_{AB} \sin(\theta - \varphi_2) \cdot l_{AB} \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{l_{CD} l_{BC} \sin(\varphi_3 - \varphi_2)}. \quad (4)$$

Анализ (4) показывает нелинейность передачи и естественное кинематическое демпфирование вблизи сингулярности.

Ключевая особенность механизма — удержание робота в поднятом (колёсном) положении без постоянного энергопотребления привода. Для обоснования этого свойства и расчёта усилий выполнен квазистатический анализ по принципу возможных перемещений, что даёт выражение для требуемого усилия на штоке Q при подъеме веса G

$$Q(\varphi_3) = \frac{G}{2} \cdot \frac{l_{CD} \cos \varphi_3 + \beta \cdot l_{AB} \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}{l_{CD} \sin(\varphi_2 + \varphi_3) \cdot l_{AE} \sin(\theta_1 - \theta_2)}, \quad (5)$$

где β — геометрический коэффициент, зависящий от соотношения длин рычагов.

В положении полного выдвигания ($L = L_{max} = 50$ мм) звенья выстраиваются в сингулярную конфигурацию, нагрузка замыкается на упоры — теоретическое обоснование механической блокировки.

С целью минимизации габаритов и пиковых усилий разработана методика многокритериальной параметрической оптимизации геометрии звеньев. В качестве независимых переменных, определяющих геометрию механизма, выбран вектор оптимизируемых параметров $X = [l_{AB}, l_{BC}, l_{CD}, l_{AD}, x_A, y_A]^T$. Для сведения многокритериальной задачи к однокритериальной использована целевая функция — взвешенная сумма трёх критериев (силового, кинематической линейности, компактности). Весовые коэффициенты распределены с доминированием силового фактора $\mu_1 = 0,6$, $\mu_2 = 0,2$, $\mu_3 = 0,2$. Оптимизация проводится с учетом ограничений: рабочий ход привода ≤ 50 мм, угол подъема $\geq 150^\circ$, отсутствие сингулярности в рабочем диапазоне (кроме точки блокировки)

$$\begin{cases} L_{min} \leq l_i \leq L_{max}, i = 1 \dots n \\ \mu_{min} \leq \mu(q) \leq \mu_{max} \\ J_{kin}(q) \neq 0 \text{ и } |J_{kin}(q)| < \infty, \forall q \in \Omega_{work} \end{cases}, \quad (6)$$

где l_i — варьируемые геометрические параметры (длины звеньев); L_{min}, L_{max} — конструктивные пределы размеров; $[\mu_{min}, \mu_{max}]$ — требуемый рабочий диапазон

($80^\circ \dots 150^\circ$), необходимый для преодоления препятствий; Ω_{work} — рабочая область механизма; $J_{kin}(q)$ — скоростная передаточная функция (скоростной якобиан); Условие $J_{kin}(q) \neq 0$ и $|J_{kin}(q)| < \infty$ гарантирует отсутствие кинематических сингулярностей внутри рабочей области, за исключением граничной точки блокировки, где механизм переходит в сингулярную конфигурацию.

Численное решение выполнено методом SQP (MATLAB fmincon) с последующей параметрической стандартизацией размеров по ГОСТ 6636-69 и согласованием со стандартным линейным приводом с ходом 50 мм. По результатам оптимизации получены рациональные размеры звеньев ($l_{AB} = 80$ мм, $l_{BC} = 50$ мм, $l_{CD} = 115$ мм), при которых обеспечивается требуемый угол подъема шасси ($\alpha > 70^\circ$) при использовании стандартного линейного привода с ходом 50 мм.

Адекватность разработанных моделей подтверждена имитационным моделированием в среде MATLAB/Simulink (рисунок 3). На графике показано, что реальная траектория незначительно отстает от эталонной в начале движения из-за инерции ротора и преодоления трения покоя. На маршевом участке скорость стабилизируется на уровне $V_{const} \approx 12,5$ мм/с, что обеспечивает энергоэффективный установившийся режим. Достижение ограничителя хода $L=50$ мм происходит плавно и без перегулирования, подтверждая корректность настройки профиля движения.

В завершении главы представлена конструктивная реализация прототипа с комбинированным применением материалов (сталь/алюминий), обеспечившая требуемую жесткость силового контура в режиме блокировки при сохранении низкой инерционности подвижных частей. Ключевая особенность — система механических упоров и направляющего коромысла (рисунок 4), реализующая сингулярную блокировку. В конечном положении нагрузка воспринимается рамой и упорами, что позволяет снизить энергопотребление в статике.

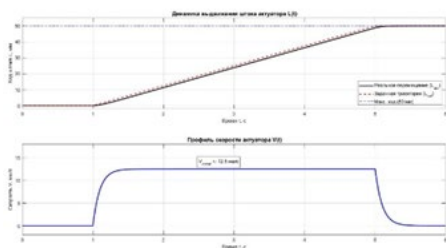


Рисунок 3 – Динамические характеристики линейного привода: а) сопоставление заданной (L_{ref} , красная пунктирная линия) и реальной (L_{act} , черная сплошная линия) траекторий перемещения штока; б) профиль линейной скорости $V(t)$ с выходом на номинальный режим

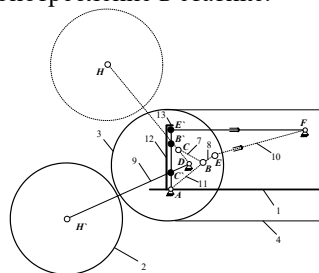


Рисунок 4 – Кинематическая схема рычажного привода с системой упоров: 1 — платформа; 2 — колесо; 7 — поворотный рычаг (AB); 8 — шатун (BC); 9 — колесный рычаг; 10 — привод; 11 — направляющее коромысло; 12, 13 — механические упоры

В третьей главе представлена архитектура системы управления механизмом реконфигурации мобильного робота, синтез алгоритмов активного сканирования и математическое моделирование динамики приводов с учётом нелинейностей.

Для реализации алгоритмов управления разработана архитектура системы управления механизмом реконфигурации (рисунок 5). Центральным элементом является микроконтроллер Arduino Mega 2560, осуществляющий сбор данных с оптических энкодеров VEX и ультразвукового дальномера HC-SR04, а также формирование ШИМ-сигналов для приводов.

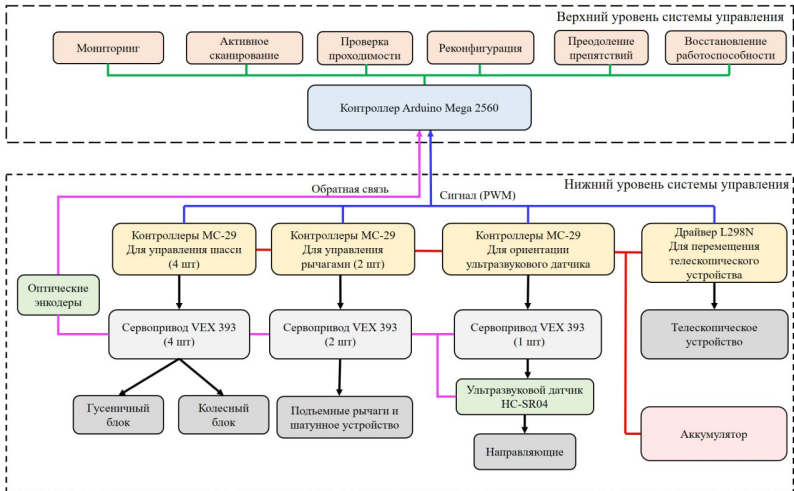


Рисунок 5 – Функциональная схема системы управления механизмом реконфигурации мобильного робота

Архитектура системы управления построена по иерархическому принципу и реализует двухуровневую схему управления роботом. На верхнем уровне используется конечный автомат, определяющий логику переходов между режимами поиска препятствия, активного сканирования, реконфигурации и преодоления препятствия, тогда как на нижнем уровне функционируют локальные контуры управления исполнительными механизмами, обеспечивающие стабилизацию, синхронизацию приводов и обработку сигналов датчиков в реальном времени. Особенностью предложенной архитектуры является интеграция модуля автоматического восстановления работоспособности, реализованного на основе специальных состояний конечного автомата, предназначенных для диагностики нештатных ситуаций, и переходов возврата к корректному этапу алгоритма. При сбоях позиционирования, превышении допустимого времени выполнения операций или рассогласовании приводов система выполняет останов исполнительных механизмов, локализацию ошибки и возврат к корректному этапу алгоритма, что обеспечивает автономный выход робота из аварийных режимов без участия оператора.

Для обеспечения точности измерений разработана математическая модель процесса ультразвуковой локации с учётом температурной зависимости скорости звука и диаграммы направленности излучателя. Расстояние до объекта определяется по времени задержки эхо-сигнала

$$d(t) = \frac{c(T_{env}) \cdot \Delta t_{echo}}{2}, \quad (7)$$

где $c(T_{env})$ — скорость распространения акустической волны в воздушной среде.

В реальных условиях эксплуатации скорость звука не является константой. Поскольку воздух можно рассматривать как идеальный газ, скорость звука зависит от абсолютной температуры T_{env} , К

$$c(T_{env}) = \sqrt{\gamma R_{spec} T_{env}}, \quad (8)$$

где $\gamma = 1.4$ — показатель адиабаты для двухатомного газа (воздуха), $R_{spec} = 287.058 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ — удельная газовая постоянная сухого воздуха.

Линеаризуя выражение (8) в окрестности нормальных условий (0°C), получаем следующую формулу для температурной компенсации, используемую в микроконтроллере: $c(t^0) \approx 331.3 + 0.606 \cdot t^0 \left[\frac{\text{М}}{\text{с}} \right]$. Пренебрежение этим фактором дает ошибку $\approx 0.17\%$ на каждый градус, что при перепаде температур в 20°C может привести к ошибке измерения в 3-4 см на дистанции 1 метр, что критично для задач реконфигурации.

Для подавления импульсных помех (выбросов), характерных для эхо-метода, применяется медианный фильтр скользящего окна размерностью $N = 5$

$$\hat{d}[k] = \text{median}\{d_{raw}[k-2], \dots, d_{raw}[k+2]\}. \quad (9)$$

Данный нелинейный фильтр, в отличие от усредняющего, сохраняет резкие границы перепадов высот, что является ключевым требованием для алгоритма детектирования края препятствия.

Для устранения «слепых зон» стационарных датчиков, обусловленных узкой диаграммой направленности и фиксированной высотой его установки, предложен алгоритм активного вертикального сканирования («Stop-and-Scan»), основанный на перемещении ультразвукового сенсора по вертикали с одновременной регистрацией дальности. Высота сенсора определяется по показаниям энкодера

$$h_{sens}[k] = h_{init} + \delta_{step} \cdot \sum_{i=0}^k \Delta N_{enc}[i], \quad (10)$$

где $\delta_{step} \approx 0,1$ мм — цена импульса энкодера.

Для автоматического обнаружения точки разрыва применяется анализ пространственного градиента. Введем функцию градиента $\nabla D(h)$

$$\nabla D(h) = \frac{\partial D}{\partial h} \approx \frac{D(t) - D(t - \Delta t)}{v_z(t) \cdot \Delta t}. \quad (11)$$

Критерий детектирования верхней кромки препятствия формулируется как превышение модулем градиента адаптивного порога Δ_{thr}

$$H_{obs} = h_{sens}(t^*) \text{ при } |\nabla D(h(t^*))| > \Delta_{thr}. \quad (12)$$

Пороговое значение Δ_{thr} выбирается исходя из статистических характеристик шума $\xi(t)$, чтобы исключить ложные срабатывания от неровностей поверхности самого препятствия.

Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 6.

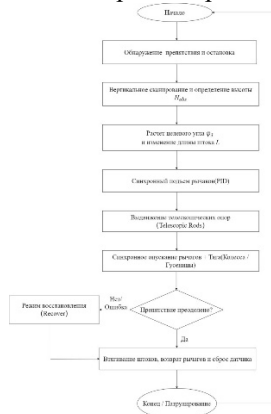


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма активного сканирования и реконфигурации

Задача управления декомпозирована на два независимых канала: угол наклона рычагов (Канал φ_3) и вылет штока (Канал L). Функциональная схема синтезированной двухканальной системы управления представлена на рисунке 7.

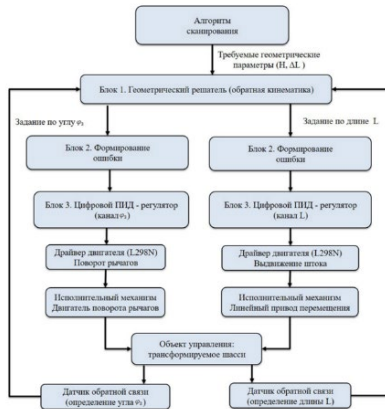


Рисунок 7 – Структурная схема двухканальной системы управления

Геометрический решатель формирует эталонные значения по измеренной высоте препятствия:

$$\begin{cases} \varphi_{3ref}[k] = \arctan\left(\frac{H_{req}[k]}{\Delta L_{req}[k]}\right) \\ L_{req}[k] = \sqrt{(H_{req}[k])^2 + (\Delta L_{req}[k])^2} \end{cases} \quad (13)$$

где $\varphi_{3ref}[k]$ и $L_{req}[k]$ — эталонные (референсные) значения угла и длины на k — м такте управления.

Поскольку управление осуществляется микроконтроллером в дискретном времени с периодом дискретизации $T_s = 20$ мс, для каждого канала синтезирован независимый цифровой ПИД-регулятор. Закон управления, формирующий напряжение $u[k]$ на клеммах двигателей, описывается разностным уравнением

$$u[k] = K_p \cdot e[k] + K_i \sum_{j=0}^k e[j] + \frac{K_d}{T_s} (e[k] - e[k - 1]), \quad (14)$$

где K_p, K_i, K_d — коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих соответственно.

Реальные драйверы двигателей (L298N) имеют ограничение по напряжению питания U_{batt} . В математическую модель введен блок насыщения, ограничивающий выходной сигнал регулятора

$$U_{out}[k] = \begin{cases} U_{batt}, & \text{если } u[k] > U_{batt} \\ u[k], & \text{если } |u[k]| \leq U_{batt} \\ -U_{batt}, & \text{если } u[k] < -U_{batt} \end{cases} \quad (15)$$

Разработана нелинейная модель привода, учитывающая насыщение драйвера L298N, зону нечувствительности, квантование энкодера и гравитационную нагрузку (рисунок 8). Блок Dead_Zone (Зона нечувствительности) моделирует эффект сухого трения покоя в редукторе. Напряжение на двигатель подается только тогда, когда управляющий сигнал превышает пороговое значение ± 1.5 В. Параметры модели получены экспериментально: $K_p = 9.0$, $K_i = 0.15$, $K_d = 3.0$. Выходной сигнал дополнительно усиливается программным коэффициентом масштабирования $K_{scale} = 5.0$.

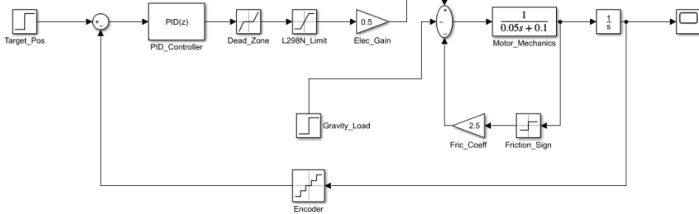


Рисунок 8 – Структурная схема нелинейной модели управления приводом с учетом ограничений драйвера L298N

Анализ переходных процессов (рисунки 9 – 11) показал аperiodический характер процесса без перерегулирования и заданное время регулирования $t_s = 0.25$ с. При отработке большого перемещения (50 мм) система работает в режиме насыщения на начальном участке, обеспечивая максимальное быстродействие, ограниченное мощностью двигателя. Частотный анализ (рисунок 12) подтвердил полосу пропускания $\omega_b \approx 60$ рад/с (≈ 9.5 Гц) и отсутствие резонансных пиков, что свидетельствует о хорошем демпфировании. Годограф Найквиста для контура скорости (рисунок 13) лежит вдали от критической точки $(-1, j0)$, гарантируя асимптотическую устойчивость.

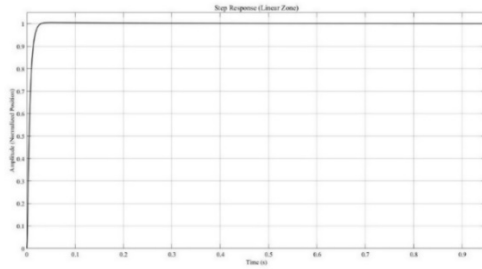


Рисунок 9 – Переходная характеристика системы позиционирования в линейной зоне

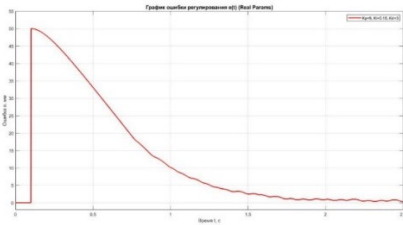
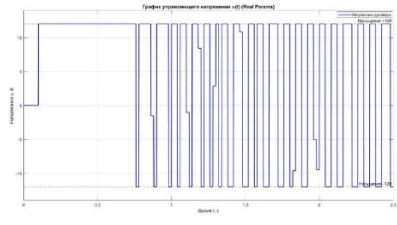
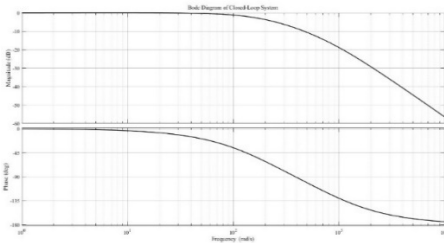
Рисунок 10 – График ошибки регулирования $e(t)$ с учетом реальных ограниченийРисунок 11 – График управляющего напряжения $u(t)$ в режиме насыщения по напряжению

Рисунок 12 – Логарифмические частотные характеристики (диаграмма Боде) замкнутой системы

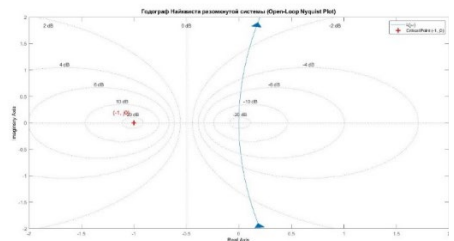


Рисунок 13 – Годограф Найквиста разомкнутой системы управления скоростью

Показано, что линейный регулятор с малым коэффициентом усиления ($K_p = 1.0$ (В/мм)) при наличии сухого трения ($U_{resist} \approx 8.0$ В) приводит к статической ошибке $\delta_{st} \approx 8.0$ мм (рисунок 14). Предложена стратегия управления с высоким коэффициентом усиления ($K_p = 45$ В/мм), позволяющая уменьшить ошибку до $\Delta L \approx 0.18$ мм (рисунок 15, сверху: позиция; снизу: управляющее напряжение) за счёт автоматической компенсации момента сопротивления напряжением смещения. Теоретическая оценка $e_{ss}^{theory} = \frac{U_{resist}}{K_p} =$

$$\frac{8.0 \text{ В}}{45 \text{ В/мм}} \approx 0,177 \text{ мм полностью подтверждена моделированием.}$$

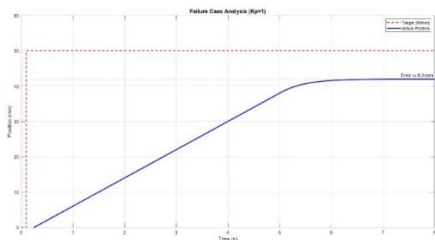


Рисунок 14 – Переходный процесс при линейном управлении ($K_p = 1.0$)

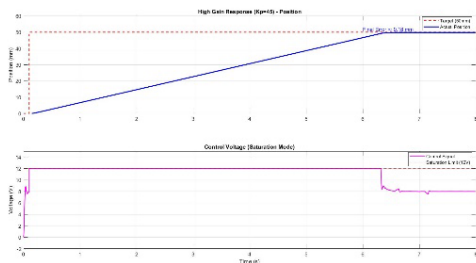


Рисунок 15 – Динамика системы с высоким коэффициентом усиления ($K_p = 45$) под нагрузкой

В четвертой главе рассмотрено создание экспериментального образца и проведение экспериментальных исследований.

Выполнено цифровое проектирование робота и тестирование в лабораторных условиях. На основе оптимальных геометрических параметров разработана электронно-цифровая модель блока реконфигурации в среде САПР (рисунок 16): 1 – платформа, 2 – колесо, 3 – бортовое колесо, 4 – гусеничная лента, 5 – система рычагов трансформации, 6 – поворотный рычаг, 7 – шатун, 8 – колёсный рычаг, 9 – электрический привод, 10 – шток привода.

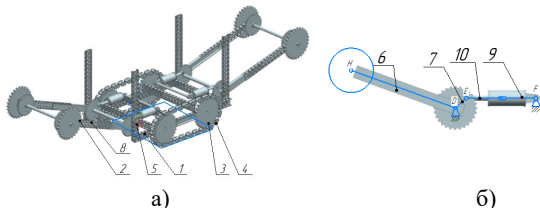


Рисунок 16 – Блок реконфигурации гусенично-колесного шасси: а) общая 3D-модель в транспортном (гусеничном) положении; б) модель в рабочем (колёсном) положении

В ходе симуляции подтверждена корректность геометрии механизма: отсутствуют интерференции между звеньями во всём диапазоне движения. Анализ сингулярных конфигураций в крайних положениях показал, что в крайнем нижнем положении (колёсный режим) звенья выстраиваются практически в одну линию с отклонением менее 2° , что подтверждает теоретически выведенное условие механической блокировки. Минимальный зазор между подвижными элементами в любом положении механизма составляет 3 мм, что исключает возможность заклинивания при допусках изготовления $\pm 0,5$ мм.

Для верификации создан полнофункциональный экспериментальный образец (рисунок 17), построенный по модульному принципу. Центральный контроллер – Arduino Mega 2560, тяговые двигатели – VEX 393 с драйверами Motor Controller 29, линейные приводы телескопического устройства управляются драйверами L298N. Обратная связь обеспечивается оптическими энкодерами VEX (разрешение 0,1 мм) и ультразвуковым датчиком HC-SR04,

установленным на подвижной каретке для активного вертикального сканирования. Конструкция рамы из нержавеющей стали обеспечивает жесткость, необходимую для реализации эффекта геометрической блокировки.

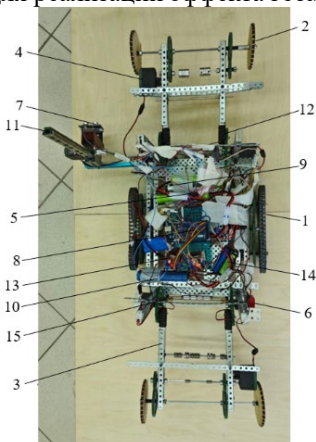


Рисунок 17 – Экспериментальный образец реконфигурируемого робота: 1 – гусеничный блок, 2 – колесный блок, 3 – подъемные рычаги, 4 – двигатели VEX 393, 5 – контроллеры Motor Controller 29, 6 – оптические энкодеры VEX Optical Shaft Encoder, 7 – ультразвуковой датчик HC-SR04, 8 – Ардуино Mega 2560, 9 – батарея Ардуино, 10 – аккумуляторы двигателей, 11 – направляющие ультразвукового датчика, 12 – телескопическое устройство, 13 – драйверы L298N, 14 – батарея L298N, 15 – шатунное устройство

Проведены эксперименты по определению динамической погрешности датчика HC-SR04 в зависимости от скорости движения, дистанции, материала и формы препятствия. Установлено, что на скорости 60 мм/с ошибка может достигать 160 мм (рисунки 18, 19).

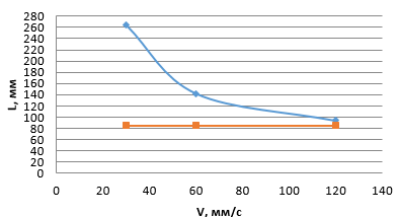


Рисунок 18 – Динамическая погрешность на дистанции 80 мм

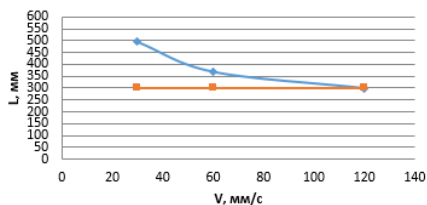


Рисунок 19 – Динамическая погрешность на дистанции 300 мм

Для обеспечения робастности системы управления исследовалась зависимость отклика датчика от материала и геометрии объекта. Показано, что для твердых материалов (кирпич, стекло) погрешность незначительна, для пористых (картон) возникает систематическое смещение около -10 мм (рисунок 20). Для его компенсации и повышения устойчивости работы системы в алгоритм расчёта целевого угла φ_3 введен коэффициент запаса $k_{saf} = 1.05$,

обеспечивающий дополнительный резерв при формировании управляющего воздействия. При уменьшении ширины с 800 до 100 мм ошибка возрастает до 7 мм (3,5 %) на дистанции 200 мм, тогда как при 400 мм при той же абсолютной погрешности относительная ошибка менее 1,7% (рисунок 21). Поэтому сканирование целесообразно выполнять с дистанции 400 мм, обеспечивающей более высокую достоверность измерений.

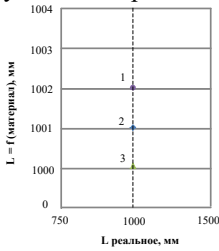


Рисунок 20 – Влияние коэффициента отражения материала на точность измерения: 1 – кирпич, 2 – стекло, 3 – картон

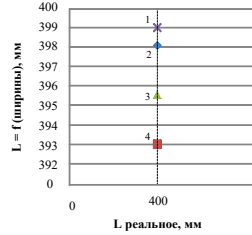
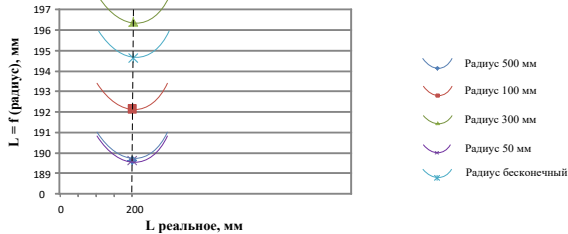
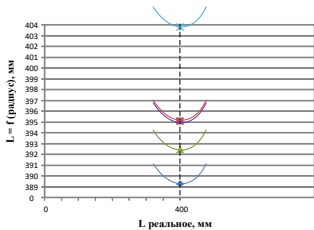


Рисунок 21 – Зависимость погрешности от ширины препятствия: 1 – 800 мм, 2 – 400 мм, 3 - 200 мм, 4 - 100 мм

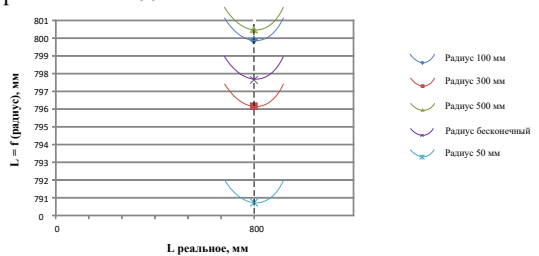
Оценка влияния формы препятствия на точность измерений проводилась для объектов с различными радиусами кривизны: 50, 100, 300, 500 мм, а также для плоской поверхности (бесконечный радиус) (рисунок 22). Показано, что с уменьшением радиуса кривизны относительная погрешность возрастает и достигает 5%. Установлено, что минимальная погрешность, слабо зависящая от радиуса объекта, достигается при дистанции порядка 1000 мм.



а) расстояние 200 мм



б) расстояние 400 мм



в) расстояние 800 мм

Рисунок 22 – Характеристики обнаружения препятствий сложной формы

Измерение высоты препятствия шириной 540 мм дает погрешность не более 4% до 800 мм (рисунок 23), но для узких препятствий (160 мм) ошибка на дальних дистанциях достигает 50% (рисунок 24). На основе анализа установлено граничное условие: для надежного определения высоты дистанция сканирования не должна превышать 300 мм.

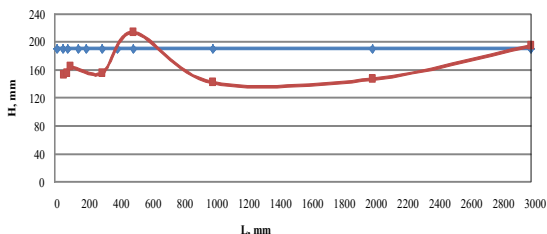


Рисунок 23 – Зависимость результатов измерения высоты препятствия от расстояния (ширина препятствия 540 мм)

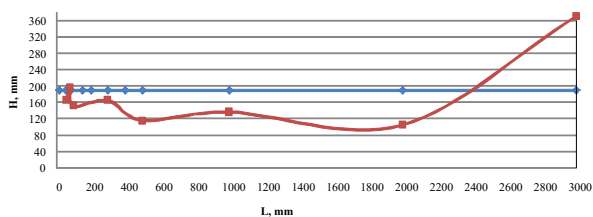


Рисунок 24 – Зависимость результатов измерения высоты препятствия от расстояния (ширина препятствия 160 мм)

Разработано программное обеспечение на C++ в среде Arduino IDE, реализующее иерархическую архитектуру: драйверы, модули кинематики, навигации и конечный автомат (FSM). С учетом метрологических ограничений внедрен алгоритм Stop-and-Scan: робот приближается к препятствию до расстояния менее 300 мм, останавливается, затем выполняет вертикальное сканирование с шагом 5 мм (рисунок 25).

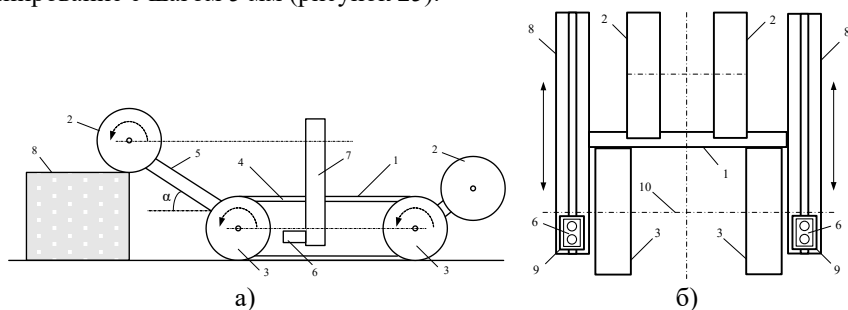


Рисунок 25 – Конструкция механизма активного вертикального сканирования: 1 – платформа, 2 – колесо колёсной группы, 3 – колесо гусеничной группы, 4 – гусеница, 5 – система рычагов, 6 – ультразвуковой датчик, 7 – приводной блок датчика, 8 – бесштоковый цилиндр, 9 – каретка цилиндра, 10 – продольная ось гусеничных групп.

Для синхронизации приводов применен алгоритм перекрестной связи (cross coupling), ограничивающий рассогласование энкодеров в пределах 1° . Реализованы защиты: watchdog, timeout, мягкий старт ШИМ.

Настройка ПИД-регулятора и оценка положения штока проводились комбинированным методом. Начальные коэффициенты настройки регулятора выбиралось на основе результатов моделирования ($K_p = 45$, $K_d = 3.0$, $K_i = 0$). В реальной системе из-за упругих деформаций возникло перерегулирование $\approx 5\%$, устраненное введением $K_d = 3.0$. Остаточная статическая ошибка ($\delta_{st} \approx 0,3$ мм) компенсирована включением интегральной составляющей $K_i = 0,15$ с, что свело ошибку к нулю. Сравнение с моделью показало: расхождение по времени регулирования менее 4% (7,0 с модель, 7,25 с эксперимент), по напряжению удержания – 0,2 В (8,0 В модель, 8,2 В эксперимент), что подтверждает адекватность модели и правильность идентификации сил трения и нагрузки.

Проведены испытания по автономному преодолению ступени высотой 150 мм. Процесс зафиксирован на кадрах (рисунок 26).

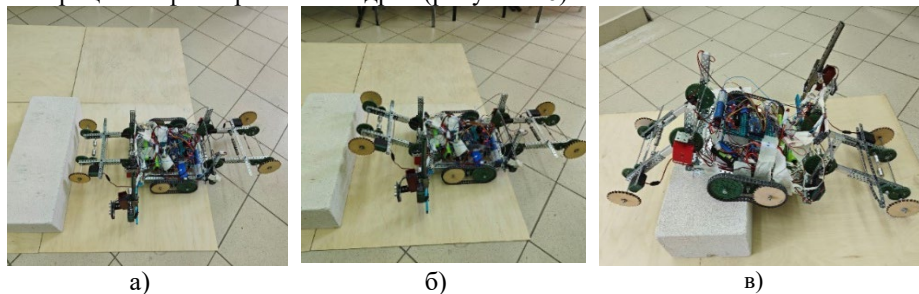


Рисунок 26 – Испытания по автономному преодолению препятствий: а) фаза сканирования (определение высоты препятствия), б) активация системы реконфигурация (телескопические опоры), в) фаза преодоления препятствия и фиксация положения

На этапе сканирования измеренная высота составила 150 ± 2 мм, что подтверждает эффективность алгоритма Stop-and-Scan. При реконфигурации синхронное выдвигание штоков и телескопических опор предотвратило опрокидывание. В фазе фиксации благодаря геометрической блокировке (упоры и сингулярность) напряжение удержания снизилось до 8,2 В, ток – до 0,4 А, что в 6 раз меньше расчетного без блокировки, подтверждая энергоэффективность механизма. Перекос рамы не превысил 1° , деформации отсутствовали.

В заключении работы сформулированы основные результаты:

1. Разработана и обоснована новая кинематическая схема механизма реконфигурации, отличительной особенностью которой является наличие сингулярной конфигурации («мертвой точки») и системы механических упоров. Теоретически доказано, что данное решение позволяет трансформировать подвижную кинематическую цепь в жесткую статическую ферму, обеспечивая фиксацию шасси без нагрузки на электропривод.

2. Предложена методика параметрического синтеза механизма реконфигурации. На основе многокритериальной оптимизации определены геометрические параметры звеньев, обеспечивающие требуемый диапазон углов трансформации ($80^\circ \dots 150^\circ$) и минимизацию пиковых усилий при использовании стандартных линейных приводов.

3. Разработана архитектура системы управления мобильным реконфигурируемым роботом, включающая верхний уровень режимной логики на базе конечного автомата и нижний уровень локальных контуров управления исполнительными механизмами. В структуру системы введен модуль автоматического восстановления работоспособности, реализованный на основе специальных диагностических состояний и возвратных переходов конечного автомата, активируемых при сбоях позиционирования, превышении допустимого времени выполнения операций и рассогласовании приводов, обеспечивающий автономный выход робота из аварийных режимов без участия оператора.

4. Реализован алгоритм активного сканирования «Stop-and-Scan». Предложенный метод устраняет недостатки ультразвуковой навигации, связанные с шириной диаграммы направленности, и обеспечивает построение профиля препятствий с точностью ± 2 мм, достаточной для автономного принятия решений о реконфигурации. Получены и проанализированы рабочие характеристики ультразвукового датчика с учетом вносимых погрешностей, зависящих от скорости перемещения робота, материала препятствия и его габаритов.

5. Разработана стратегия управления с насыщением (High Gain / Saturation Strategy). Теоретически и экспериментально доказано, что в условиях существенных нелинейностей (зона нечувствительности, сухое трение) данный метод обеспечивает снижение статической ошибки позиционирования до 0,2 мм без возникновения перерегулирования.

6. Создан экспериментальный образец робота и проведены экспериментальные исследования, результаты которых подтвердили эффективность разработанных технических решений:

- энергопотребление в режиме удержания снижено в 6 раз, при этом напряжение, достаточное для удержания контакта с упором, составило 8,2 В в отличие от номинального 12 В;

- робот продемонстрировал способность автономно преодолевать вертикальные препятствия высотой до 150 мм и лестничные марши.

7. Практическая значимость работы подтверждена соответствием разработанной методики испытаний и характеристик робота требованиям национальных стандартов Российской Федерации в области робототехники для экстремальных условий.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ

1. У, Цюе. Расчет и оптимизация работы механизма реконфигурации колесно-гусеничного мобильного робота / Ц. У, М.Ю. Рачков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022 – Т. 23. – № 4. – С. 209-215.
2. Рачков, М.Ю. Ультразвуковая локационная система мобильного реконфигурируемого робота / М.Ю. Рачков, Цюе У // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. – 2024. – № 4. – С. 23-32.
3. У, Цюе. Управление реконфигурацией робота методом активного сканирования и стратегии насыщения / Цюе У, М.Ю. Рачков, Е.В. Гапоненко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2026. – № 5. – С. 106-117.

Статьи в зарубежных изданиях, включённых в систему цитирования Scopus

4. Wu, Que. Reconfiguration Mechanism Analysis of the Wheel-Track Robot / Que Wu, M. Yu. Rachkov // Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2023). Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Cham: Springer, 2023. – p. 11–21.
5. Wu, Que. Ultrasonic Location System of a Reconfigurable Mobile Robot, M. Rachkov, Que Wu // 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon): proceedings. — Sochi, Russian Federation, 2024. — p. 994–999.
6. Rachkov, M. Optimal Control of a Delayed Model for an Industrial Robot Manipulator / M. Rachkov, Que Wu // 2025 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon): proceedings. — Sochi, Russian Federation, 2025. — P. 165–169.

В других научных журналах и изданиях

7. Rachkov, M. Yu. Development of transport robot with a reconfigurable structure / M. Yu Rachkov, Que Wu. // Journal of Nanyang Institute of Technology, Editorial Department of Journal of Nanyang Institute of Technology. – 2021. – Vol.13, №.2. – p. 48-52.
8. У, Цюе. Новые тенденции в развитии мобильных реконфигурируемых роботов // Инновации. Наука. Образование. – № 29, 2021. – С. 175-180.
9. У, Цюе. Исследование кинематики реконфигурации колёсно-гусеничного робота / Цюе У, М.Ю., Рачков // Science and Technology Innovations: сб. ст. VII Междунар. науч.-практ. конф. — 2022 (март). — С. 38–43.
10. У, Цюе. Разработка информационного контура системы управления мобильным реконфигурируемым роботом / Цюе У, М.Ю. Рачков // Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. XXIV Междунар. науч.-практ. конф. — 2022 (апрель). — С. 73–77.
11. У, Цюе. Особенности использования ультразвукового датчика препятствий для мобильного робота / Цюе У, М.Ю. Рачков // Актуальные научные исследования: сб. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. — Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2023. — С. 59–65.
12. Рачков, М. Ю. Особенности измерения расстояния до препятствий разной формы ультразвуковым датчиком мобильного робота / М.Ю. Рачков, Цюе

У // Современные исследования высшей школы – 2024: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (Петрозаводск, 27 февраля 2024 г.). — 2024. — С. 31–38.

13. Рачков, М. Ю. Постановка задачи управления для билинейной модели манипулятора / М. Ю. Рачков М.Ю., Цюе У // Наука и образование – 2024: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (Петрозаводск, 11 апреля 2024 г.). — Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2024. — С. 47–53.

14. У, Цюе. Автономный технологический мобильный робот / Цюе У, М.Ю. Рачков, А.П. Адылина // СМиС-2024. Технологии управления качеством: тр. Междунар. науч.-техн. конф. (Россия, Москва, 22–24 мая 2024 г.). — 2024. — С. 373–378.

15. Рачков, М. Ю. Система Управления бортовым манипулятором при максимальном быстродействии / М. Ю. Рачков М.Ю., Цюе У // WORLD OF SCIENCE: сб. ст. X Междунар. науч.-практ. конф. — Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2024. — С. 70–73.

16. У, Цюе. Система управления преодолением препятствий для трансформируемого робота на основе PID-регулирования / Цюе У, М.Ю. Рачков, М.В. Архипов // СМиС-2025. Технологии управления качеством: тр. Междунар. науч.-техн. конф. (Россия, Москва, 21–24 мая 2025 г.). — 2025. — С. 452–456.

17. У, Цюе. Система управления мобильным трансформируемым роботом на платформе ARDUINO / Цюе У, М. Ю. Рачков, М. В. Архипов // СМиС-2025. Технологии управления качеством: тр. Междунар. науч.-техн. конф. (Россия, Москва, 21–24 мая 2025 г.). — 2025. — С. 456–459.

Патенты

18. Патент на полезную модель № 228192. Гусенично-колёсное транспортное средство с рычажным приводом: № 2024118845: заявл. 05.07.2024: опубл. 19.08.2024 / М. Ю. Рачков, У Цюе; заявитель, патентообладатель Московский политехнический университет. — 10 с.

19. Патент на полезную модель № 230281. Автоматическое гусенично-колёсное транспортное средство: № 2024118770: заявл. 04.07.2024: опубл. 25.11.2024 / М. Ю. Рачков, У Цюе; заявитель, патентообладатель Московский политехнический университет. — 7 с.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025682232 (Российская Федерация). Программа для системы управления автономным мобильным реконфигурируемым роботом при автоматическом преодолении препятствий: заявка № 2025668444 от 21.07.2025: дата гос. регистрации 21.08.2025 / У Цюе, М. Ю. Рачков, М. В. Архипов; правообладатели: М. В. Архипов, У Цюе, М. Ю. Рачков.

Подписано в печать 07.04.26 г. Заказ № 53. Тираж 100 экз. Печ. л. 1

Формат 60 x 80 1/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Отпечатано в типографии Издательства БГТУ им. В.Г. Шухова 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.