

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

На правах рукописи



У Цюе

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

Специальность 2.5.4 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р. техн. наук, профессор
Рачков Михаил Юрьевич

Москва 2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ РОБОТОВ.....	16
1.1 Типы традиционных передвижных платформ и их сравнительный анализ ...	16
1.2 Анализ архитектур систем управления мобильными робототехническими платформами.....	25
1.2.1 Централизованные системы управления	25
1.2.2 Иерархические системы управления	27
1.2.3 Модульные и гибридные архитектуры системы управления.....	28
1.3 Формализация процесса реконфигурации и постановка задачи исследования	29
Выводы по главе.....	36
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМА РЕКОНФИГУРАЦИИ РОБОТА.....	38
2.1 Разработка математической модели кинематики и квазистатики механизма реконфигурации	38
2.2 Многокритериальная оптимизация параметров механизма	44
2.3 Конструктивная схема и динамический анализ механизма	49
Выводы по главе.....	51
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОМ РЕКОНФИГУРАЦИИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.....	53
3.1 Архитектура системы управления и аппаратная реализация.....	53
3.1.1 Анализ погрешностей системы акустической локации	55
3.1.2 Математическая модель активного вертикального сканирования	57
3.1.3 Выбор датчика обратной связи и анализ эффектов дискретизации	59
3.1.4 Синтез алгоритма для реализации стратегии активного сканирования и реконфигурации	61
3.2 Математическое и имитационное моделирование системы управления реконфигурацией.....	64
3.2.1 Структура и состав двухканальной системы управления.....	64

3.2.2	Имитационное моделирование динамики привода в среде MATLAB/Simulink	67
3.2.3	Анализ временных характеристик и качества переходных процессов.....	70
3.2.4	Частотный анализ устойчивости	74
3.3	Моделирование и анализ тягового электропривода.....	76
3.4	Анализ нелинейностей и результаты моделирования.....	79
3.4.1	Анализ границ устойчивости и статической ошибки линейного регулятора.....	80
3.4.2	Формирование эталонной динамики и анализ предельных возможностей привода	82
3.4.3	Исследование нелинейной динамики и обоснование эффективности режима насыщения	84
	Выводы по главе.....	86
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫМ РОБОТОМ.....		88
4.1	Цифровое проектирование реконфигурируемого робота.....	87
4.2	Разработка экспериментального образца реконфигурируемого робота.....	93
4.3	Метрологическое исследование характеристик ультразвуковой навигационной системы	95
4.4	Программная реализация системы управления и алгоритмов активного сканирования	105
4.5	Экспериментальные исследования и верификация характеристик робота.....	109
	Выводы по главе.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		117
ПРИЛОЖЕНИЕ 1		129
ПРИЛОЖЕНИЕ 2		155
ПРИЛОЖЕНИЕ 3		156
ПРИЛОЖЕНИЕ 4		157

ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....	159

ВВЕДЕНИЕ

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.

Степень разработанности темы исследования

Проблема создания и управления мобильными роботами, способными адаптироваться к неструктурированным средам, находится в центре внимания ведущих мировых и отечественных научно-исследовательских коллективов.

Существенный задел в области теории и практики реконфигурируемых систем сформирован отечественными научными школами под руководством А.В. Мельникова (ЦНИИмаш), которые заложили концептуальные основы проектирования многоопорных шасси для экстремальных условий эксплуатации; Ю.А. Капустина и А.Н. Куприянова (МГТУ им. Н.Э. Баумана) - развитие принципов мехатронного управления сложными кинематическими цепями приводов реконфигурации; С.В. Емельянова и А.А. Сафонова (ИПУ РАН), которые создали фундаментальную базу теории систем с переменной структурой и робастного управления, что критически важно для механизмов, меняющих свою динамику в процессе трансформации; В.Г. Герасимова (СПбПУ) и И.Б. Мещерякова (ИТМО), которые внесли существенный вклад в теорию построения мультимодальных систем восприятия и дистанционного управления в условиях сенсорной неопределенности; Д.В. Андреева и В.Н. Попова (ИДСТУ РАН), которые предложили алгоритмы интеллектуальной стабилизации движения при смене кинематических режимов.

Обзор литературы по тематике диссертации позволил систематизировать текущее состояние исследований по следующим ключевым направлениям:

- архитектура управления – широко применяются иерархические и гибридные схемы, где переключение режимов движения реализуется на базе конечных автоматов;

- механизмы реконфигурации – доминируют модульные конструкции с изменяемой геометрией (колесно-рычажные, гусеничные трансформеры), однако большинство из них реализует механическое сложение движителей без возможности жесткой фиксации;

- алгоритмы управления – для управления приводами широко используются классические ПИД-регуляторы с фильтрацией, однако их эффективность падает при наличии существенных нелинейностей (люфты, сухое трение) в стандартных приводах;

- сенсорные датчики – для оценки препятствий применяются ультразвуковые датчики и лидары. Отмечено, что стандартные УЗ-датчики имеют узкую диаграмму

направленности и склонны к ошибкам на наклонных поверхностях, что требует применения методов фильтрации (медианные фильтры, скользящее окно).

Несмотря на значительный объем исследований, существующие подходы имеют ряд ограничений, которые сдерживают создание эффективных бюджетных спасательных роботов, а именно:

- большинство конструкций не обеспечивает механической разгрузки приводов в транспортном режиме, что снижает надежность системы при ударных нагрузках;

- методы навигации зачастую опираются на дорогостоящие системы технического зрения (лидары), в то время как потенциал активного сканирования доступными сенсорами раскрыт не полностью;

- отсутствуют эффективные методики синтеза управления для дешевых линейных приводов, работающих в условиях насыщения по скорости и высокого трения.

Указанные факторы определяют необходимость проведения дальнейших исследований, направленных на создание интегрированной системы управления, сочетающей механическую надежность, сенсорную автономность и алгоритмическую робастность.

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.

Цель работы

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 работе решаются 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.

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.

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.

Положения, выносимые 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 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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПЕРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ РОБОТОВ

Современные мобильные робототехнические комплексы (МРК) сталкиваются с всё возрастающими вызовами при эксплуатации в сложных и непредсказуемых условиях окружающей среды, таких как зоны стихийных бедствий, техногенные завалы, разрушенная городская инфраструктура и пересеченная местность. Эти условия предъявляют жесткие и зачастую противоречивые требования к локомотивным системам: с одной стороны — необходимость высокой скорости выдвижения к цели, с другой — обеспечение устойчивости и проходимости на грунтах с низкой несущей способностью.

В данном контексте особое внимание исследователей и инженеров привлекает класс реконформируемых (трансформируемых) колесно-гусеничных роботов [1-7]. Они призваны объединить преимущества скоростных колесных шасси и высокопроходимых гусеничных движителей, обеспечивая адаптацию кинематической структуры робота к текущему рельефу. Целью данной главы является систематизация текущего состояния исследований в области мобильной робототехники, выявление фундаментальных ограничений традиционных кинематических схем и архитектур управления, а также теоретическое обоснование необходимости разработки новых механизмов с системой геометрической блокировки и адаптивных алгоритмов управления. В главе проводится сравнительный анализ существующих платформ, формализуются задачи устойчивости и энергоэффективности, что формирует базис для постановки конкретных задач диссертационного исследования.

1.1 Типы традиционных передвижных платформ и их сравнительный анализ

В условиях развития современной техносферы задачи, стоящие перед мобильными робототехническими комплексами, существенно усложняются. Если ранее роботы применялись преимущественно в структурированных средах (цехах, складах), то сегодня вектор развития смещается в сторону автономных действий в

неструктурированном окружении — зонах стихийных бедствий, техногенных катастроф и на строительных площадках [8, 9].

Анализ мирового опыта показывает, что эффективность выполнения спасательных и разведывательных операций напрямую зависит от соответствия кинематической структуры робота характеристикам внешней среды [10, 11]. В данном разделе проводится анализ роли роботов в чрезвычайных ситуациях, классификация существующих платформ и обоснование необходимости перехода от жестких конструкций к адаптивным реконфигурируемым системам.

В современных условиях проведения спасательных операций и ликвидации последствий техногенных катастроф ключевым приоритетом является минимизация рисков для жизни и здоровья личного состава спасательных формирований. МРК способны эффективно заменять человека при выполнении технологических операций в агрессивных средах — зонах химического и радиационного заражения, в полостях разрушенных зданий, а также на объектах с высоким риском повторных обрушений или взрывов [12-16]. Применение робототехнических средств позволяет не только исключить непосредственное присутствие человека в опасной зоне, но и выполнить первичное инструментальное обследование пространства, недоступного для традиционной техники [17].

В соответствии с тактикой проведения поисково-спасательных работ (ПСР), выделяют три последовательных этапа, на которых применение мобильных роботов является критически важным [12]:

1. Инженерная разведка и оценка обстановки. На данном этапе робот выполняет построение карты местности, определяет уровень загазованности или радиационного фона, а также оценивает устойчивость строительных конструкций [14].

2. Поиск и локализация пострадавших. С использованием бортовых тепловизионных камер, акустических датчиков и газоанализаторов робот осуществляет поиск живых людей под завалами, передавая оператору их точные координаты и данные о состоянии [18].

3. Проведение неотложных аварийно-спасательных работ. Данный этап включает доставку медикаментов и средств связи пострадавшим, деблокирование проходов манипуляторами, а также локализацию очагов возгорания [19].

Критическим фактором, определяющим эффективность выполнения всех перечисленных задач, является проходимость мобильной платформы. Робот должен сохранять устойчивость и функциональность сенсорного оборудования при движении по поверхностям с хаотичной структурой (обломки бетона, арматура, сыпучий грунт).

Именно жесткие требования к проходимости и устойчивости в условиях неопределенного микрорельефа обуславливают необходимость отказа от традиционных жестких конструкций шасси в пользу адаптивных систем, способных изменять свою конфигурацию [20-22].

В современной робототехнике классификация мобильных платформ осуществляется преимущественно по типу движителя, который определяет кинематику движения и взаимодействия с опорной поверхностью. Традиционно выделяют три основных класса: колёсные, гусеничные и шагающие системы. Каждый из этих классов занимает свою нишу в зависимости от требований к быстродействию, проходимости и энергопотреблению.

Сравнительный анализ эксплуатационных характеристик и конструктивных особенностей данных платформ представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнительная характеристика типов мобильных платформ

Тип платформы	Преимущества	Недостатки	Типовые представители
Колёсная	Высокая скорость перемещения по твердым покрытиям; Высокая энергетическая эффективность; Простота кинематической схемы и управления.	Низкий коэффициент сцепления на рыхлых грунтах; Невозможность преодоления вертикальных препятствий высотой более 0,5 диаметра колеса.	Nomad (NASA), Shrimp (EPFL), Zhu Rong (CNSA)
Гусеничная	Максимальная площадь пятна контакта; Низкое удельное давление на грунт; Высокая статическая устойчивость на склонах.	Высокие потери энергии на трение скольжения при повороте; Ограниченная скорость движения; Повышенный износ ходовой части.	Talon (QinetiQ), PackBot (iRobot), Andros F6A

Таблица 1.1 – Сравнительная характеристика типов мобильных платформ (продолжение)

Шагающая	Дискретный выбор точек опоры (адаптивность); Возможность преодоления высоких препятствий без контакта с их профилем.	Сложность системы автоматического управления (САУ); Низкая грузоподъемность; крайне высокое энергопотребление.	Atlas (Boston Dynamics), BigDog
----------	--	--	---------------------------------

Рассмотрим особенности каждого типа подробнее с привязкой к реальным конструкциям:

1. Колёсные платформы. Данный класс роботов наиболее эффективен в условиях, допускающих движение с высокими скоростями. Примером может служить исследовательский робот Nomad (рисунок 1.1) [23], разработанный для длительных автономных переходов в полярных условиях. Его шасси обеспечивает высокую энергоэффективность, однако проходимость ограничена геометрией колес [24-26].



Рисунок 1.1 – Мобильная платформа Nomad (NASA)

Для компенсации недостатков колесной схемы применяются пассивные адаптивные подвески [27, 28]. Робот Shrimp (рисунок 1.2) реализует концепцию шарнирно-сочлененного шасси, что позволяет пассивно адаптировать положение колес к неровностям рельефа [29, 30]. Марсоход Zhu Rong (рисунок 1.3) также использует колесную базу с активной подвеской для повышения живучести в условиях каменистого грунта [31, 32].



Рисунок 1.2 – Робот Shrimp с пассивной адаптивной подвеской

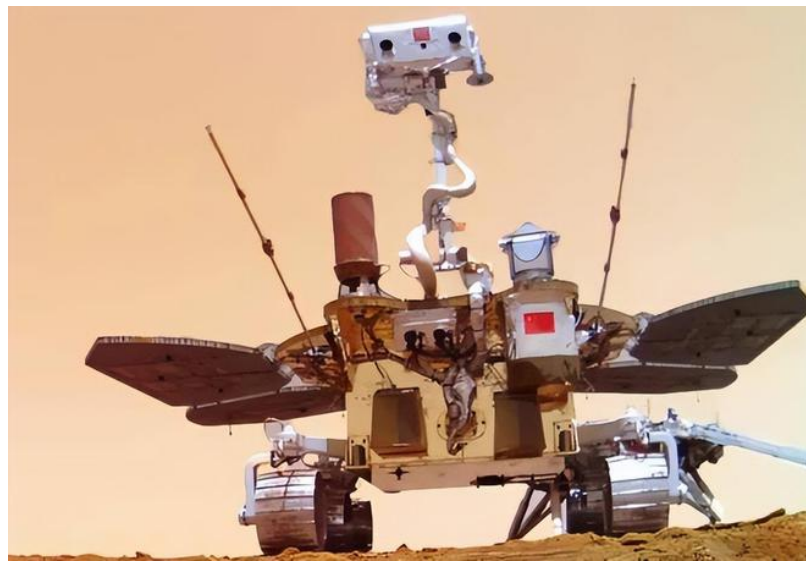


Рисунок 1.3 – Планетоход Zhu Rong (CNSA)

2. Гусеничные платформы Гусеничные роботы являются стандартом для тактических и поисково-спасательных операций благодаря своей надежности [33-35]. Платформы Talon и PackBot (рисунок 1.4) оснащены дополнительными поворотными консолями («флипперами»), которые позволяют изменять угол атаки гусениц для заезда на лестничные марши [36, 37].



а)



б)

Рисунок 1.4 – Гусеничные платформы: а) Talon; б) PackBot

Однако существуют тяжелые платформы, такие как Andros F6A (рисунок 1.5) [38], которые, обладая высокой грузоподъемностью, имеют низкую маневренность и не способны к динамическому преодолению препятствий, что ограничивает их применение задачами разминирования на относительно ровных площадках [39].



Рисунок 1.5 – Робот Andros F6A

3. Шагающие платформы Антропоморфные системы, такие как Atlas (рисунок 1.6), демонстрируют максимальный уровень адаптации к среде, но требуют значительных вычислительных ресурсов для поддержания динамического равновесия, что делает их малоприспособленными для длительных автономных миссий в условиях ЧС [40-42].



Рисунок 1.6 – Шагающий робот Atlas (Boston Dynamics)

Чтобы обосновать необходимость разработки гибридной системы, проведен сравнительный анализ удельных энергетических и кинематических параметров существующих аналогов (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Технические характеристики современных мобильных роботов

Наименование платформы	Тип движителя	Скорость движения V , м/с	Удельная мощность, Вт/кг	Коэффициент сцепления, μ	Преодолеваемая высота H_{pass} , см
Nomad	Колесный	0,8	25	0,65	20
PackBot	Гусеничный	1,2	32	0,75	30
Atlas	Шагающий	1,5	40	0,80	35
Zhu Rong	Колесный	0,2	18	0,60	15

Обобщение данных позволило сформировать диапазоны предельных характеристик для каждого класса движителей, представленные в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Диапазоны эксплуатационных характеристик мобильных платформ

Параметр сравнения	Колёсные платформы	Гусеничные платформы	Шагающие платформы
Скорость движения V , м/с	1,5 – 3,0	0,5 – 1,2	0,3 – 0,8
Энергетические затраты E , Вт · ч/м	5 – 20	10 – 40	40 – 120
Коэффициент сцепления μ	0,5 – 0,7	0,7 – 0,9	—
Макс. угол подъема, град	$\leq 10^\circ$	$15^\circ - 45^\circ$	$\geq 45^\circ$
Высота препятствия H_{pass} , см	20 – 30	30 – 45	≥ 50

Анализ табличных данных показывает наличие следующих проблем:

1. Колесные системы обладают наилучшей энергоэффективностью (5-20 Вт·ч/м) и скоростью, но критически теряют проходимость при углах наклона $> 10^\circ$ и на препятствиях высотой более 30 см.

2. Гусеничные системы обеспечивают требуемое сцепление ($\mu \approx 0,9$), но проигрывают в скорости и автономности.

Следовательно, создание универсального спасательного робота невозможно в рамках одной традиционной схемы. Необходима реализация гибридного подхода, сочетающего скоростные качества колес и проходимость гусениц, что реализуется в классе реконфигурируемых (трансформируемых) систем [43-49].

Проведенный сравнительный анализ эксплуатационных характеристик показывает, что современные колёсные, гусеничные и шагающие платформы обладают рядом фундаментальных конструктивных ограничений. Эти ограничения препятствуют эффективному выполнению спасательных операций в условиях сложного и непредсказуемого рельефа.

Анализ позволяет сгруппировать основные недостатки традиционных (нереконфигурируемых) систем по трём ключевым категориям:

1. Кинематические ограничения. Фиксированная геометрия опорного контура не позволяет адаптировать форму шасси к профилю поверхности. При движении по локальным неровностям (ступеням, обломкам плит) колесные платформы теряют контакт с опорной поверхностью, что приводит к пробуксовке и потере управляемости [50, 51].

2. Динамические ограничения. В традиционных схемах положение центра масс робота C относительно геометрического центра шасси остается неизменным. При движении по наклонным поверхностям или преодолении высоких препятствий это приводит к возникновению критического опрокидывающего момента [52, 53].

3. Ограничения по управлению. Использование централизованных архитектур управления не обеспечивает достаточной гибкости при изменении динамики взаимодействия движителя с грунтом, что вызывает задержки реакции и потерю устойчивости [54].

С точки зрения положений теоретической механики, устойчивость мобильной платформы определяется положением проекции центра масс C относительно опорного многоугольника S . Условие статической устойчивости формулируется следующим образом:

$$C \in S,$$

где S — выпуклая оболочка точек контакта движителя с поверхностью.

Для традиционных платформ множество S является инвариантным (неизменным), что жестко ограничивает предельный угол наклона поверхности, который способен преодолеть робот.

Реконфигурация (трансформация) подразумевает способность системы динамически изменять множество опорных точек $S(t)$ и положение центра масс $C(t)$ в процессе движения [55]. Это позволяет:

- увеличивать площадь S для повышения запаса устойчивости на склонах;
- смещать центр масс C вперед или назад для предотвращения опрокидывания при заезде на вертикальные уступы;
- изменять клиренс для преодоления высоких препятствий без касания днищем.

Концептуальная схема такой платформы (на примере робота iRobot PackBot) представлена на рисунке 1.7 [56].



Рисунок 1.7 – Схема реконфигурируемой колесно-гусеничной платформы

Процесс изменения конфигурации описывается вектором обобщенных координат $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$, определяющим положение приводов трансформации. Кинематические ограничения, накладываемые на систему, в общем виде записываются как

$$A(q)\dot{q} = 0,$$

где $A(q)$ — матрица ограничений Пфаффа.

Отличительной особенностью реконфигурируемых систем является то, что матрица $A(q)$ изменяется во времени в зависимости от текущего режима движения (колесный, гусеничный или переходный). Это делает задачу управления такой системой существенно более сложной, чем управление классическим роботом, и

требует применения адаптивных алгоритмов, способных стабилизировать платформу в условиях переменной структуры.

Таким образом, обоснованным техническим решением, позволяющим устранить противоречие между скоростью, проходимостью и устойчивостью, является создание колёсно-гусеничных реконфигурируемых роботов. Однако, их практическая реализация требует разработки специализированных систем управления, учитывающих нелинейную динамику процесса трансформации, что и является предметом данного исследования.

1.2 Анализ архитектур систем управления мобильными робототехническими платформами

Система управления (СУ) мобильным роботом является критически важным компонентом, который должен обеспечивать не только устойчивое движение платформы в условиях изменяющегося рельефа, но и строгую синхронизацию работы исполнительных механизмов при переходе между кинематическими режимами.

В современной робототехнике, в зависимости от сложности решаемых задач и аппаратной реализации, применяются различные архитектурные подходы. Их можно классифицировать на четыре основные группы: централизованные, иерархические, модульные и гибридные [57]. Рассмотрим их особенности применительно к задачам управления реконфигурируемыми системами.

1.2.1 Централизованные системы управления

Централизованные архитектуры исторически являются первыми и наиболее распространенными в робототехнике. В их основе лежит принцип концентрации всех вычислительных и логических операций в едином управляющем центре (Host-контроллере), который осуществляет сбор сенсорной информации, планирование траектории и генерацию управляющих сигналов для всех исполнительных механизмов [57].

В такой схеме датчики (энкодеры, гироскопы, дальномеры) и исполнительные устройства (драйверы двигателей) не обладают собственной «интеллектуальностью» и выступают лишь в роли периферийных устройств ввода-вывода. Хост-контроллер циклически опрашивает датчики, решает обратную задачу кинематики и отправляет команды ШИМ (PWM) на приводы.

Ключевыми достоинствами централизованного подхода являются:

1. Простота архитектуры, отсутствие необходимости в разработке протоколов сложного межмодульного взаимодействия.
2. Глобальная оптимизация. Контроллер имеет доступ ко всем переменным состояния системы одновременно, что облегчает задачу координации движений.
3. Упрощенная диагностика. Вся логика сосредоточена в одном программном коде, что упрощает отладку.

Однако при увеличении числа степеней свободы, что характерно для реконфигурируемых платформ (наличие приводов колес, гусениц и механизмов трансформации), централизованная схема сталкивается со следующими проблемами [58]:

1. Вычислительная перегрузка. Необходимость обработки потоков данных от лидаров, камер и множества энкодеров в реальном времени приводит к резкому росту нагрузки на центральный процессор. Это вынуждает использовать мощные и энергоемкие вычислители, что снижает автономность мобильного робота.
2. Снижение скорости реакции. Последовательная обработка задач в едином цикле управления увеличивает время отклика системы. В критических ситуациях задержка даже в 50–100 мс может привести к опрокидыванию платформы.
3. Единая точка отказа. Выход из строя центрального контроллера или сбой в основном цикле программы приводит к полной потере работоспособности робота, так как периферийные драйверы не способны действовать автономно.

Таким образом, централизованные системы управления не обеспечивают требуемой гибкости и отказоустойчивости при управлении сложными роботами с изменяемой геометрией шасси. Их применение оправдано лишь для простых лабораторных макетов, но не для автономных спасательных роботов, действующих в непредсказуемой среде.

1.2.2 Иерархические системы управления

Иерархический подход представляет собой эволюционное развитие систем управления, направленное на преодоление вычислительных ограничений централизованных архитектур. Сущность данного подхода заключается в декомпозиции глобальной задачи управления на ряд подзадач, распределенных между несколькими вертикальными уровнями ответственности [59].

Как правило, в робототехнике выделяют три функциональных уровня управления [60]:

1. Верхний уровень (стратегический): глобальное планирование миссии, построение карты местности (SLAM), распознавание целей и выбор режима движения (например, «перейти в режим гусеничного хода»). Выполняется на высокопроизводительном бортовом компьютере с большим периодом дискретизации.

2. Средний уровень (тактический): преобразование высокоуровневых команд в кинематические траектории для исполнительных органов. Здесь решаются прямая и обратная задачи кинематики. Выполняется на микроконтроллерах среднего звена.

3. Нижний уровень (исполнительный): непосредственное управление электроприводами (ПИД-регулирование), обработка сигналов с энкодеров и концевых выключателей, фильтрация шумов. Выполняется на драйверах двигателей и специализированных контроллерах реального времени.

Иерархические архитектуры демонстрируют высокую эффективность для платформ со сменной конфигурацией [61, 62]. Они обеспечивают:

1. Разделение вычислительных задач. Сложные алгоритмы навигации не блокируют быстрые циклы стабилизации приводов.

2. Локальную автономность. Сбой на верхнем уровне не приводит к немедленной потере контроля над двигателями, нижний уровень продолжает поддерживать заданную скорость или удерживать позицию.

3. Масштабируемость. Добавление новых модулей требует лишь интеграции нового контроллера нижнего уровня без переписывания всего кода.

Существенным недостатком многоуровневых систем является наличие задержек при передаче данных между уровнями. В условиях движения в ограниченном пространстве или при динамической реконфигурации, когда требуется мгновенная реакция на изменение угла наклона корпуса, задержка в цепи обратной связи « датчик → нижний уровень → верхний уровень → решение → привод » может привести к потере устойчивости [58].

Иерархическая структура решает проблему вычислительной перегрузки, но требует тщательной оптимизации протоколов обмена данными для минимизации задержек.

1.2.3 Модульные и гибридные архитектуры системы управления

Развитие микропроцессорной техники привело к появлению децентрализованных подходов к построению систем управления, среди которых доминирующее положение занимают модульные и гибридные архитектуры [57, 58].

Модульная архитектура базируется на принципе функциональной автономии узлов, взаимодействующих друг с другом через стандартизированные интерфейсы передачи данных (CAN, RS-485, I2C) [63-65]. В контексте мобильных реконфигурируемых платформ система управления декомпозируется на ряд функционально независимых модулей:

1. Модуль локомоции - управление тяговыми двигателями колес или гусениц.
2. Модуль реконфигурации - управление линейными приводами для изменения геометрии шасси.
3. Модуль стабилизации - обработка данных с инерциальных измерительных модулей (IMU) для поддержания равновесия.
4. Модуль диагностики - мониторинг токов потребления и температуры приводов.

Ключевым преимуществом модульной архитектуры является то, что каждая подсистема может функционировать относительно независимо. При отказе одного из модулей базовые функции движения и стабилизации сохраняются, что существенно повышает отказоустойчивость робота.

Гибридные архитектуры представляют собой синтез иерархического планирования и модульной реактивности [65]. Такая архитектура позволяет объединить сложные вычислительные алгоритмы верхнего уровня с мгновенным аппаратным откликом на нижнем исполнительном уровне.

В гибридной системе можно выделить два уровня:

- верхний уровень формирует стратегические цели и ограничения;
- нижний уровень модулей автономно выполняет последовательность действий по реконфигурации, контролируя токи моторов, синхронизацию штоков и показания датчиков в жестком реальном времени, не загружая центральный процессор рутинными операциями.

Проведенный анализ архитектурных решений показывает, что для реализации задач диссертационного исследования - автономного преодоления препятствий с динамической реконфигурацией - наиболее эффективной является гибридная архитектура.

Она позволяет реализовать двухуровневую схему управления, когда на верхнем уровне используется конечный автомат (FSM) [66], отвечающий за логику переключения режимов (поиск, сканирование, трансформация), а на нижнем уровне — локальные ПИД-регуляторы приводов [67], обеспечивающие мгновенную компенсацию возмущений и синхронизацию механизмов.

Именно такой подход выбран в качестве базового при проектировании системы управления разрабатываемого робота.

1.3 Формализация процесса реконфигурации и постановка задачи исследования

Анализ существующих мобильных платформ и архитектур управления выявил необходимость перехода к реконфигурируемым системам. Однако для постановки конкретных инженерных задач необходимо формализовать выявленные проблемы на языке теоретической механики и теории автоматического управления.

Целью данного раздела является математическое описание ограничений традиционных схем, определение условий устойчивости при реконфигурации и, на этой основе, формулирование конкретных научно-технических задач диссертационного исследования.

Обобщая результаты анализа, представленные в п. 1.1 и 1.2, можно выделить три группы фундаментальных ограничений, препятствующих эффективному применению традиционных (нереконфигурируемых) роботов в условиях ЧС.

1. Кинематические ограничения. Традиционные колесные и гусеничные платформы характеризуются неизменной геометрией опорного контура [51]. Пусть S — множество точек контакта движителя с поверхностью. Для жестких шасси это множество инвариантно относительно системы координат корпуса

$$S = const.$$

Это приводит к тому, что при движении по профилю, кривизна которого превышает радиус колеса или длину гусеницы, возникают зоны потери контакта (вывешивание). В эти моменты сила тяги F_{tr} падает до нуля, робот теряет управляемость, а конструкция шасси не может адаптироваться к локальным неровностям рельефа, таким как ступени или обломки плит.

2. Динамические ограничения. Устойчивость платформы определяется положением центра масс C относительно границ опорного многоугольника [68, 69]. В традиционных схемах вектор положения центра масс r_c фиксирован. При движении по наклонной поверхности с углом α возникает опрокидывающий момент $M_{overturn}$

$$M_{overturn} = m \cdot g \cdot h_c \cdot \sin(\alpha) - m \cdot g \cdot b \cdot \cos(\alpha),$$

где h_c — высота центра масс, b — половина базы робота. В системах с фиксированной геометрией параметры h_c и b неизменны. Следовательно, при достижении критического угла α_{crit} , когда $M_{overturn} > 0$, опрокидывание становится неизбежным, а отсутствие механизмов активного противодействия опрокидыванию ограничивает предельный угол преодолеваемого подъема.

3. Ограничения по управлению. Как было показано в п. 1.2.1, использование централизованных систем управления для многоприводных роботов приводит к возникновению временных задержек τ_{delay} в контуре обратной связи [70]. Условие

устойчивости цифровой системы управления требует, чтобы частота квантования f_s значительно превышала частоту среза системы ω_c

$$f_s \gg \frac{\omega_c}{2\pi}.$$

Однако при усложнении кинематики и росте числа сенсоров (лидары, камеры) вычислительная нагрузка увеличивает время цикла T_{cycle} , снижая эффективную частоту f_s [71]. Это приводит к фазовому запаздыванию и потере устойчивости в динамических режимах, что определяет необходимость децентрализации управления и внедрения гибридных архитектур.

Математическая формализация показывает, что преодоление указанных ограничений возможно только путем введения дополнительных степеней свободы, позволяющих управлять вектором r_c (положение центра масс) и геометрией множества S (опорный контур). Это подтверждает необходимость разработки реконфигурируемых систем [72-74].

Основным лимитирующим фактором для традиционных платформ является потеря устойчивости при изменении уклона опорной поверхности. Основная идея метода реконфигурации заключается в возможности динамического управления геометрией шасси для компенсации внешних возмущений.

Для формального описания этого процесса введем вектор обобщенных координат $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$, определяющий текущее состояние исполнительных механизмов (углы поворота рычагов, выдвижение штоков).

Пусть множество точек контакта движителя с поверхностью описывается векторами p_i , зависящими от конфигурации робота q

$$p_i = f_i(q), \quad i = 1, \dots, m,$$

где m — количество точек контакта.

Опорный многоугольник $P(q)$ определяется как выпуклая оболочка (Convex Hull) множества контактных точек

$$P(q) = Conv\{p_1(q)\}_{i=1}^m.$$

В отличие от традиционных систем, где $P = const$, в реконфигурируемых роботах функция $P(q)$ является управляемой переменной.

Пусть $p_{proj}(q)$ — вектор проекции центра масс робота на опорную плоскость. Необходимым и достаточным условием статической устойчивости является принадлежность этой проекции области опорного многоугольника

$$p_{proj}(q) \in P(q).$$

Для оценки надежности положения робота вводится понятие запаса статической устойчивости S . Он определяется как минимальное евклидово расстояние от проекции центра масс до границы ∂P опорного многоугольника

$$S(q) = \min_{e \in \partial P(q)} \|p_{proj}(q) - e\|.$$

Физический смысл величины S заключается в том, что при $S > 0$ робот устойчив, а при $S \leq 0$ происходит опрокидывание.

Математическая модель наглядно демонстрирует преимущество реконфигурируемых систем. Так в традиционных системах при наклоне поверхности проекция центра масс p_{proj} смещается к границе фиксированного многоугольника P . Как только возмущение превышает критический порог, S становится отрицательным, и происходит авария. В реконфигурируемых системах система управления отслеживает величину $S(q)$. При приближении к критическому значению ($S \rightarrow 0$) генерируется управляющее воздействие Δq , которое изменяет форму $P(q)$ (выдвигает опоры) или смещает центр масс $p_{proj}(q)$ (наклоняет корпус вперед).

Таким образом, задача обеспечения проходимости сводится к оптимизационной задаче поддержания положительного запаса устойчивости $S(q) > 0$ путем варьирования вектора обобщенных координат q [55, 75]. Это подтверждает необходимость разработки механизмов с изменяемой геометрией. Реализация процесса реконфигурации переводит мобильную платформу в класс систем с переменной кинематической структурой. Это означает, что в процессе движения изменяется не только конфигурация звеньев, но и характер накладываемых на систему связей.

Пусть $q \in \mathbb{R}^n$ — вектор обобщенных координат, описывающий положение всех подвижных звеньев робота. Взаимодействие движителей с опорной

поверхностью накладывает на систему кинематические связи, которые в общем виде (для неголономных систем) описываются уравнением Пфаффа

$$A(q)\dot{q} = 0,$$

где $A(q) \in \mathbb{R}^{m \cdot n}$ — матрица ограничений.

Важной особенностью исследуемой системы является то, что матрица $A(q)$ не является постоянной. При переходе из колесного режима в режим преодоления препятствий ранг и структура матрицы $A(q, t)$ изменяются скачкообразно. Это порождает переходные процессы, требующие специальной стабилизации.

Динамика движения мобильной платформы с реконфигурируемыми опорами описывается уравнением Лагранжа второго рода [76], которое в матричной форме имеет вид

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = B(q)\tau + \omega_{ext},$$

где $M(q)$ — симметричная положительно определенная матрица инерции системы; $C(q, \dot{q})$ — матрица, описывающая кориолисовы и центробежные силы; $G(q)$ — вектор гравитационных сил (существенно зависит от положения центра масс при реконфигурации); $B(q)$ — матрица распределения управляющих воздействий; τ — вектор управляющих моментов/сил приводов; ω_{ext} — вектор внешних возмущений (силы сухого трения, реакции опоры).

Сложность управления реконфигурируемым роботом заключается в том, что процесс трансформации приводит к параметрическим возмущениям модели

$$M \rightarrow M(q(t)), \quad G \rightarrow G(q(t)).$$

Например, выдвижение телескопических опор существенно меняет моменты инерции $M(q)$ и плечо действия силы тяжести $G(q)$.

Классические линейные регуляторы (PID с постоянными коэффициентами) не способны эффективно компенсировать такие значительные динамические изменения параметров, особенно с учетом наличия вектора нелинейного трения ω_{ext} в механизмах трансформации. Это обосновывает необходимость применения адаптивных методов управления или методов робастного управления с высоким коэффициентом усиления, способных сохранять устойчивость при наличии параметрических неопределенностей.

Ключевым требованием к автономным мобильным роботам, действующим в зонах ЧС, является максимизация времени непрерывной работы. Поскольку процесс реконфигурации шасси связан с перемещением массивных узлов и преодолением значительных сил гравитации и трения, он является наиболее энергозатратным режимом работы системы.

Следовательно, задача управления реконфигурацией сводится не только к обеспечению кинематической точности, но и к минимизации энергетических потерь. Энергетическую эффективность процесса трансформации за интервал времени $t \in [t_0, t_f]$ можно оценить с помощью интегрального функционала качества J

$$J = \int_{t_0}^{t_f} P_{\Sigma}(q, \dot{q}, \tau) dt \rightarrow \min,$$

где P_{Σ} — мгновенная суммарная мощность, потребляемая приводами робота.

Мгновенная мощность складывается из двух компонент

$$P_{\Sigma} = P_{mech} + P_{heat}.$$

Механическая мощность (P_{mech}) — это работа, затрачиваемая на перемещение звеньев против сил гравитации и инерции

$$P_{mech} = |\tau^T \dot{q}|$$

Тепловые потери (P_{heat}) — это потери в обмотках электродвигателей, которые пропорциональны квадрату тока (или квадрату развиваемого момента τ)

$$P_{heat} \approx \sum_{i=1}^n R_i \left(\frac{\tau_i}{k_{t,i}} \right)^2,$$

где R_i — активное сопротивление обмотки, $k_{t,i}$ — константа момента двигателя.

Особую важность для реконфигурируемых роботов представляет режим удержания конфигурации, когда робот фиксирует шасси в заданном положении (например, приподняв корпус над препятствием), при этом скорость $\dot{q} = 0$, и механическая работа не выполняется ($P_{mech} = 0$).

Однако, если механизм не обладает свойством самоторможения, для компенсации гравитационных сил $G(q)$ приводы должны постоянно создавать удерживающий момент

$$\tau_{hold} = G(q).$$

В этом случае функционал энергопотребления принимает вид

$$E_{stat} = \int_{\tau_{hold}} P_{heat}(\tau_{hold}) dt = \int_{\tau_{hold}} \Sigma R_i \left(\frac{G(q)}{k_{t,i}} \right)^2 dt.$$

Анализ уравнения для E_{stat} показывает, что в традиционных механизмах длительное удержание конфигурации приводит к значительному расходу энергии аккумулятора на нагрев обмоток.

Для минимизации функционала J необходимо найти такую траекторию движения $q(t)$ и такую конечную конфигурацию q_{final} , при которых минимизируются динамические пики момента $|\tau(t)|$ (плавность хода) и обеспечивается условие $\tau_{hold} \rightarrow 0$ в конечном положении. Математическое условие $\tau_{hold} \rightarrow 0$ при $G(q) \neq 0$ выполнимо только в двух случаях: использование волновых редукторов с высоким передаточным числом (что снижает КПД и динамику) или использование кинематических особенностей механизма (сингулярностей) [75, 77, 78]. Это теоретическое положение обосновывает необходимость введения в конструкцию робота системы механической блокировки [79, 80], позволяющей обнулить нагрузку на двигатели в статических режимах, что будет рассмотрено в следующем пункте. Анализ критерия оптимальности показал, что для минимизации энергопотребления в статических режимах необходимо обеспечить условие $\tau_{hold} \rightarrow 0$ при наличии внешней нагрузки $G(q) \neq 0$.

В традиционной робототехнике эта задача решается применением тормозных муфт или самотормозящихся передач (червячных, винтовых). Однако эти решения имеют существенные недостатки: низкий КПД ($\eta < 0,5$) и невозможность демпфирования ударных нагрузок. При жестких ударах (например, при прыгивании с препятствия) энергия удара передается непосредственно на зубья редуктора, что ведет к их разрушению.

Альтернативным и более эффективным подходом является использование кинематических особенностей механизма, а именно сингулярных конфигураций («мертвых точек») [79, 80]. Связь между вектором обобщенных моментов приводов

τ и вектором внешних сил F_{ext} , действующих на рабочий орган, описывается через транспонированную матрицу Якоби $J^T(q)$

$$\tau = J^T(q) \cdot F_{ext}.$$

В общем случае, для удержания внешней силы F_{ext} (веса робота) приводы должны развивать момент τ . Однако, если механизм находится в сингулярной конфигурации, определенной условием вырождения якобиана

$$\det(J(q)) = 0,$$

т.е. существует такое направление вектора внешней силы F_{ext} , которое полностью воспринимается структурой механизма, не создавая момента на валах приводов ($\tau = 0$).

В контексте реконфигурируемого шасси это означает возможность перевода рычажной системы в такое положение, где векторы сил реакции опоры проходят через оси вращения шарниров или параллельны жестким звеньям. В этом состоянии кинематическая цепь трансформируется в статически неопределимую ферму [55, 75]. Нагрузка распределяется по пути

Грунт → Рычаг → Механический упор → Рама робота

При этом электропривод исключается из силового контура. Это позволяет:

- снизить энергопотребление: ток двигателя необходим только для компенсации микровибраций, а не удержания веса ($I_{hold} \approx 0$);
- повысить живучесть: ударные нагрузки воспринимаются стальными элементами рамы, а не хрупким редуктором привода.

Таким образом, проектирование механизма реконфигурации должно базироваться на принципе целенаправленного введения сингулярных конфигураций в рабочую область. Это требование является ключевым граничным условием для параметрической оптимизации, которая будет проведена в главе 2.

Выводы по главе

1. Проведенный анализ состояния проблемы показал, что существующие мобильные роботы (колесные, гусеничные) не обладают универсальностью, необходимой для спасательных операций. Решением является создание

реконфигурируемых платформ, однако их широкое применение сдерживается недостаточной надежностью механических узлов и сложностью системы управления.

2. Обоснована гибридная архитектура системы управления, сочетающая иерархическое планирование (FSM) с реактивным поведением модулей нижнего уровня, что позволяет минимизировать задержки при стабилизации неустойчивых режимов трансформации.

3. Математически сформулирована задача реконфигурации как процесс динамического управления опорным многоугольником $P(q)$ для обеспечения условия устойчивости $C \in P(q)$.

4. На основе анализа энергетического функционала доказана необходимость использования механизма с геометрической блокировкой (сингулярностями). Это позволяет перевести систему в режим «статической фермы», снижая нагрузку на приводы и энергопотребление, что определяет задачи проектирования во второй главе.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМА РЕКОНФИГУРАЦИИ РОБОТА

В главе представлено комплексное решение задачи проектирования электромеханической системы реконфигурации шасси: от разработки математической модели кинематики с выявлением сингулярных конфигураций и многокритериальной параметрической оптимизации до конструктивной реализации прототипа с комбинированным применением материалов. Внедрение системы механической блокировки с направляющим коромыслом обеспечивает трансформацию подвижного механизма в жесткую статическую ферму, что создаёт основу для реализации энергоэффективных алгоритмов управления.

2.1 Разработка математической модели кинематики и квазистатики механизма реконфигурации

Разработка эффективной системы управления реконфигурацией невозможна без построения адекватной математической модели, связывающей управляющие воздействия (перемещение штока приводного механизма) с выходными координатами механизма (положением шасси) и возникающими в звеньях усилиями [81, 82]. Механизм реконфигурации исследуемого мобильного робота представляет собой сложную рычажную систему с одной степенью подвижности ($W = 1$), приводимую в движение линейным электрическим приводом. Кинематическая схема устройства спроектирована таким образом, чтобы обеспечивать бистабильное состояние шасси (гусеничный/колесный ход) при минимизации массогабаритных показателей и энергопотребления.

В данном разделе решаются задачи кинематического анализа (прямая и обратная задачи кинематики), анализа скоростей (построение якобиана) и квазистатического силового расчета, что является базисом для последующей параметрической оптимизации.

Основой системы реконфигурации является плоский рычажный механизм, интегрированный в боковые модули мобильной платформы [75, 77]. Компонентная схема механизма реконфигурации представлена на рисунке 2.1.

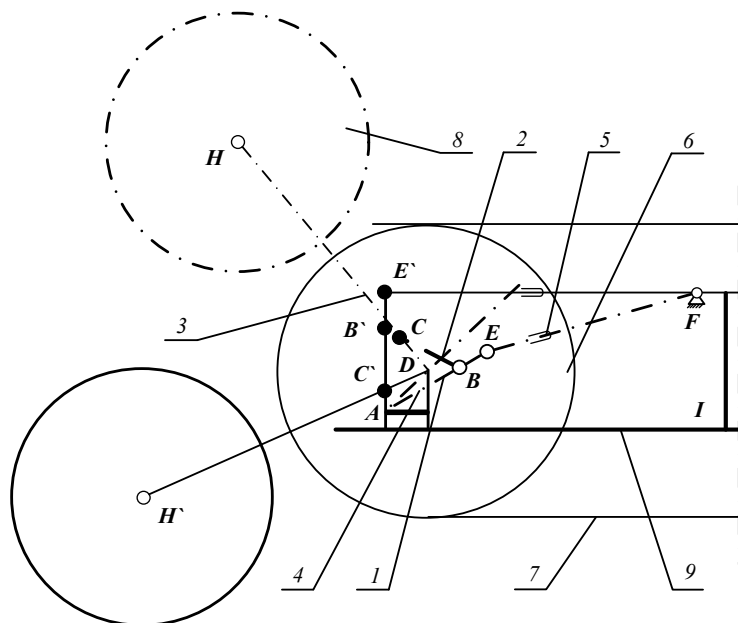


Рисунок 2.1 – Компонентная схема механизма реконфигурации:
 1 – поворотный рычаг, 2 – шатун, 3 – колесный рычаг, 4 – основание, 5 – электрический цилиндр, 6 – колесо гусеничной группы, 7 – гусеница, 8 – колесо колесной группы, 9 – платформа робота

Поворотный рычаг (звено AB) – ведущее звено вращательного типа, кинематически связанное со штоком привода. Служит для преобразования линейного перемещения во вращательный момент. Шатун (звено BC) – промежуточное звено, осуществляющее передачу усилия от поворотного рычага к исполнительному элементу. Совершает плоскопараллельное движение. Колесный рычаг (звено CD) – выходное (ведомое) звено, на свободном конце которого смонтирована колесная опора. Угол поворота данного звена φ_3 определяет клиренс робота и режим движения. Линейный привод (звено AE) – активное звено переменной длины $L(t)$, изменяющее геометрию замкнутого контура $ABCE$.

В исходном (транспортном) положении шток привода втянут, колесный рычаг поднят, и робот опирается на гусеничный движитель. При подаче управляющего сигнала происходит выдвигание штока (увеличение длины вектора L_{AE}). Это вызывает поворот системы рычагов, в результате чего колесная опора (поз. 8) опускается ниже плоскости гусениц, поднимая шасси над опорной поверхностью и переводя робота в колесный режим. Ключевой особенностью схемы

является наличие сингулярных конфигураций в крайних точках траектории, что будет подробно рассмотрено в работе.

Для аналитического описания движения механизма и решения прямой задачи кинематики (ПЗК) введем неподвижную декартову систему координат xAy , начало которой совпадает с центром шарнира A (рисунок 2.2) [80]. Ось Ax направим горизонтально вдоль основания платформы, а ось Ay — вертикально вверх.

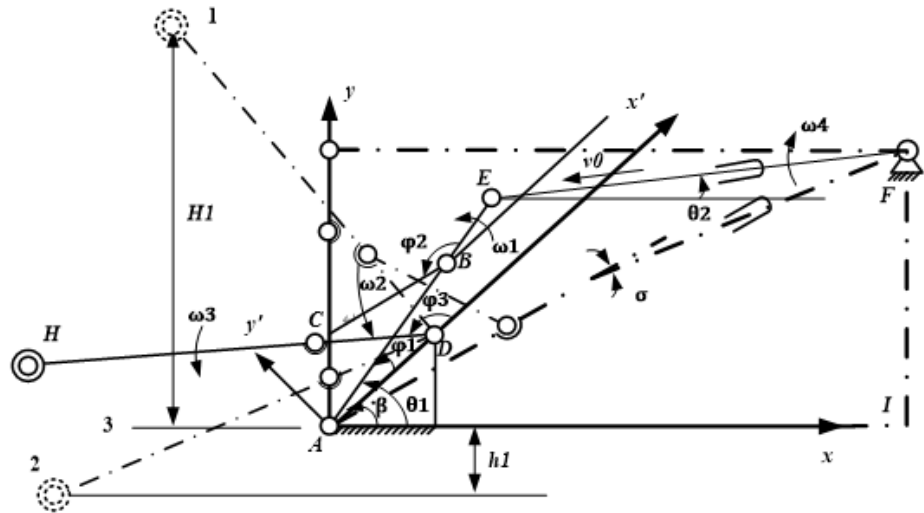


Рисунок 2.2 – Расчетная кинематическая модель механизма:

$L(t)$ – переменная длина привода (звено AE), 1 – верхнее положение колеса, 2 – нижнее положение колеса, 3 – уровень платформы

Обозначим длины жестких звеньев как константы $l_{AB}, l_{BC}, l_{CD}, l_{AD}$. Переменная длина штока привода обозначена как функция времени $L(t)$.

Рассмотрим векторный контур механизма $ABCD$. Условие замкнутости векторной цепи записывается в виде векторного уравнения

$$l_{AB} + l_{BC} = l_{AD} + l_{DC}. \quad (2.1)$$

Проецируя векторное уравнение на оси координат x и y , получаем систему нелинейных уравнений, связывающих обобщенные угловые координаты звеньев $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$

$$\begin{cases} l_{AB} \cos \varphi_1 + l_{BC} \cos \varphi_2 = l_{AD} + l_{DC} \cos \varphi_3 \\ l_{AB} \sin \varphi_1 + l_{BC} \sin \varphi_2 = l_{DC} \sin \varphi_3 \end{cases}. \quad (2.2)$$

Для целей управления необходимо выразить выходной угол колесного рычага φ_3 (угол атаки шасси) как явную функцию от управляемой длины штока L . Поскольку звено AB жестко связано с рычагом привода, угол поворота ведущего

звена $\theta = \varphi_1$ однозначно определяется длиной L из треугольника $\triangle ABE$ по теореме косинусов

$$\theta(L) = \arccos\left(\frac{l_{AB}^2 + l_{AE_{fix}}^2 - L^2}{2l_{AB}l_{AE_{fix}}}\right) + \theta_{offset}.$$

Исключая из системы (2.2) промежуточный угол шатуна φ_2 , задачу можно свести к решению тригонометрического уравнения вида $a \sin \varphi_3 + b \cos \varphi_3 = c$. Решение относительно целевого угла φ_3 имеет вид

$$\varphi_3(L) = 2 \arctan\left(\frac{b \pm \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}}{a - c}\right), \quad (2.3)$$

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

$$\begin{cases} a = 2l_{CD}(l_{AD} - l_{AB}\cos\theta) \\ b = -2l_{CD}l_{AB}\sin\theta \\ c = l_{AD}^2 + l_{AB}^2 + l_{CD}^2 - l_{BC}^2 - 2l_{AB}l_{AD}\cos\theta \end{cases}, \quad (2.4)$$

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

Полученная аналитическая зависимость (2.3) представляет собой передаточную функцию положения. Она является математической основой для алгоритма управления, позволяя микроконтроллеру в реальном времени пересчитывать требуемую высоту подъема шасси в необходимую длину выдвижения 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 $\omega_3 = \dot{\varphi}_3$. Дифференцируя уравнение замкнутости векторного контура (2.1) по времени, получаем соотношение скоростей, которое может быть выражено через матрицу Якоби (Якобиан) механизма $J(q)$ [83, 84]. Для рассматриваемой системы с одной степенью свободы связь скоростей описывается скалярной передаточной функцией (аналог передаточного отношения редуктора)

$$\omega_3 = J_{kin}(q) \cdot V_{act}$$

где $J_{kin}(q)$ — скоростная передаточная функция (скоростной якобиан), $q = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, L]$ — вектор обобщенных координат системы.

Аналитическое выражение для передаточной функции $J_{kin}(q)$, полученное путем дифференцирования системы уравнений (2.2), имеет вид

$$J_{kin}(q) = \frac{l_{AE} \sin(\theta - \varphi_2) \cdot l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{l_{CD} \cdot l_{BC} \cdot \sin(\varphi_3 - \varphi_2)}. \quad (2.5)$$

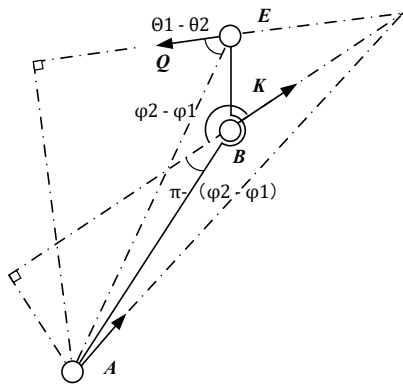
Анализ выражения для скоростной передаточной функции $J_{kin}(q)$ позволяет выявить ключевые кинематические особенности механизма:

1. Нелинейность передачи. Механизм обладает существенно нелинейным передаточным отношением. При постоянной скорости выдвигания штока ($V_{act} = const$) угловая скорость подъема шасси ω_3 изменяется по сложной траектории.

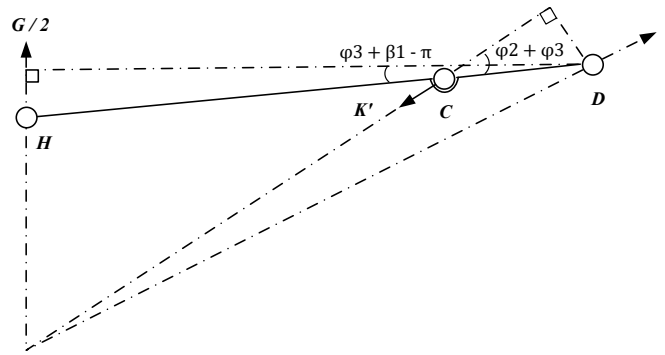
2. Кинематическое демпфирование в рабочей точке. Вблизи крайнего верхнего положения ($\varphi_3 \rightarrow 150^\circ$, режим блокировки), конфигурация рычагов стремится к особому положению. Анализ знаменателя выражения для $J_{kin}(q)$ и геометрии показывает, что значение скоростной передаточной функции уменьшается.

3. Эксплуатационный эффект. Данное кинематическое свойство обеспечивает естественный плавный подход к точке фиксации. Снижение конечной скорости минимизирует инерционный удар при контакте рычагов с упорами, что снижает требования к быстродействию контура управления и продлевает ресурс механической передачи.

Ключевой особенностью разрабатываемого механизма, отличающей его от существующих аналогов, является способность удерживать вес работа в поднятом (колесном) положении без постоянного потребления энергии приводом. Данный режим эксплуатации определяется как режим механической блокировки [85, 86]. Для теоретического обоснования этого свойства и расчета требуемых усилий был проведен силовой анализ. Расчетная схема механизма представлена на рисунке 2.3. Геометрия рычагов соответствует схеме на рисунке 2.2.



а) шатун



б) колесный рычаг

Рисунок 2.3 – Расчетная схема сил механизма реконфигурации: K – сила тяги электрического цилиндра, K' – составляющая силы тяжести колеса

Для составления уравнения равновесия введем следующие обозначения переменных:

G — вес робота, приходящийся на один модуль (внешняя нагрузка);

Q — требуемое осевое усилие на штоке линейного привода для удержания нагрузки.

Воспользуемся принципом возможных перемещений. Условие статического равновесия механизма под действием внешней нагрузки G определяется уравнением работ

$$\delta A = Q \cdot \delta L - G \cdot \delta h = 0.$$

Выражая виртуальные перемещения через геометрические параметры звеньев, получаем аналитическую зависимость требуемого усилия Q от угла поворота φ_3

$$Q(\varphi_3) = \frac{G}{2} \cdot \frac{l_{CD} \cos \varphi_3 + \beta \cdot l_{AB} \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}{l_{CD} \sin(\varphi_2 + \varphi_3) \cdot l_{AE} \sin(\theta_1 - \theta_2)}, \quad (2.6)$$

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

Анализ уравнения (2.6) показывает, что при полном выдвижении штока $L = L_{max} = 50$ мм) механизм переходит в особое кинематическое состояние, называемое сингулярной конфигурацией [83, 84]. В этом положении шатун и поворотный рычаг выстраиваются в одну линию или занимают положение, близкое к вертикали. Геометрический анализ показывает, что вектор силы реакции от веса робота проходит через центры шарниров на неподвижное основание (раму), создавая нулевое или отрицательное плечо относительно оси вращения привода.

Это позволяет сформулировать важное эксплуатационное свойство - свойство геометрической блокировки, когда в конечном рабочем положении механизм образует жесткую статически неопределимую ферму, замкнутую на механические упоры. В этой конфигурации внешняя нагрузка G полностью компенсируется силами реакции опор конструкции, а проекция нагрузки на ось привода стремится к нулю или меняет знак, обеспечивая эффект самоторможения. Следовательно, в режиме колесного хода нагрузка воспринимается жесткостью конструкции (стальной рамой и механическими упорами), а не электромагнитным полем двигателя. Это выражается в том, что при $L \rightarrow L_{max}$ требуемое усилие удержания $Q_{hold} \ll G$. Более того, наличие механических упоров (см. конструкцию в п. 2.3) позволяет вектору нагрузки создавать прижимающий момент, который дополнительно фиксирует механизм, что теоретически обосновывает возможность отключения ШИМ-сигнала (или его снижения до минимального уровня удержания контакта) в фазе эксплуатации, что подтверждается экспериментальными данными в главе 3 (для минимизации энергетических затрат в статическом режиме фиксации использован метод анализа сингулярных конфигураций [83, 84], что позволило снизить ток потребления в 6 раз.

Для выбора двигателя максимальное усилие Q_{max} рассчитывается как пиковое значение функции (2.6) на переходном этапе движения

$$Q_{max} = \max_{t \in [t_0, t_f]} |Q(t)|. \quad (2.7)$$

Таким образом, разработанная математическая модель (уравнения 2.3–2.7) является основой для параметрической оптимизации механизма, проводимой в следующем разделе.

2.2 Многокритериальная оптимизация параметров механизма

Основываясь на аналитических зависимостях кинематики и квазистатики, полученных в разделе 2.1, необходимо определить геометрические параметры звеньев, которые обеспечат выполнение функциональных требований (подъем шасси) при минимизации энергопотребления и габаритов. Поскольку к

проектируемому механизму предъявляются противоречивые требования (например, увеличение длины рычага снижает усилие, но ухудшает компактность), задача формулируется как задача многокритериальной нелинейной оптимизации [77].

Таким образом, задача сводится к поиску вектора варьируемых параметров X , доставляющего минимум глобальной целевой функции $F(X)$ в допустимой области решений Ω

$$X_{opt} = \arg \min_{X \in \Omega} F(X).$$

В качестве независимых переменных, определяющих геометрию механизма, выбран вектор X , включающий длины звеньев и координаты точек крепления (см. кинематическую схему на рисунке 2.2)

$$X = [l_{AB}, l_{BC}, l_{CD}, l_{AD}, x_A, y_A]^T,$$

где $l_{AB}, l_{BC}, l_{CD}, l_{AD}$ — длины соответствующих звеньев, x_A, y_A — координаты шарнира основания.

Для сведения многокритериальной задачи к однокритериальной применен метод линейной аддитивной свертки. Глобальная целевая функция $F(X)$ представляет собой взвешенную сумму нормированных частных критериев

$$F(X) = \sum_{i=1}^3 \mu_i \cdot \hat{f}_i(X) = \mu_1 \cdot \frac{f_{force}(X)}{F_{norm}} + \mu_2 \cdot \frac{f_{kin}(X)}{K_{norm}} + \mu_3 \cdot \frac{f_{dim}(X)}{D_{norm}}, \quad (2.8)$$

где μ_i — весовые коэффициенты значимости ($\sum \mu_i = 1$), а знаменатели представляют собой нормирующие множители для приведения критериев к безразмерному виду.

Частные критерии определены следующим образом:

- критерий силовых нагрузок (f_{force}) - минимизация пикового усилия на штоке привода для снижения требований к двигателю

$$f_{force}(X) = \max_t |Q(X, t)|;$$

- критерий кинематической линейности (f_{kin}) - обеспечение линейности передаточной функции "перемещение штока - угол подъема" для упрощения управления

$$f_{kin}(X) = \int_0^{t_f} \left| \frac{d\varphi_3}{dL} - C_{const} \right| dt;$$

- критерий компактности (f_{dim}) - минимизация суммарной металлоемкости и габаритов звеньев

$$f_{dim}(X) = l_{AB} + l_{BC} + l_{CD}.$$

Исходя из физических ограничений удельной мощности малогабаритных приводов и приоритета надежности удержания нагрузки, весовые коэффициенты распределены с доминированием силового фактора $\mu_1 = 0,6$, $\mu_2 = 0,2$, $\mu_3 = 0,2$. Такой выбор обусловлен тем, что превышение допустимого момента на валу двигателя является критическим условием, ведущим к отказу системы (заклиниванию), в то время как кинематические и габаритные параметры имеют характер мягких ограничений.

Таким образом, оптимизация проводится с учетом жестких конструктивных и кинематических ограничений, описываемых системой неравенств $g_j(X) \leq 0$:

1. Ограничение рабочего хода привода. Выбрано условие использования стандартного линейного привода

$$g_1(X): L_{max}(X) - L_{min}(X) \leq 50 \text{ мм.}$$

2. Условие работоспособности (целевой угол). Механизм должен обеспечивать подъем шасси на заданную высоту

$$g_2(X): \varphi_{3,max} \geq 150^\circ.$$

3. Кинематическое ограничение (отсутствие заклинивания). Скоростная передаточная функция не должна обращаться в нуль или бесконечность в рабочем диапазоне, за исключением точки блокировки

$$g_3(X): J_{kin}(q) \neq 0 \text{ и } |J_{kin}(q)| < \infty, \forall \varphi_3 \in [\varphi_{start}, \varphi_{end}].$$

Особым условием является обеспечение блокировки: в конечном положении ($L = 50$ мм) механизм должен входить в геометрическую конфигурацию, близкую к "мертвой точке", что математически выражается как минимизация плеча силы тяжести (2.6).

Область допустимых решений D определяется системой ограничений (2.9), которая включает в себя геометрические условия существования механизма (условия сборки), конструктивные ограничения на размеры звеньев и кинематические ограничения на углы передачи (для исключения заклинивания)

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{min} \leq l_i \leq L_{max}, i = 1 \dots n \\ \mu_{min} \leq \mu(q) \leq \mu_{max} \\ J_{kin}(q) \neq 0 \text{ и } |J_{kin}(q)| < \infty, \forall q \in \Omega_{work} \end{array} \right., \quad (2.9)$$

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 задачи нелинейного программирования (2.8)–(2.9) выполнялось в вычислительной среде MATLAB с использованием алгоритма последовательного квадратичного программирования (*SQP*, метод *fmincon*). В качестве начального приближения X_0 выбраны геометрические параметры прототипа-аналога. Критерием остановки итерационного процесса служило уменьшение нормы градиента целевой функции ниже $\epsilon = 10^{-6}$. В результате расчета получен вектор теоретически оптимальных параметров X_{opt} , обеспечивающий глобальный минимум целевой функции $F(X)$. Однако полученные значения имели дробную размерность (таблица 2.1), что технологически нецелесообразно для изготовления деталей и подбора стандартных узлов.

Для обеспечения технологичности конструкции проведена процедура параметрической стандартизации. Она заключалась в приведении расчетных размеров к ближайшим значениям из рядов нормальных линейных размеров (ГОСТ 6636-69, ряды Ra20/Ra40) и согласовании хода привода со стандартными типоразмерами линейных приводов.

Ключевым этапом является выбор линейного привода. Расчетное требуемое перемещение составило $\Delta L \approx 49,8$ мм. Это позволило выбрать стандартный привод с номинальным ходом 50 мм.

Сравнительный анализ теоретических и принятых конструктивных параметров приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты параметрической оптимизации и стандартизации

Параметр	Обозначение	Теоретический оптимум (мм)	Конструктивное значение (мм)	Обоснование выбора / Стандарт
Длина поворотного рычага	l_{AB}	78.43	80	Округление к ряду Ra20
Длина шатуна	l_{BC}	51.12	50	Унификация межосевых расстояний
Длина колесного рычага	l_{DC}	114.80	115	Конструктивное округление
База (расстояние опор)	l_{AD}	130.00	130	Фиксировано геометрией рамы
Монтажная длина привода	l_{AE}	54.50	55	Условия компоновки шарниров
Рабочий ход штока	ΔL	49.80	50	Стандартный типоряд

Так как принятые конструктивные значения X_{const} отличаются от теоретического оптимума X_{opt} , проведена проверка выполнения системы ограничений (2.9) для стандартизированного набора параметров.

Анализ чувствительности показал, что значение $F(X_{const})$ отличается от минимума $F(X_{opt})$ не более чем на 2.8%, что является допустимым для инженерных систем данного класса. При ходе штока 50 мм и длинах рычагов (80/50/115) обеспечивается изменение угла $\Delta\varphi_3 \approx 70^\circ$ (диапазон $80^\circ \dots 150^\circ$), что полностью удовлетворяет условию подъема шасси ($g_2(X)$). Геометрическая конфигурация при $L = 50$ мм обеспечивает вхождение механизма в зону сингулярности, где вектор силы реакции замыкается на упоры (реализация ограничения $g_4(X)$).

Таким образом, в результате оптимизации и последующей стандартизации определен финальный набор геометрических параметров механизма (столбец 4 таблицы 2.1). Доказано, что использование стандартного привода с ходом 50 мм в сочетании с выбранными длинами рычагов позволяет реализовать требуемую

траекторию движения и обеспечить режим механической блокировки без существенного ухудшения силовых характеристик.

2.3 Конструктивная схема и динамический анализ механизма

После определения оптимальных геометрических параметров, необходимо перейти к конструктивному синтезу и верификации динамических характеристик системы. В данном разделе обосновывается выбор материалов, описывается принцип работы механизма механической блокировки и приводятся результаты имитационного моделирования, подтверждающие работоспособность привода.

Разработка конструктивно-компоновочной схемы робота базируется на результатах кинематического синтеза и требованиях минимизации энергопотребления. В основу архитектуры положен модульный принцип с четким функциональным зонированием, что обеспечивает ремонтпригодность и масштабируемость системы [87].

Общий вид разработанного блока реконфигурации и его интеграция в мобильную платформу представлены на рисунке 2.4.

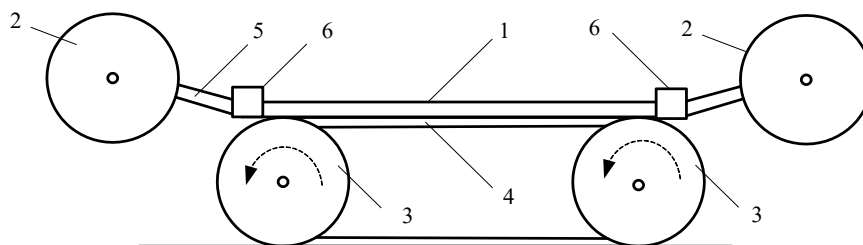


Рисунок 2.4 – Компоновочная схема экспериментального прототипа (Общий вид): 1 – несущая платформа; 2 – колесо колесной группы (переднее/заднее); 3 – колесо гусеничной группы (бортовое); 4 – гусеничная лента; 5 – система рычагов трансформации; 6 – рычажный электромеханический привод

Робот оснащен гибридной ходовой частью, включающей:

- гусеничный контур (поз. 3, 4): смонтирован жестко по бокам платформы (1).

Предназначен для движения в сложных дорожных условиях;

- колесный контур (поз. 2): установлен на подвижных рычагах (5) спереди и сзади платформы, между гусеничными блоками. Привод (6), размещенный на платформе, обеспечивает вертикальное перемещение колес, изменяя клиренс и тип движителя.

Для обеспечения баланса между жесткостью и массой использована биметаллическая схема. Платформа (1) и рычажная система (5) выполнены из конструкционной нержавеющей стали ($E \approx 200$ ГПа). Это критически важно для работы системы упоров, так как стальные элементы не подвержены упругим изгибам, что гарантирует надежное замыкание кинематической цепи. Кроме того, высокая плотность стали позволяет сместить центр масс вниз, повышая устойчивость робота. Корпуса электрических цилиндров (10) изготовлены из алюминиевого сплава. Это обеспечивает эффективный теплоотвод ($\lambda \approx 200$ Вт/(м · К)) при работе двигателя под нагрузкой и снижает инерционность подвижных частей.

Для верификации выбранного привода (ход 50 мм) проведено имитационное моделирование динамики с учетом инерционности и трения [88]. Результаты реакции системы на управляющий сигнал представлены на рисунке 2.5.

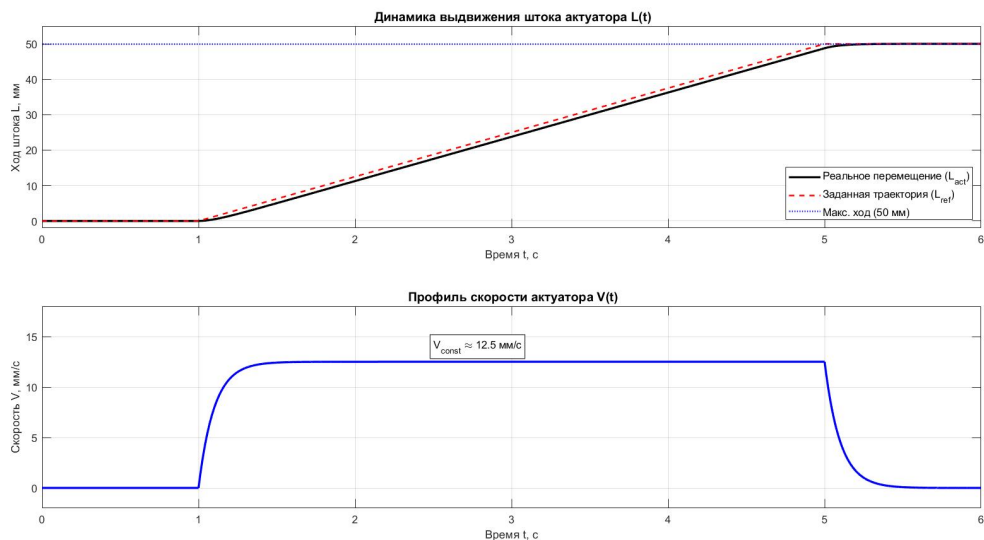


Рисунок 2.5 – Динамические характеристики линейного привода:
 а) сопоставление заданной (L_{ref} , красная пунктирная линия) и реальной (L_{act} , черная сплошная линия) траекторий перемещения штока; б) профиль линейной скорости $V(t)$ с выходом на номинальный режим

Из рисунка видно, что на верхнем графике (а) наблюдается незначительное отставание реальной траектории (черная линия) от эталонной (красная линия) в интервале $t \in [1,0; 1,2]$ с. Это физически обусловлено инерцией ротора и преодолением момента трения покоя. На нижнем графике (рисунок 2.5, б) видно, что на маршевом участке ($t \in [1,2; 4,8]$ с) скорость стабилизируется на уровне $V_{const} \approx 12,5$ мм/с. Работа в установившемся режиме без ускорений минимизирует

индуктивные потери в двигателе. В момент времени $t = 5,0$ с шток плавно, без перерегулирования, достигает механического ограничителя (50 мм), что подтверждает корректность настройки профиля движения.

Для реализации энергоэффективного режима удержания разработана оригинальная схема с интегрированной системой упоров. Кинематическая схема механизма в фазах трансформации показана на рисунке 2.6.

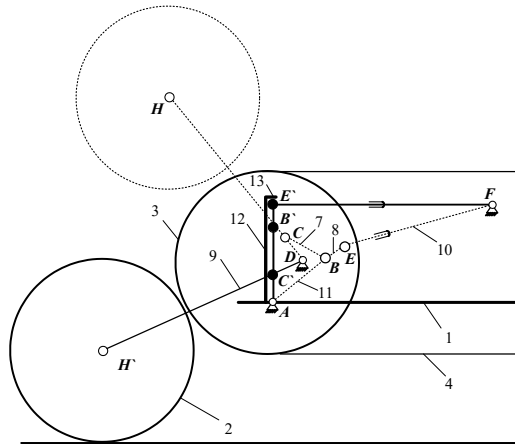


Рисунок 2.6 – Кинематическая схема рычажного привода с системой упоров: 1 — платформа; 2 — колесо; 7 — поворотный рычаг (AB); 8 — шатун (BC); 9 — колесный рычаг; 10 — привод; 11 — направляющее коромысло; 12, 13 — механические упоры

Функционирование механизма базируется на принципе замыкания кинематической цепи в «мертвой точке» [77, 80]:

1) Сингулярная конфигурация. В конечном положении звенья AB' и $B'C'$ выстраиваются в одну линию, параллельную вертикальному упору (12).

2) Перераспределение сил. Внешняя нагрузка от веса робота создает силу реакции, вектор которой проходит через центры шарниров. Плечо силы относительно оси вращения привода стремится к нулю.

3) Результат. Механизм превращается в жесткую ферму. Нагрузка воспринимается стальной рамой и упорами (12, 13), а не магнитным полем двигателя. Это позволяет снизить напряжение удержания до минимального уровня (доказано в главах 3 и 4), обеспечивая существенную экономию энергии.

Выводы по главе

В данной главе рассмотрена задача проектирования и параметрического синтеза электромеханической системы реконфигурации. На основе теоретического

анализа и имитационного моделирования получены следующие основные результаты:

1. Разработана математическая модель кинематики и квазистатики, получены аналитические зависимости (уравнения 2.3–2.6), связывающие входную координату (ход штока) с геометрией шасси и усилиями в звеньях. Впервые формализовано условие «геометрической блокировки» как сингулярной конфигурации механизма, при которой внешняя нагрузка замыкается на жесткие упоры, минуя привод.

2. Проведена многокритериальная оптимизация параметров, на основе аддитивной свертки критериев определен оптимальный вектор геометрических размеров звеньев ($l_{AB} = 80$ мм, $l_{BC} = 50$ мм, $l_{CD} = 115$ мм). Обоснован выбор стандартного линейного привода с ходом 50 мм, обеспечивающего требуемый угол подъема шасси ($> 70^\circ$) при минимизации пиковых усилий.

3. Верифицированы динамические характеристики, выполненное имитационное моделирование в среде MATLAB показало, что выбранный привод обеспечивает время полной трансформации $T = 4,0$ с при номинальной скорости $V = 12,5$ мм/с. Выявленное динамическое запаздывание ($t_{lag} \approx 0,2$ с) носит прогнозируемый характер и не препятствует точному позиционированию.

4. Реализована конструктивная схема с механической блокировкой. Разработана оригинальная рычажная конструкция с направляющим коромыслом. Обосновано применение гибридной материаловедческой схемы: использование аустенитной стали для силового контура (обеспечение жесткости в режиме блокировки) и алюминиевых сплавов для подвижных частей (снижение инерции).

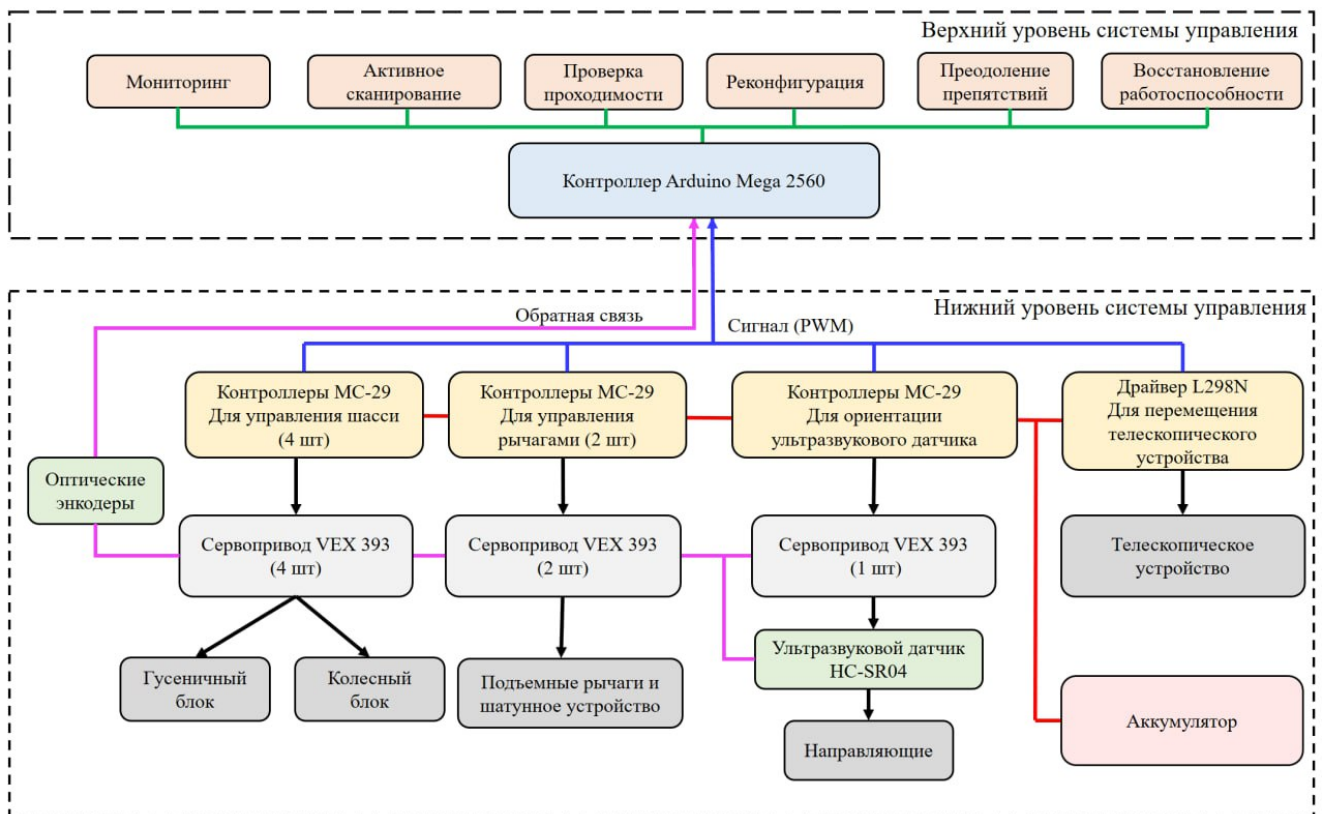
5. Создан физический базис для энергоэффективного управления: теоретически доказано, что переход механизма в сингулярную точку снижает требование к удерживающему моменту практически до нуля. Это открывает возможность применения стратегии управления с насыщением (High Gain / Saturation Strategy), разработка и исследование которой являются предметом следующей главы 3.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОМ РЕКОНФИГУРАЦИИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В главе представлена разработка архитектуры системы управления механизмом реконфигурации на основе оптимальных геометрических параметров, полученных в предыдущей главе (таблица 2.1), проводится синтез алгоритмов активного сканирования и выполняется верификация динамических характеристик приводов с учетом нелинейностей.

3.1 Архитектура системы управления и аппаратная реализация

Для реализации алгоритмов управления разработана архитектура системы управления механизмом реконфигурации, которая представлена на рисунке 3.1.



Архитектура системы управления построена по иерархическому принципу и реализует двухуровневую схему управления роботом:

1. На верхнем уровне используется конечный автомат, определяющий логику переключения между режимами поиска препятствия, активного сканирования, реконфигурации и преодоления препятствий. Центральным элементом является микроконтроллер Arduino Mega 2560, который выполняет сбор измерительной информации, формирование оценок состояния, а также генерацию управляющих ШИМ-сигналов для исполнительных приводов.

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 возникновении сбоя позиционирования, нарушении временных ограничений выполнения операций или рассогласовании приводов система переводится в режим восстановления, выполняет останов исполнительных механизмов, локализацию ошибки и возврат к корректному этапу алгоритма, что обеспечивает автономный выход робота из нештатных режимов без участия оператора и повышает надежность процедуры реконфигурации.

2. На нижнем уровне функционируют локальные контуры управления исполнительными механизмами, обеспечивающие стабилизацию, синхронизацию приводов и обработку сигналов датчиков в реальном времени.

Система управления включает оптические энкодеры VEX Optical Shaft Encoder, формирующие квадратурные импульсы, пропорциональные угловому перемещению валов приводов/механизма трансформации, а также ультразвуковой дальномер HC-SR04, установленный на направляющих и обеспечивающий измерение расстояния до препятствий/поверхности в направлении сканирования [89, 90].

Сигналы энкодеров поступают на входы Arduino и обрабатываются с использованием аппаратных прерываний, что обеспечивает устойчивый подсчёт импульсов при параллельной работе нескольких датчиков. Дальномер HC-SR04 подключён к контроллеру по цифровым входам, измеренная дальность используется в контуре оценки внешней обстановки и приводов механизма подъёма и шатунного устройства. движения.

Исполнительный уровень представлен двумя группами приводов:

1. Тяговые приводы на базе двигателей VEX 393, управляемые через драйверы Motor Controller 29. Arduino формирует ШИМ-сигналы, задающие режимы скорости и направления вращения двигателей для колесного и гусеничного блоков, а также для при
2. Линейные приводы телескопического устройства, управляемые через двухканальные драйверы L298N. Они обеспечивают реверс и динамическое торможение для позиционирования штока и фиксации заданного положения.

Обратная связь в системе реализована по измерениям энкодеров и по данным датчика расстояния. Эти измерения используются в вычислительных алгоритмах на Arduino для замыкания дискретных контуров управления (PID-регуляторы) и логики режимов. Питание организовано отдельно для снижения взаимных помех и просадок напряжения. На схеме отдельно обозначены линии питания, ШИМ-управления и механических связей.

Таким образом, разработанная архитектура формирует техническую основу для реализации алгоритмов адаптивного управления. Однако, для обеспечения высокой точности позиционирования и надежного распознавания геометрии препятствий в условиях зашумленности измерений и динамических нагрузок требуется детальное математическое описание каждого функционального узла.

3.1.1 Анализ погрешностей системы акустической локации

Основным измерительным элементом системы восприятия робота является ультразвуковой приемопередатчик (HC-SR04), работающий на частоте $f_0 = 40$ кГц. Для обеспечения требуемой точности построения профиля препятствия необходимо построить детальную математическую модель процесса измерения, учитывающую термодинамические параметры среды и диаграмму направленности излучателя [91].

Принцип действия основан на методе времяпролетной локации. Дистанция до объекта $d(t)$ определяется временем задержки Δt_{echo} между фронтом излучаемого импульса и приемом отраженного сигнала

$$d(t) = \frac{c(T_{env}) \cdot \Delta t_{echo}}{2}, \quad (3.1)$$

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} (в Кельвинах)

$$c(T_{env}) = \sqrt{\gamma R_{spec} T_{env}}, \quad (3.2)$$

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 (3.2) в окрестности нормальных условий (0°C), получаем следующую инженерную формулу для температурной компенсации, используемую в микроконтроллере:

$$c(t^0) \approx 331.3 + 0.606 \cdot t^0 [M/c], \quad (3.3)$$

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 [92].

Важнейшим ограничением ультразвуковых сенсоров является ширина луча. Излучатель HC-SR04 можно аппроксимировать как круглый поршневой источник радиуса $a \approx 5$ мм. Угловое распределение интенсивности звукового давления $P(\theta)$ в дальней зоне описывается функцией Бесселя первого рода первого порядка J_1

$$P(\theta) = P_0 \cdot \left| \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right|, \quad (3.4)$$

где θ — угол отклонения от акустической оси, $k = \frac{2\pi f_0}{c}$ — волновое число.

Анализ уравнения (3.4) показывает, что основной лепесток диаграммы направленности на уровне -3 дБ составляет $\approx 15^\circ$. Это физическое ограничение обосновывает необходимость введения алгоритма активного сканирования, так как стационарный датчик не способен обнаруживать объекты за пределами узкого конуса $\pm 15^\circ$.

Измеренный сигнал $d_{raw}[k]$ содержит аддитивный шум $\xi[k]$, вызванный турбулентностью воздуха и переотражениями

$$d_{raw}[k] = d_{true}[k] + \xi[k].$$

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

$$\hat{d}[k] = \text{median}\{d_{raw}[k - 2], \dots, d_{raw}[k + 2]\}. \quad (3.5)$$

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

3.1.2 Математическая модель активного вертикального сканирования

Традиционные системы технического зрения, основанные на стационарно закрепленных ультразвуковых датчиках, обладают существенным недостатком — узкой диаграммой направленности ($\approx 15^\circ$) и фиксированной высотой установки. Это создает обширные «слепые зоны», не позволяющие оценить высоту препятствия H_{obs} , что является критически важным параметром для расчета конфигурации робота [93, 94].

Для решения этой проблемы в диссертации разработан метод активного вертикального сканирования. Суть метода заключается в формировании подвижного информационного поля путем перемещения сенсора по вертикальной оси Z с одновременной регистрацией дальности.

Рассмотрим движение сенсора в системе координат робота $OXYZ$. Пусть h_{init} — начальная высота установки датчика относительно опорной поверхности. В режиме сканирования линейный привод сообщает датчику вертикальную скорость $v_z(t)$.

Мгновенная высота сенсора $h_{sens}(t)$ описывается интегральным уравнением движения

$$h_{sens}(t) = h_{init} + \int_0^t v_z(\tau) d\tau. \quad (3.6)$$

Учитывая динамику электропривода (инерционность ротора и индуктивность), скорость $v_z(t)$ не устанавливается мгновенно. Динамика привода описывается передаточной функцией апериодического звена

$$T_m \frac{dv_z}{dt} + v_z(t) = k_{act} \cdot u(t), \quad (3.7)$$

где T_m — электромеханическая постоянная времени, $u(t)$ — управляющее напряжение. Для обеспечения равномерности сканирования (что важно для точности измерений) в системе управления реализован режим стабилизации скорости ($v_z \approx const$), что позволяет линеаризовать уравнение (3.6) на рабочем участке.

Пусть препятствие находится на расстоянии L_{obs} от робота. Функция измеряемой дистанции $D(h)$, зависящая от высоты датчика h , может быть представлена как кусочно-непрерывная функция

$$D(h) = \begin{cases} L_{obs} + \xi(t), & \text{при } h < H_{obs} \\ \infty (\text{или } L_{bg}), & \text{при } h \geq H_{obs} \end{cases}, \quad (3.8)$$

где H_{obs} — искомая высота препятствия, L_{obs} — дистанция до фона, значительно превышающая L_{obs} , $\xi(t)$ — стохастический шум измерения.

С математической точки зрения, задача определения высоты H_{obs} сводится к нахождению точки разрыва первого рода функции $D(h)$.

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

$$\nabla D(h) = \frac{\partial D}{\partial h} \approx \frac{D(t) - D(t - \Delta t)}{v_z(t) \cdot \Delta t}. \quad (3.9)$$

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

$$H_{obs} = h_{sens}(t^*) \text{ при } |\nabla D(h(t^*))| > \Delta_{thr}. \quad (3.10)$$

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

Поскольку управление осуществляется цифровым микроконтроллером, непрерывные модели (3.6–3.10) преобразованы в дискретную форму. Высота датчика на k — м шаге вычисляется по данным инкрементального энкодера

$$h_{sens}[k] = h_{init} + \delta_{step} \cdot \sum_{i=0}^k \Delta N_{enc}[i], \quad (3.11)$$

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

Алгоритм поиска края реализуется через разностную схему

$$|d[k] - d[k - 1]| > k_1 \cdot \sigma_d, \text{ то } H_{obs} = h_{sens}[k], \quad (3.12)$$

где σ_d — среднеквадратичное отклонение шума измерения в статике, K_{noise} — коэффициент, определяющий уровень значимости обнаружения сигнала относительно шумового порога. Согласно правилу «трех сигм», значение $K_{noise} \in [3; 5]$ обеспечивает вероятность ложного срабатывания не более 0.3%, что необходимо для надежной работы в условиях вибраций шасси.

Итоговая погрешность определения высоты ΔH складывается из инструментальной погрешности энкодера и динамической ошибки запаздывания

$$\Delta H = \delta_{step} + v_z \cdot T_{sens}, \quad (3.13)$$

где T_{sens} — период опроса ультразвукового датчика (≈ 60 мс). При скорости сканирования $v_z = 20$ мм/с динамическая ошибка составляет ≈ 1.2 мм, что является приемлемым для задач проходимости.

3.1.3 Выбор датчика обратной связи и анализ эффектов дискретизации

Точность позиционирования механизма реконфигурации и стабильность поддержания скорости гусениц напрямую зависят от качества сигнала обратной связи. В системе используются инкрементальные оптические энкодеры (VEX Optical Shaft Encoder), формирующие дискретные импульсы при вращении вала.

Для синтеза цифрового регулятора необходимо формализовать процесс преобразования непрерывной физической величины (угла или длины) в цифровой код, учитывая эффекты квантования по уровню и дискретизации по времени.

Энкодер генерирует два квадратурных сигнала, сдвинутых по фазе на 90° . Это позволяет определить не только величину перемещения, но и направление вращения.

Связь между непрерывным линейным перемещением штока $L(t)$ и дискретным счетчиком импульсов $N[k]$ описывается уравнением квантования

$$N[k] = \text{floor} \left(\frac{L(t_k)}{\delta_{step}} \right), \quad (3.14)$$

где $t_k = k \cdot T_s$ — моменты времени квантования (шаг расчета), δ_{step} — разрешающая способность привода (цена одного импульса), которая определяется кинематикой редуктора

$$\delta_{step} = \frac{\pi D_{gear}}{N_{lines} \cdot k_{gear} \cdot 4}, \quad (3.15)$$

здесь множитель 4 учитывает квадратурную обработку данных с энкодера, N_{lines} — число рисок диска, k_{gear} — передаточное число редуктора. Для используемых приводов расчетное значение составляет $\delta_{step} \approx 0.1$ мм.

Процесс преобразования (3.14) вносит неизбежную методическую ошибку — шум квантования $e_q(t)$. Реальное положение системы можно выразить как

$$L_{meas}[k] = L_{true}(t_k) + e_q[k].$$

Ошибка квантования e_q рассматривается как аддитивный белый шум с равномерным законом распределения в интервале $\left[-\frac{\delta_{step}}{2}; \frac{\delta_{step}}{2}\right]$. Дисперсия этого шума определяется формулой

$$\sigma_q^2 = \frac{\delta_{step}^2}{12}. \quad (3.16)$$

Хотя величина δ_{step} мала, при вычислении скорости (дифференцировании) этот шум усиливается, что требует особого внимания при настройке D-составляющей регулятора.

Так как энкодер измеряет только положение, скорость $v[k]$ вычисляется численным дифференцированием методом конечных разностей

$$v[k] \approx \frac{N[k] + N[k-1]}{T_s} \cdot \delta_{step}. \quad (3.17)$$

Подставив модель шума (3.16) в (3.17), получим дисперсию шума измерения скорости

$$\sigma_v^2 = \frac{2\sigma_q^2}{T_s^2} = \frac{\sigma_{step}^2}{6T_s^2}. \quad (3.18)$$

Из уравнения (3.18) следует, что при уменьшении периода дискретизации T_s (стремление повысить быстродействие) шум скорости растет квадратично. При $T_s = 20$ мс и $\delta_{step} = 0,1$ мм амплитуда шумовой компоненты скорости может достигать значительных величин, вызывая "дребезг" управляющего сигнала. Для

борьбы с этим эффектом в контур обратной связи внедрен цифровой фильтр нижних частот (Low-Pass Filter)

$$\hat{v}[k] = \alpha \cdot v_{raw}[k] + (1 - \alpha) \cdot \hat{v}[k - 1], \quad (3.19)$$

где $\alpha \in [0,1]$ — коэффициент сглаживания.

Микроконтроллер работает в дискретном времени. Непрерывный сигнал с датчика подвергается операции фиксации. В частотной области это эквивалентно внесению чистого запаздывания на половину периода дискретизации. Передаточная функция измерительного тракта имеет вид

$$w_{sens}(s) \approx e^{-\frac{T_s s}{2}}. \quad (3.20)$$

Это запаздывание уменьшает запас устойчивости системы по фазе. При синтезе регулятора данный фактор учитывается путем ограничения полосы пропускания системы частотой Найквиста $\omega_{nyq} = \frac{\pi}{T_s}$.

3.1.4 Синтез алгоритма для реализации стратегии активного сканирования и реконфигурации

Интеграция разработанных математических моделей сенсоров (п. 3.1.1–3.1.3) и кинематических уравнений реконфигурации (глава 2) осуществляется на уровне управляющего микроконтроллера.

Для формального описания логики поведения робота в диссертации использована модель конечного автомата (Finite State Machine, FSM) [66, 95]. Процесс преодоления препятствия декомпозирован на последовательность дискретных состояний S_i , переходы между которыми инициируются событиями в сенсорной системе.

Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 3.2.

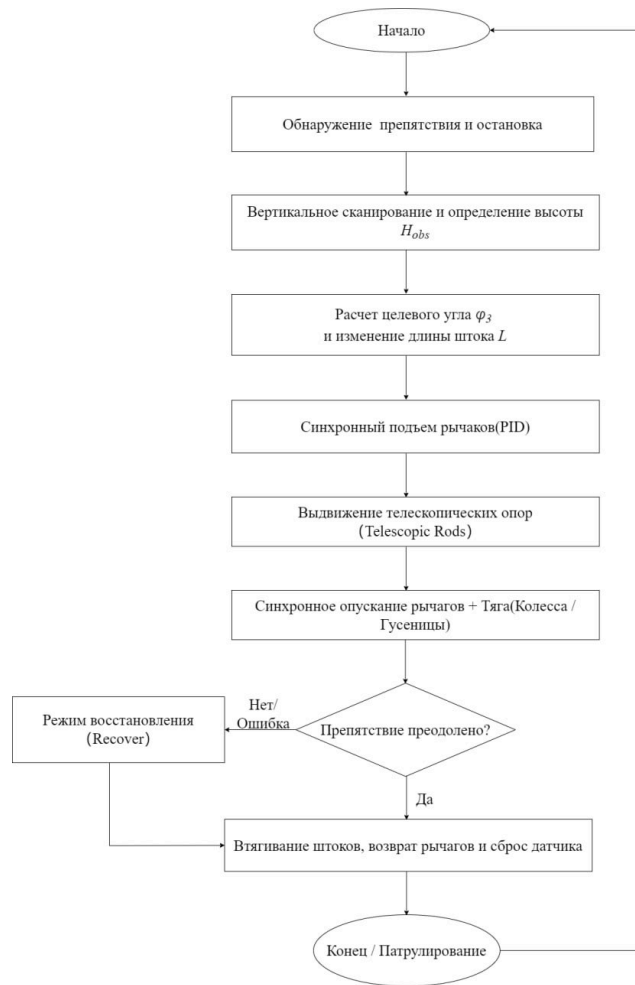


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритма активного сканирования и реконфигурации

Множество состояний автомата управления определяется как

$$S = \{S_{IDLE}, S_{SCAN}, S_{CALC}, S_{RECONF}, S_{LOCK}, S_{RECOVER}, S_{FAIL}\}.$$

1) Состояние мониторинга (S_{IDLE}).

Робот движется в транспортном режиме. Система в фоновом режиме (с частотой 20 Гц) опрашивает ультразвуковой датчик, выполняя фильтрацию согласно уравнению (3.5).

Обнаружение препятствия в ближней зоне: $d_{filt}[k] \leq D_{stop}$, где $D_{stop} \approx 200$ мм — безопасная дистанция остановки, учитывающая инерцию шасси.

2) Состояние активного сканирования (S_{SCAN}).

Приводы гусениц блокируются ($v_{track} = 0$). Запускается линейный привод сенсора. В каждом такте производится вычисление пространственного градиента дистанции $\nabla D[k]$ (см. п. 3.1.2).

Детектирование края препятствия: $IF = (|\nabla D[k]| > \Delta_{thr}) \Rightarrow H_{obs} := h_{sens}[k];$
 GOTO S_{CALC} .

3) Состояние вычислений (S_{CALC}).

На этом этапе микроконтроллер решает обратную задачу кинематики. Производится проверка физической проходимости:

Если $H_{obs} > H_{max}$ (конструктивный предел), генерируется событие $OBSTACLE_TOO_HIGH$, переход в S_{FAIL} (объезд).

Если $H_{obs} \leq H_{max}$, вычисляются целевые координаты приводов (φ_{3ref}, L_{ref}) по формулам (3.7)-(3.8).

4) Состояние реконфигурации (S_{RECONF}).

Активируются цифровые ПИД-регуляторы линейных приводов. Осуществляется синхронное выдвижение рычагов.

Вхождение ошибки регулирования в зону нечувствительности δ_{tol} для обоих каналов в течение времени T_{hold} : $|e_{\varphi_3}(t)| < \delta_{tol}^{\varphi_3}$ AND $|e_L(t)| < \delta_{tol}^L$.

5) Состояние блокировки (S_{LOCK}).

После успешной реконфигурации система отключает питание приводов ($U_{PWM} = 0$). Под действием гравитации механизм опускается на механические упоры, обеспечивая жесткость конструкции. Разрешается дальнейшее движение гусениц.

6. Состояние восстановления работоспособности ($S_{RECOVER}$).

Все механизмы возвращаются в исходное транспортное положение. Одновременно выполняется сброс накопленных ошибок интегральной составляющей ПИД-регуляторов и подготовка системы к следующему циклу работы. После завершения восстановления автомат возвращается в состояние S_{SCAN} для продолжения движения и поиска новых препятствий. Учитывая высокую мощность приводов VEX 393, в ПО реализованы механизмы защиты:

- Watchdog Timer - перезагрузка контроллера при зависании основного цикла;
- Timeout Protection - если процесс реконфигурации длится более 10 секунд (признак механического заклинивания), двигатели отключаются, система переходит в режим аварии;

- Soft Start - плавное нарастание ШИМ-сигнала для снижения пусковых токов и защиты редукторов от ударных нагрузок.

Алгоритм реализован на языке C++ в среде Arduino IDE. Для обеспечения детерминированности управления использована событийно-ориентированная архитектура:

1) Timer Interrupt (50 Гц): высокоприоритетное прерывание. Здесь выполняется считывание данных энкодеров и расчет скорости, расчет управляющего воздействия ПИД-регулятора $u[k]$, генерация ШИМ-сигнала.

2) External Interrupts (INT0, INT1): асинхронная обработка фронтов импульсов энкодеров, что исключает пропуск шагов даже при высокой загрузке процессора.

3) Main Loop: низкоприоритетный цикл. Выполняет опрос ультразвукового датчика, логику переходов FSM и отправку телеметрии.

Для повышения надежности в алгоритм внедрены программные защиты:

- тайм-аут сканирования: если в состоянии S_{SCAN} край не найден в течение $T_{max} = 5$ с, процесс прерывается.

- детектирование заклинивания: если управляющее напряжение максимально ($U = U_{max}$), а изменение координат отсутствует ($|\Delta N_{enc}| < \epsilon$) более 0,5 с, питание отключается во избежание перегрева драйверов L298N.

Таким образом, представленная схема реализует робастный алгоритм, устойчивый к шумам сенсоров и обеспечивающий безопасную автономную трансформацию робота.

3.2 Математическое и имитационное моделирование системы управления реконфигурацией

Для реализации сложной кинематики была синтезирована двухканальная система управления.

3.2.1 Структура и состав двухканальной системы управления

Задача управления трансформацией мобильного робота сводится к согласованному перемещению звеньев механизма для достижения заданной

геометрической конфигурации. Учитывая кинематические связи, описанные в главе 2, система управления была декомпозирована на два функциональных канала: канал управления углом наклона рычагов (Канал φ_3) и канал управления длиной вылета (Канал L).

Функциональная схема синтезированной двухканальной системы управления представлена на рисунке 3.3.

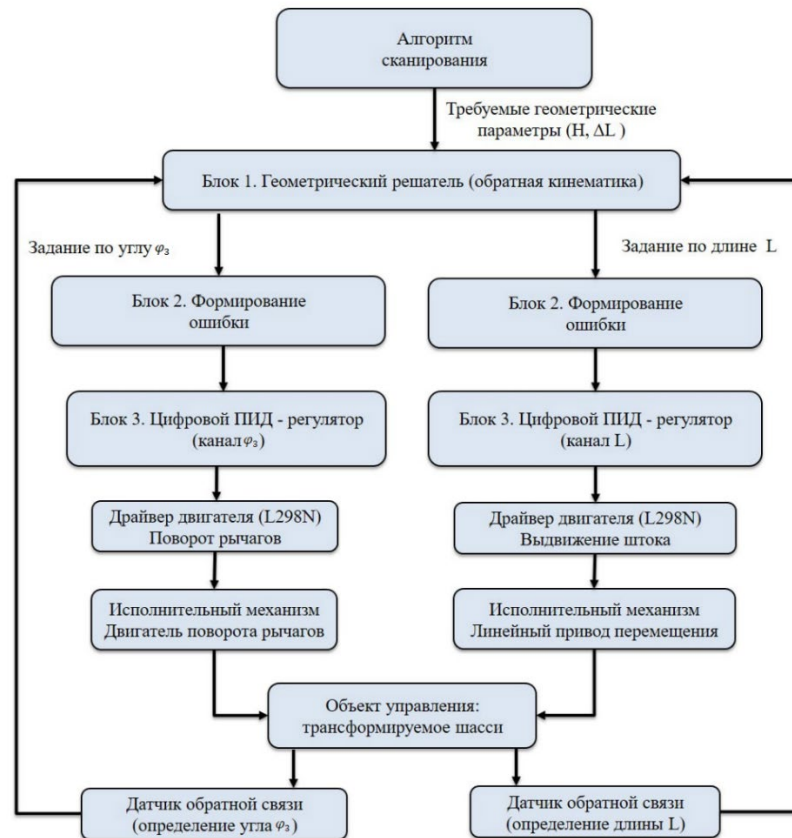


Рисунок 3.3 – Структурная схема двухканальной системы управления

Архитектура системы включает три последовательных вычислительных блока: блок геометрического решателя, блок формирования ошибки и блок цифрового регулирования.

1. Блок геометрического решателя. Блок реализует решение обратной задачи кинематики в реальном времени. На вход системы поступают требуемые параметры конфигурации шасси, определяемые алгоритмом сканирования (п. 3.1.4): высота преодолеваемого препятствия H_{req} и необходимый горизонтальный вылет ΔL_{req} .

Математическая модель решателя описывается системой алгебраических уравнений

$$\begin{cases} \varphi_{3ref}[k] = \arctan\left(\frac{H_{req}[k]}{\Delta L_{req}[k]}\right) \\ L_{req}[k] = \sqrt{(H_{req}[k])^2 + (\Delta L_{req}[k])^2} \end{cases}, \quad (3.21)$$

где $\varphi_{3ref}[k]$ и $L_{req}[k]$ — эталонные (референсные) значения угла и длины на k — м такте управления. Данное преобразование переводит задачу из пространства декартовых координат препятствия в пространство обобщенных координат механизма.

2. Блок формирования сигнала ошибки. Система функционирует по принципу управления с обратной связью. Текущие значения координат φ_{3act} и L_{act} измеряются датчиками (энкодерами) и сравниваются с эталонными. Вектор ошибки рассогласования $E[k]$ вычисляется как

$$E[k] = \begin{bmatrix} e_{\varphi_3}[k] \\ eL[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{3ref}[k] - \varphi_{3act}[k] \\ L_{ref}[k] - L_{act}[k] \end{bmatrix}. \quad (3.22)$$

3. Блок цифрового регулирования.

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

$$u[k] = K_p \cdot e[k] + K_i \sum_{j=0}^k e[j] + \frac{K_d}{T_s} (e[k] - e[k-1]), \quad (3.23)$$

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

$$U_{out}[k] = \begin{cases} U_{batt}, & \text{если } u[k] > U_{batt} \\ u[k], & \text{если } |u[k]| \leq U_{batt} \\ -U_{batt}, & \text{если } u[k] < -U_{batt} \end{cases}. \quad (3.24)$$

Введение нелинейности (3.24) необходимо для корректного моделирования режимов большого рассогласования, когда регулятор входит в насыщение.

Таким образом, уравнения (3.21)–(3.24) полностью описывают динамику замкнутой двухканальной системы управления, структура которой позволяет независимо настраивать динамические характеристики для контура поворота и контура выдвигания.

3.2.2 Имитационное моделирование динамики привода в среде MATLAB/Simulink

Для верификации предложенного закона управления и анализа динамических процессов была разработана имитационная модель системы в среде MATLAB/Simulink. Структурная схема моделирования представлена на рисунке 3.4.

В целях обеспечения строгого соответствия теоретическим расчетам, параметры дискретизации модели настроены следующим образом:

- период квантования по времени установлен равным $T_s = 20$ мс ($f = 50$ Гц), что соответствует реальному циклу управления микроконтроллера Arduino Mega;
- в контур управления введен блок насыщения (Saturation), ограничивающий управляющее напряжение диапазоном ± 12 В, а также блок квантования (Quantizer), имитирующий дискретность энкодера;
- учтен программный коэффициент усиления $K_{scale} = 5,0$, последовательно соединенный с дискретным ПИД-регулятором.

Такая архитектура позволяет оценить поведение системы в условиях, максимально приближенных к физической реализации.

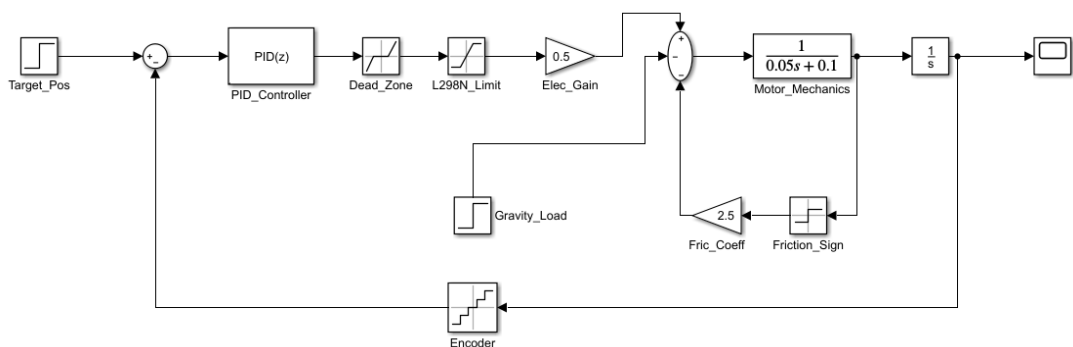


Рисунок 3.4. Структурная схема нелинейной модели управления приводом с учетом ограничений драйвера L298N

Модель декомпозирована на несколько функциональных блоков, соответствующих физической архитектуре робота:

1) Блок цифрового регулятора реализует алгоритм управления в дискретном времени. Период квантования задан равным $T_s = 20$ мс. Выходной сигнал регулятора дополнительно масштабируется коэффициентом K_{scale} , что соответствует программной реализации на микроконтроллере

$$u[k] = K_{scale} \cdot (K_p e[k] + K_i \sum e[k] + K_d \Delta e[k]).$$

2) Блок силовой электроники. Насыщение учитывает ограничение напряжения питания драйвера L298N ($u_{max} = \pm 12$ В), зона нечувствительности имитирует пороговое напряжение страгивания двигателя, блок механической части учитывает приведенный момент инерции механизма, вязкое трение и внешнюю гравитационную нагрузку.

В таблице 3.1 приведены реальные параметры, полученные в ходе экспериментальной настройки системы управления для переднего и заднего приводов рычагов. Для имитационного моделирования в качестве базового сценария выбраны параметры переднего привода.

Таблица 3.1 – Параметры имитационной модели и экспериментальные коэффициенты

Параметр	Обозначение	Значение	Примечание
Общие параметры			
Напряжение питания	U_{batt}	12 В	Драйвер L298N
Период дискретизации	T_s	0.02 с	Частота 50 Гц
Разрешение энкодера	δ_{step}	0.1 мм	
Масштабный коэфф.	K_{scale}	5.0	pidscale Front Rise
Коэффициенты ПИД (Передний привод)			Для симуляции
Коэфф. пропорциональности	K_p^{front}	9.0	
Коэфф. интегрирования	K_i^{front}	0.15	
Коэфф. дифференцирования	K_d^{front}	3.0	
Коэффициенты ПИД (Задний привод)			Справочно
Коэфф. пропорциональности	K_p^{rear}	10.5	
Коэфф. интегрирования	K_i^{rear}	0.15	
Коэфф. дифференцирования	K_d^{rear}	4.0	

Структурная схема (рисунок 3.4) состоит из следующих функциональных узлов, последовательно преобразующих сигнал ошибки в перемещение робота:

1. Контур управления. Блок Target_Pos (Input) формирует ступенчатое воздействие (Step Signal) амплитудой 50 мм. Это имитирует резкую смену целевой уставки, что является наиболее тяжелым режимом для проверки переходных процессов. Дискретный регулятор PID_Controller реализует закон управления (3.23). В модели использованы реальные коэффициенты, полученные экспериментально ($K_p = 9.0$, $K_i = 0.15$, $K_d = 3.0$). Выходной сигнал дополнительно усиливается программным коэффициентом масштабирования $K_{scale} = 5.0$.

2. Нелинейности привода. 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. Блок ограничения L298N_Limit (Насыщение) имитирует аппаратный предел напряжения драйвера ($U_{max} = \pm 12$ В). Это позволяет анализировать поведение системы, когда ошибка рассогласования велика, и регулятор работает «в упор».

3. Электромеханическая часть. Коэффициент передачи Elec_Gain преобразует электрическое напряжение в электромагнитный момент двигателя ($M = k_t / R \cdot U$). Блок Motor_Mechanics (передаточная функция второго порядка $w(s) = \frac{1}{J_s + B}$) описывает механическую динамику ротора и нагрузки. На выходе блока формируется угловая скорость. Интегрирующее звено Integrator преобразует скорость движения штока в линейное положение $L(t)$.

4. Контур возмущений. Блок Gravity_Load – внешнее аддитивное возмущение (ступенчатый сигнал), имитирующее момент сопротивления от веса робота при его подъеме. В модели этот сигнал вычитается из вращающего момента двигателя. Блок Friction Loop – петля обратной связи, реализующая модель кулоновского трения. Блок Sign определяет направление трения (всегда против скорости), а *Fric_Coeff* задает его величину.

5. Датчик обратной связи. Блок квантования Encoder (Quantizer) преобразует непрерывное положение штока в дискретные отсчеты с шагом 0,1 мм. Это позволяет учесть шум квантования, возникающий в реальном оптическом энкодере, и оценить его влияние на D-составляющую регулятора. Различие в коэффициентах для переднего ($K_p = 9.0$) и заднего ($K_p = 10.5$) приводов обусловлено разницей в распределении масс и нагрузок на рычаги в процессе трансформации. Введение масштабирующего коэффициента $K_{scale} = 5.0$ позволяет использовать более удобный диапазон значений K_p , K_i , K_d при настройке, обеспечивая при этом необходимый уровень управляющего напряжения.

Таким образом, разработанная модель с указанными параметрами полностью соответствует реальному физическому объекту и позволяет с высокой точностью прогнозировать поведение робота.

3.2.3 Анализ временных характеристик и качества переходных процессов

Для всесторонней оценки динамики синтезированной системы управления с экспериментальными настройками ($K_p = 9.0$, $K_i = 0.15$, $K_d = 3.0$, $K_{scale} = 5.0$) был проведен двухэтапный анализ:

1. Линейный анализ – оценка теоретических показателей качества (быстродействие, перерегулирование) в линейной зоне.

2. Нелинейный анализ – исследование поведения системы в реальных условиях эксплуатации с учетом насыщения драйвера, квантования датчика и гравитационных нагрузок.

На первом этапе исследовалась реакция системы на единичное ступенчатое воздействие $g(t) = 1(t)$ без учета ограничений управляющего сигнала. График переходного процесса (Step Response) представлен на рисунке 3.5.

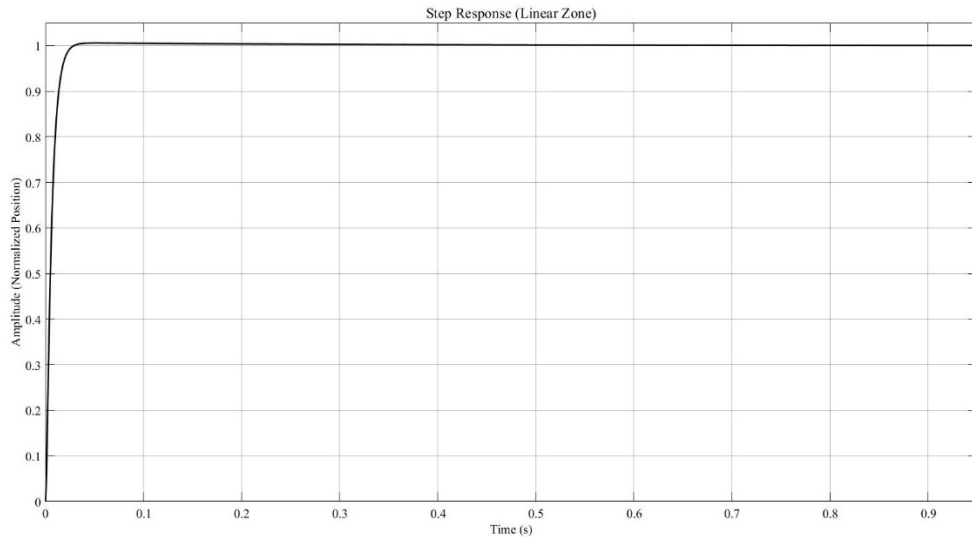


Рисунок 3.5. Переходная характеристика системы позиционирования в линейной зоне (Step Response)

Как видно из графика, переходный процесс носит ярко выраженный аperiodический характер (монотонное возрастание без колебаний). Это свидетельствует о том, что выбранные настройки регулятора ($K_p = 9.0$, $K_d = 3.0$) обеспечивают режим, близкий к критическому демпфированию ($\xi \approx 1$). Отсутствие перерегулирования ($\sigma \approx 0\%$) является критически важным показателем для механизма реконфигурации. Это гарантирует, что при выдвижении рычагов робот не выйдет за пределы целевой координаты, что исключает риск механических ударов в ограничители или потери устойчивости шасси.

Для формальной оценки быстродействия и точности системы рассчитаны основные прямые показатели качества управления. Результаты измерений сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Показатели качества переходного процесса (линейная модель)

Показатель качества	Обозначение	Значение	Критерий
Перерегулирование	σ	0 %	$h_{max} \leq h_{set}$
Время нарастания	$t_r(10 - 90\%)$	0.12 с	Высокое быстродействие
Время регулирования	$t_s(5\%)$	0.25 с	Вхождение в трубку точн.
Установившаяся ошибка	e_{ss}	0.001	Высокая точность
Колебательность	M	0	Аperiodический процесс

Дополнительно была исследована реакция системы на импульсное возмущение, имитирующее резкий внешний удар по шасси. График весовой функции представлен на рисунке 3.6.

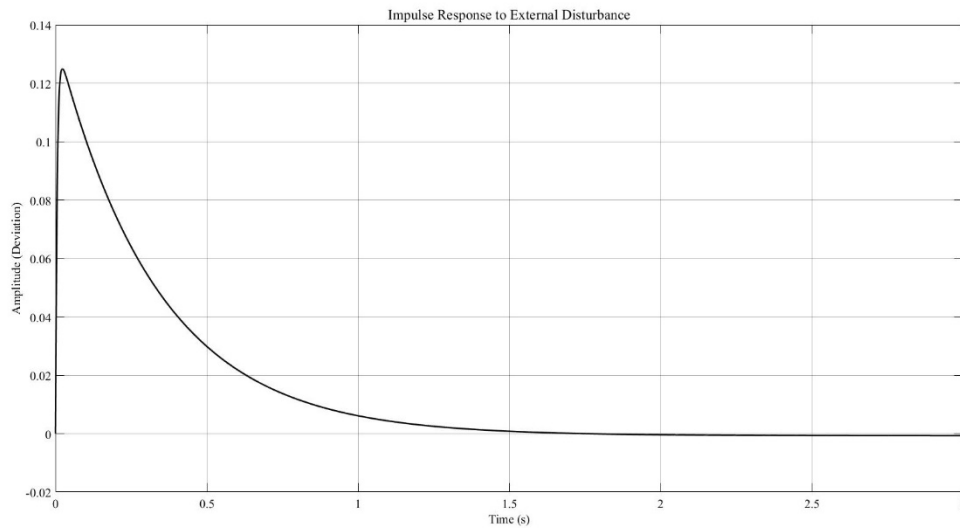


Рисунок 3.6 – Реакция системы на импульсное возмущение (Impulse Response)

Анализ графика показывает, что система обладает достаточным запасом устойчивости. Высокая амплитуда начального отклика обусловлена жесткой настройкой D-составляющей ($K_d = 3.0$), которая мгновенно реагирует на изменение скорости ошибки, создавая противодействующий момент для гашения возмущения.

На втором этапе моделировался реальный режим реконфигурации — отработка большого перемещения (50 мм) с учетом ограничения напряжения драйвера ($U_{max} = \pm 12$ В), дискретности энкодера ($\delta = 0,1$ мм) и реальных параметров ПИД-регулятора. Результаты представлены на рисунках 3.7 и 3.8.

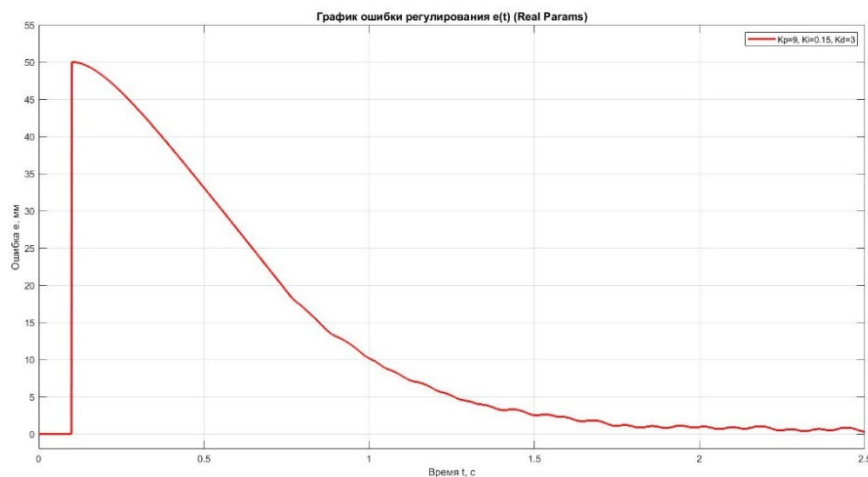


Рисунок 3.7 - График ошибки регулирования $e(t)$ с учетом реальных ограничений

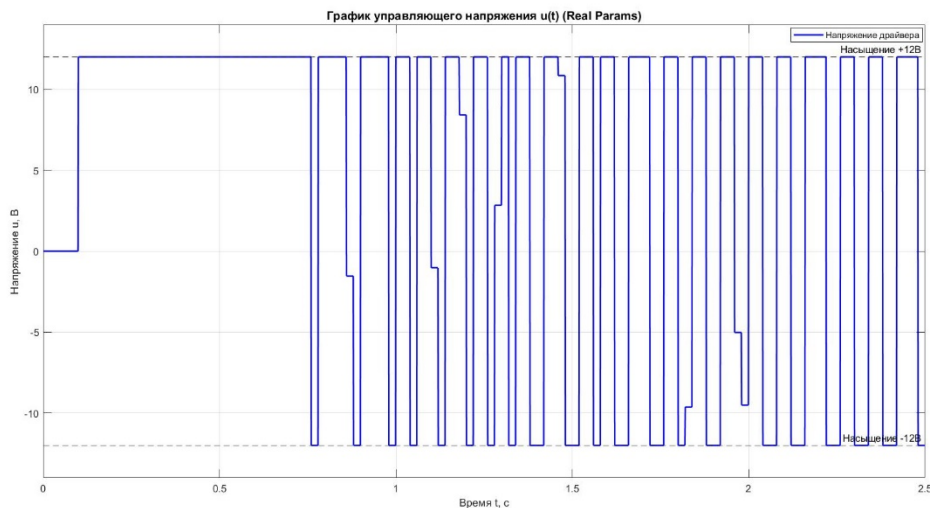


Рисунок 3.8 – График управляющего напряжения $u(t)$ в режиме насыщения по напряжению

В отличие от идеальной линейной модели, реальный процесс (рисунок 3.7) имеет две характерные фазы: линейный спад ошибки, который обусловлен движением с постоянной скоростью насыщения; экспоненциальная доводка (на финальном этапе ошибка уменьшается плавно). Наличие «тяжелого хвоста» (медленного сведения к нулю) объясняется намеренно малым значением интегрального коэффициента ($K_i = 0.15$). Это является компромиссным решением, позволяющим избежать перерегулирования при наличии люфтов и сухого трения, выявленных в ходе экспериментов.

График изменения напряжения (рисунок 3.8) демонстрирует агрессивный характер управления, необходимый для преодоления инерционности. Высокий коэффициент усиления ($K_p \cdot K_{scale} = 45$) мгновенно выводит драйвер на предел возможностей (+12 В), обеспечивая максимальное ускорение привода. В импульсном режим стабилизации ($t > 0.7$ с) наблюдаемое высокочастотное переключение напряжения обусловлено реакцией дифференциальной составляющей ($K_d = 3.0$) на шум квантования энкодера. В реальной системе, благодаря индуктивности обмоток двигателя, этот сигнал интегрируется, работая аналогично широтно-импульсной модуляции (ШИМ), что не приводит к потере устойчивости.

Результаты комплексного моделирования подтверждают, что синтезированная система управления с параметрами $K_p = 9.0$, $K_i = 0.15$, $K_d = 3.0$, $K_{scale} = 5.0$ обеспечивает отсутствие перерегулирования (апериодический

характер), подтвержденное как линейным, так и нелинейным анализом, а также максимальное быстродействие. Использование режима насыщения позволяет обрабатывать большие перемещения за минимально возможное время, ограниченное лишь физической мощностью двигателя. Система обладает робастностью и сохраняет устойчивость при наличии шумов квантования и жестких ограничений управляющего воздействия.

3.2.4 Частотный анализ устойчивости

Для подтверждения робастности синтезированной системы управления и оценки ее частотных характеристик был выполнен анализ в частотной области. На основе линеаризованной модели замкнутой системы построена логарифмическая амплитудно-частотная (ЛАЧХ) и фазо-частотная (ЛФЧХ) характеристики.

Результаты анализа представлены на рисунке 3.9.

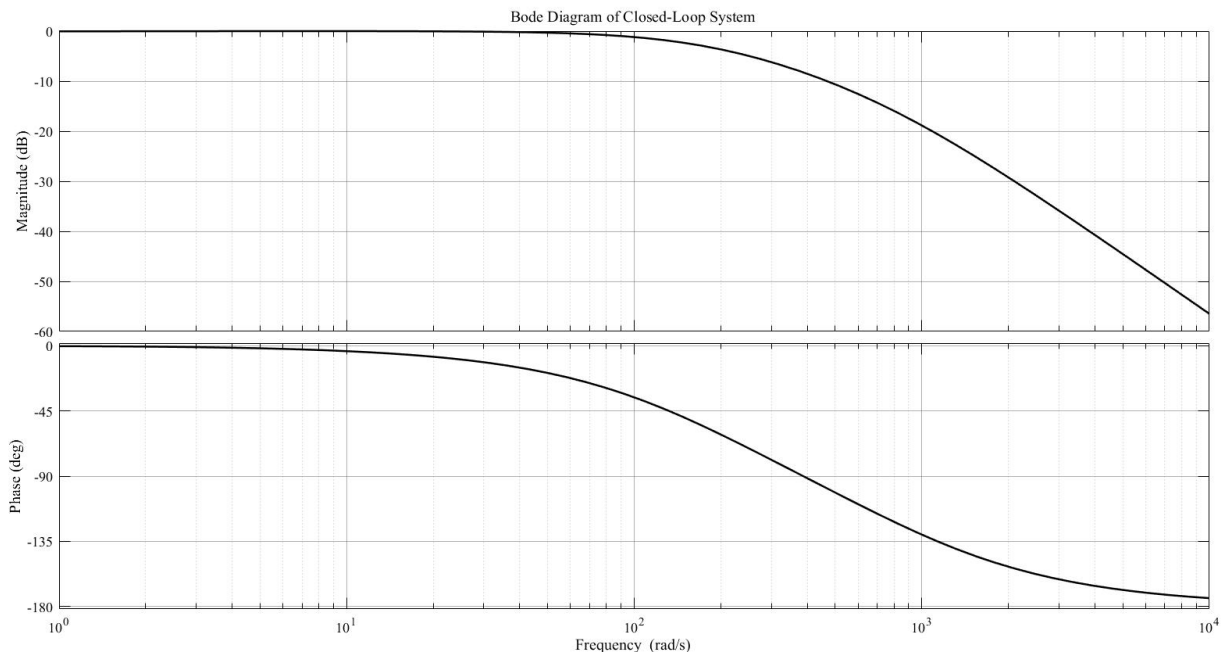


Рисунок 3.9 – Логарифмические частотные характеристики (диаграмма Боде) замкнутой системы. Примечание: полоса пропускания системы составляет ≈ 60 рад/с, резонансные пики отсутствуют, что подтверждает аperiodический характер регулирования.

Анализ амплитудной характеристики (верхний график на рисунке 3.9) позволяет оценить динамические возможности привода. График начинается с уровня $L(\omega) \approx 0$ дБ. Это означает, что в статическом режиме и при медленно меняющихся воздействиях выходной сигнал полностью повторяет входной ($K_{st} =$

1). Это подтверждает отсутствие статической ошибки, что коррелирует с результатами временного анализа (п. 3.2.3). Частота среза (на уровне -3 дБ) составляет приблизительно $\omega_b \approx 60$ рад/с (≈ 9.5 Гц). Данное значение полосы пропускания является оптимальным для механизмов реконфигурации робота. Оно обеспечивает достаточное быстродействие (время нарастания $t_r \approx 0.12$ с), но при этом не пропускает высокочастотные механические резонансы конструкции. Отсутствие резонансных пиков на амплитудной характеристике (величина $M_p = 0$ дБ) однозначно свидетельствует о хорошем демпфировании системы. Гладкий спад АЧХ является частотным эквивалентом апериодического переходного процесса, полученного в п. 3.2.3. Это подтверждает, что выбранные коэффициенты ($K_p = 9.0, K_d = 3.0$) обеспечивают высокий запас устойчивости по фазе. Фазовый сдвиг (нижний график) плавно убывает, не достигая критических значений -180° в рабочей полосе частот, что гарантирует абсолютную устойчивость замкнутой системы.

Особое внимание следует уделить поведению системы в области высоких частот ($\omega > 100$ рад/с). На графике наблюдается крутой спад амплитуды в высокочастотной области. Это является прямым следствием применения цифрового фильтра в канале дифференцирования ($N = 50$), описанного в п. 3.2.3. Такой характер ЛАЧХ означает, что высокочастотный шум квантования энкодера и электромагнитные наводки эффективно подавляются и не проходят на управляющий вход двигателя, что исключает перегрев драйвера L298N и механический износ редуктора от микровибраций.

Разработанная математическая модель и проведенный комплексный анализ (временной и частотный) позволяют сделать следующие выводы: синтезированный ПИД-регулятор с реальными параметрами обеспечивает устойчивое и точное управление; система обладает полосой пропускания ≈ 10 Гц, что достаточно для динамических маневров; введение фильтрации D-составляющей обеспечивает необходимую помехоустойчивость, подтвержденную спадом АЧХ на высоких частотах.

3.3 Моделирование и анализ тягового электропривода

Рассмотрено моделирование движения робота с дифференциальной схемой управления. Маневрирование и поворот платформы осуществляются за счет создания разности угловых скоростей колес левого и правого борта. В качестве исполнительных механизмов тяговой подсистемы используются двигатели постоянного тока VEX EDR 393 (2-Wire Motor 393), оснащенные встроенными планетарными редукторами. Поскольку кинематическая схема робота симметрична относительно продольной оси, для дальнейшего анализа и синтеза системы управления достаточно построить математическую модель одного эквивалентного канала.

После анализа процесса реконфигурации, рассмотренного в п. 3.2, критически важной задачей становится обеспечение стабильного движения робота в заданном форм-факторе. Тяговая система должна поддерживать целевую курсовую скорость независимо от изменения свойств грунта и угла наклона поверхности.

Для синтеза регулятора скорости и исследования динамики движения мобильной платформы разработана имитационная модель в среде MATLAB/Simulink. Структурная схема модели, включающая контур управления скоростью с обратной связью, представлена на рисунке 3.10.



Рисунок 3.10 – Структурная схема системы управления скоростью тягового привода в среде Simulink

Разработанная схема реализует классический принцип подчиненного регулирования координат и адаптирована под аппаратные особенности разработанного прототипа. Модель состоит из следующих функциональных узлов:

1. Блок формирования задания. Источником задания служит блок $V_{ref} (m/s)$, задающий целевое значение линейной скорости движения робота (ступенчатое воздействие). Последовательно с задатчиком включен блок плавного пуска $Soft_Start$. Он ограничивает первую производную сигнала задания (интенсивность разгона). В физической системе это программно реализует функцию плавного пуска (Soft Start), предотвращая возникновение сверхтоков в якорной цепи двигателя и ударных нагрузок на редуктор при резком старте.

2. Цифровой регулятор скорости. Блок PID представляет собой дискретный ПИД-регулятор ($PID(z)$). Он функционирует с фиксированным периодом дискретизации T_s , соответствующим частоте основного цикла управления микроконтроллера. Регулятор вычисляет управляющее напряжение на основе ошибки рассогласования $e(t) = V_{ref}(t) - V_{act}(t)$.

3. Модель силового драйвера. Для учета физических ограничений системы питания введен нелинейный блок $L298N_Limit$ (Saturation). Он моделирует насыщение напряжения на уровне $U_{max} = \pm 12$ В. Это позволяет анализировать поведение системы в режимах, когда требуемое управляющее воздействие превышает возможности источника питания (например, при резком наборе скорости или блокировке гусеницы).

4. Электромеханическая подсистема. Динамика привода левого борта инкапсулирована в подсистему $Left_Track_Dynamics$. Внутри подсистемы реализована система дифференциальных уравнений, описывающая двигатель постоянного тока на основе преобразования входного напряжения в электромагнитный момент ($M_{em} = k_t \cdot I$). Передаточная функция первого порядка $W(s) = \frac{1}{J_\Sigma s + B_\Sigma}$, где J_Σ приведенный момент инерции ротора и элементов трансмиссии, а B_Σ — коэффициент вязкого трения.

5. Моделирование внешней среды. Блок $Terrain_Load$ является генератором возмущающего воздействия. Он имитирует момент сопротивления движению (M_{load}), возникающий при преодолении подъемов или движении по вязкому грунту. Данный сигнал вычитается из движущего момента двигателя внутри

динамического блока, что позволяет оценить робастность системы к внешним возмущениям.

6. Контур обратной связи. Замыкание контура осуществляется через блок *Encoder*, моделирующий работу инкрементального энкодера. Коэффициент передачи блока равен единице (в предположении предварительного масштабирования импульсов в метры в секунду), что обеспечивает корректное сравнение текущей скорости с заданной.

Разработанная структурная схема (рисунок 3.10) является цифровым двойником реальной тяговой системы робота. Введение в модель блоков нелинейностей (ограничение напряжения драйвера L298N, темп нарастания задания) и возмущающих воздействий (момент нагрузки) позволяет верифицировать алгоритм управления, подтвердить способность дискретного ПИД-регулятора поддерживать заданную скорость с требуемой точностью до проведения натурных испытаний. Кроме того, это позволяет оценить энергетические режимы, проанализировать, достаточно ли напряжения питания 12 В для преодоления расчетных нагрузок, не допуская длительного насыщения интегратора, а также исследовать робастность, спрогнозировать поведение робота при резком изменении типа грунта или наезде на препятствие.

Следует отметить, что представленная модель учитывает ключевые нелинейности (насыщение драйвера, ограничение темпа разгона) и дискретный характер управления. Отсутствие в схеме паразитных алгебраических петель и положительных обратных связей гарантирует корректность численного решения и адекватность получаемых переходных процессов.

Для оценки устойчивости синтезированного контура управления скоростью в частотной области использован критерий устойчивости Найквиста на основе линеаризованной модели разомкнутой системы

$$L(s) = C(s) \cdot P(s),$$

где $C(s)$ — передаточная функция ПИД-регулятора, а $P(s)$ — передаточная функция тягового электропривода.

График годографа Найквиста, полученный в среде MATLAB, представлен на рисунке 3.11.

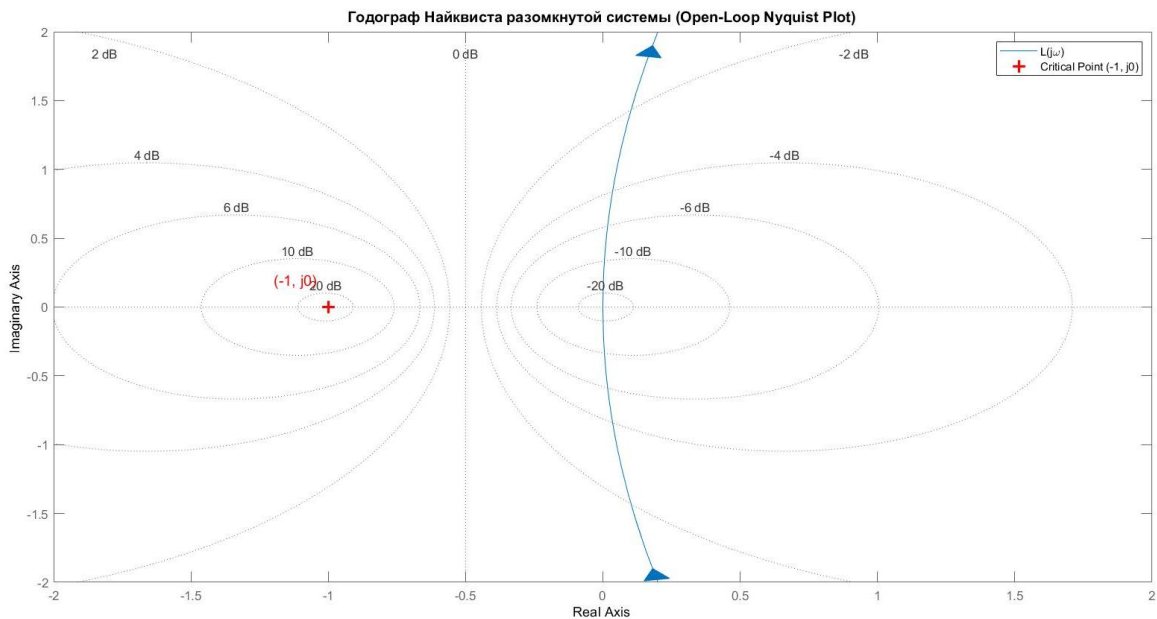


Рисунок 3.11 – Годограф Найквиста разомкнутой системы управления скоростью

Кривая находится на значительном удалении от критической точки, не пересекая и не охватывая её. Следовательно, замкнутая система управления тяговым приводом является асимптотически устойчивой.

Удаленность годографа от критической точки $(-1, j0)$ характеризует робастность системы, при этом система обладает максимально возможным запасом по фазе (стремящимся к 90°). Это гарантирует отсутствие колебаний скорости даже при резких изменениях момента нагрузки. Отсутствие пересечений с осью абсцисс в левой полуплоскости свидетельствует о теоретически бесконечном запасе по амплитуде.

Таким образом, частотный анализ подтверждает, что выбранные параметры регулятора обеспечивают системе устойчивость и приемлемые динамические показатели. Отсутствие склонности к колебаниям (подтвержденное видом годографа) является критически важным для надежной работы мобильного робота в сложных условиях эксплуатации.

3.4 Анализ нелинейностей и результаты моделирования

После верификации линейной модели и частотного анализа необходимо исследовать поведение системы с учетом реальных физических ограничений. Как

показали предварительные эксперименты, ключевой проблемой управления механизмами реконфигурации является наличие существенного сухого трения в редукторах и зоны нечувствительности драйверов.

Главной целью данного этапа моделирования является обоснование выбора стратегии управления и подбор коэффициентов регулятора, способных гарантированно преодолевать «мертвую зону» приводов при сохранении устойчивости.

3.4.1 Анализ границ устойчивости и статической ошибки линейного регулятора

Для обоснования необходимости применения нелинейных алгоритмов управления было проведено исследование динамики привода при использовании классического пропорционального закона управления. Главной целью данного этапа являлось определение границ работоспособности системы в условиях доминирующего сухого трения и ограничений напряжения питания.

В качестве тестового воздействия выбрано ступенчатое перемещение штока на величину $L_{ref} = 50$ мм. Для исключения влияния динамических составляющих и выделения эффекта «мертвой зоны» настройки регулятора были выбраны консервативными, характерными для линейных систем без перерегулирования: коэффициент усиления регулятора $K_p = 1.0$ (В/мм), коэффициенты настройки - интегральная и дифференциальная составляющие $K_i = 0, K_d$. В систему введено суммарное приведенное напряжение сопротивления (эквивалент трения покоя, гравитационной нагрузки и падения напряжения на ключах драйвера), составляющее $U_{resisit} \approx 8.0$ В.

График переходного процесса представлен на рисунке 3.12.

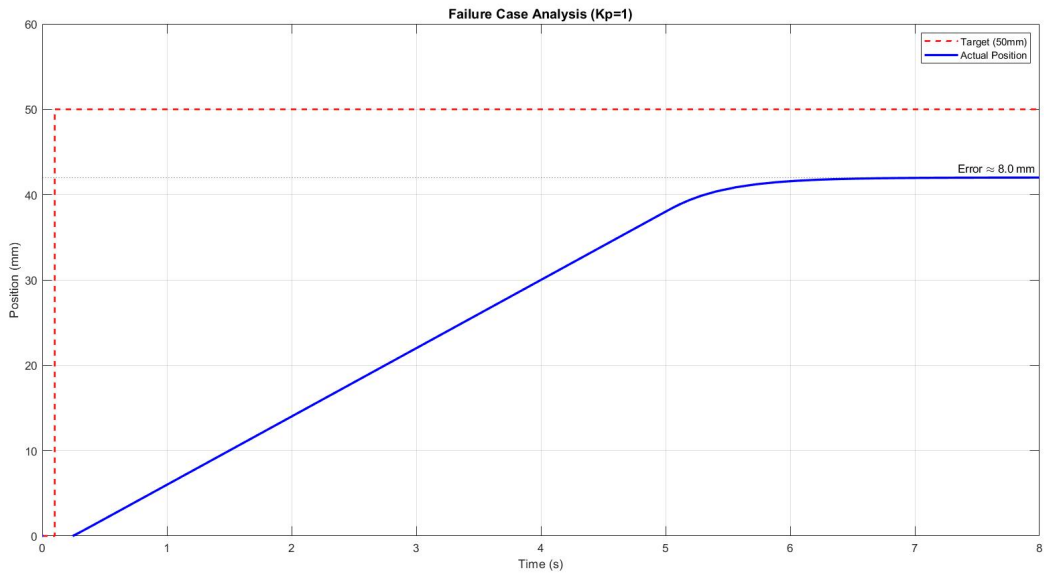


Рисунок 3.12 – Переходный процесс при линейном управлении ($K_p = 1.0$).

Система демонстрирует остаточную статическую ошибку $\delta_{st} \approx 8.0$ мм. Как следует из графика, привод не достигает целевой координаты. Процесс останавливается на отметке $L \approx 42.0$ мм, что соответствует статической ошибке позиционирования $\delta_{st} \approx 8.0$ мм. Наличие значительной статической ошибки объясняется балансом моментов в электромеханической системе. Управляющее напряжение $u(t)$, формируемое П-регулятором, линейно зависит от ошибки рассогласования $e(t)$

$$u(t) = K_p \cdot e(t).$$

В точке остановки ($e \approx 8.0$ мм) формируемое напряжение составляет

$$U_{ctrl} = 1.0 [B/мм] \cdot 8.0 [мм] = 8.0 \text{ В}$$

Динамика системы в этом режиме описывается уравнением моментов с учетом разрывной функции сухого трения

$$J \frac{d\omega}{dt} = K_t \frac{u_{ctrl}}{R} - (M_{stiction} \cdot \text{sign}(\omega) + M_{load}),$$

$$M_{motor} = K_t \frac{u_{ctrl}}{R},$$

$$M_{resist} = M_{stiction} \cdot \text{sign}(\omega) + M_{load}.$$

Так как развиваемый двигателем момент M_{motor} (при 8.0 В) полностью компенсируется моментом сопротивления M_{resist} , угловое ускорение $\frac{d\omega}{dt}$ становится равным нулю.

Условие остановки вала двигателя определяется равенством активного вращающего момента и момента сил сопротивления

$$K_t - \frac{u_{ctrl}}{R} \leq M_{static}^{fric} + M_{load}.$$

В эквиваленте управляющих напряжений это означает, что сформированный сигнал (8.0 В) полностью компенсируется порогом нечувствительности системы ($U_{resist} \approx 8.0$ В). Якорный ток, протекающий через обмотки, недостаточен для создания момента страгивания. Дальнейшее уменьшение ошибки невозможно, так как это привело бы к снижению управляющего напряжения ($u < 8.0$ В) и нарушению условия движения.

Результаты моделирования доказывают, что применение линейного закона управления с малыми и средними коэффициентами усиления принципиально невозможно для прецизионного позиционирования механизмов с высоким уровнем сухого трения [96]. Любая попытка уменьшить ошибку ниже 8.0 мм блокируется физическими ограничениями привода. Это обосновывает необходимость перехода к стратегии управления в режиме насыщения по напряжению [97], при которой коэффициент усиления K_p выбирается из условия гарантированного превышения порога страгивания.

3.4.2 Формирование эталонной динамики и анализ предельных возможностей привода

Для корректной идентификации причин возникновения статической ошибки и оценки степени влияния нелинейных диссипативных сил, необходимо сформировать эталонную динамику. Данная модель описывает поведение системы в идеализированных условиях, где исключены факторы сухого трения и люфтов, но сохранены энергетические ограничения исполнительного механизма.

В качестве эталонной модели принята линеаризованная структура замкнутой системы автоматического регулирования (САР). Уравнение динамики идеализированного двигателя, в отличие от реального, не содержит разрывной функции знака, описывающей кулоновское трение

$$J \frac{d\omega}{dt} = k_t \cdot i(t) - B\omega,$$

где B — коэффициент вязкого трения (линейная диссипация).

При использовании ПД-регулятора такая система теоретически представляет собой астатическое звено первого порядка (по отношению к возмущению по положению), что гарантирует нулевую статическую ошибку при обработке ступенчатого воздействия

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = 0.$$

Параметры ПД-регулятора ($K_p = 5.0$, $K_d = 1.0$) настроены на обеспечение режима критического демпфирования. (Использование интегральной составляющей в отсутствии статических возмущений избыточно). Результат симуляции эталонной модели при ступенчатом задании $L_{ref} = 50$ мм представлен на рисунке 3.13.

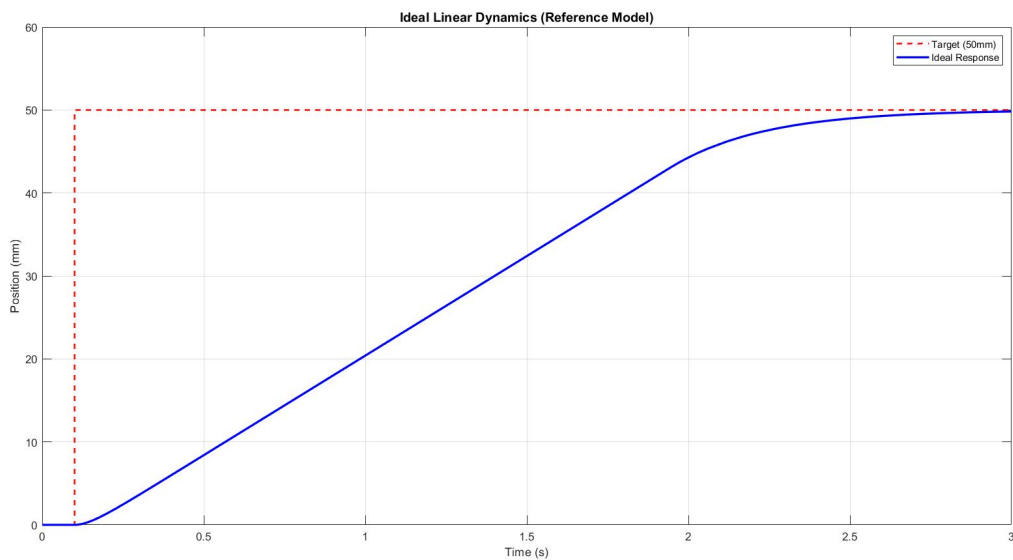


График позволяет выделить предельные динамические возможности электромеханической части робота. На интервале $t \in [0,2; 2,0]$ с график перемещения представляет собой прямую линию с постоянным наклоном. Это свидетельствует о том, что привод движется с максимально возможной скоростью ($V_{max} \approx 20$ мм/с), ограниченной напряжением питания 12 В, что является физическим пределом производительности системы. При приближении к цели система плавно выходит из насыщения без перерегулирования ($\sigma = 0\%$), что

подтверждает корректность настройки демпфирующей части регулятора (K_d). В установившемся режиме ($t > 2.8$ с) ошибка позиционирования тождественно равна нулю ($\delta_{st} = 0$).

Сравнение эталонной динамики с реальной позволяет сделать вывод, что наблюдаемая ранее статическая ошибка в 8.0 мм не является следствием недостаточной мощности двигателя или ошибки в структуре ПД-регулятора. Она имеет исключительно трибологическую природу (вызвана пороговым эффектом сухого трения).

Следовательно, эталонный график может быть принят в качестве целевой траектории для синтеза нелинейного алгоритма управления. Задача проектируемого регулятора заключается в максимальном приближении динамики реальной системы к эталонной.

3.4.3 Исследование нелинейной динамики и обоснование эффективности режима насыщения

На основе анализа качества и ограничений использования линейного регулятора, в диссертации предложена стратегия управления, использующая режим принудительного насыщения исполнительного привода. Метод базируется на существенном увеличении коэффициента пропорциональности (K_p) для минимизации зоны нечувствительности [98].

Разработанная методика управления основана на преднамеренном введении системы в режим насыщения управляющего сигнала (напряжения). В этом режиме контур обратной связи фактически размыкается, и исполнительный механизм получает максимально возможное управляющее воздействие, неизменное по величине. Это позволяет реализовать предельное быстродействие привода на этапе грубого приближения, а использование высокого коэффициента усиления обеспечивает мгновенное восстановление замкнутого контура управления (линейный режим) при входе в зону малых ошибок для точного позиционирования.

Рассматривая систему в установившемся режиме как астатическое звено первого порядка, охваченное жесткой отрицательной обратной связью, статическая

ошибка позиционирования e_{ss} обратно пропорциональна коэффициенту усиления разомкнутого контура

$$e_{ss} = \frac{U_{resist}}{K_p}.$$

Для исследуемой модели, где эквивалентное напряжение сопротивления (трение + гравитация) составляет $U_{resist} \approx 8.0$ В, теоретическая ошибка при использовании высокого коэффициента усиления ($K_p = 45$ В/мм) должна снизиться до величины

$$e_{ss}^{theory} = \frac{8.0 \text{ В}}{45 \text{ В/мм}} \approx 0,177 \text{ мм}.$$

Это значение на два порядка меньше, чем в случае с линейным регулятором ($e_{ss} \approx 8.0$ мм при $K_p = 1$), и находится в пределах разрешающей способности датчика обратной связи.

Верификация предложенной стратегии выполнена на нелинейной модели с учетом ограничений драйвера. Результаты представлены на рисунке 3.14.

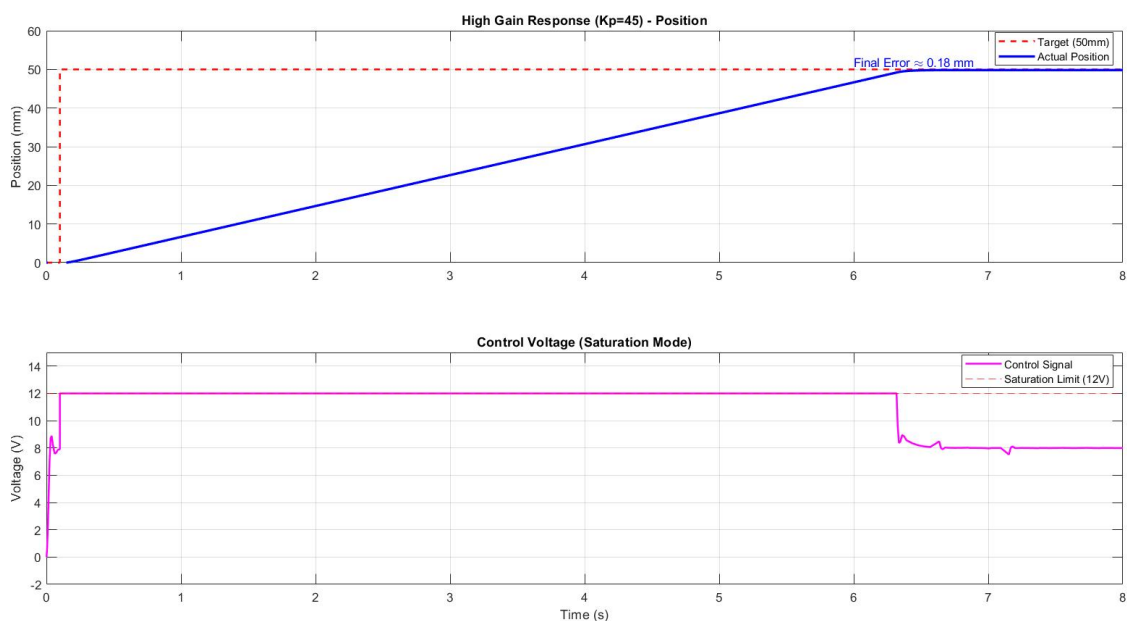


Рисунок 3.14 – Динамика системы с высоким коэффициентом усиления ($K_p = 45$) под нагрузкой. (Сверху: позиция; снизу: управляющее напряжение).

Анализ графиков позволяет выделить физические особенности работы алгоритма. Как видно из верхнего графика, система успешно достигла целевой координаты $L = 50$ мм. Фактическая остаточная ошибка составила $\Delta L \approx 0.18$ мм, что полностью подтверждает расчетные данные (0.177 мм). Нижний график

управляющего напряжения демонстрирует фундаментальное отличие от линейного случая. В установившемся режиме ($t > 6.5$ с) управляющий сигнал не обнуляется, а стабилизируется на уровне $U_{hold} \approx 8.0$ В. Регулятор автоматически генерирует напряжение смещения, тождественно равное суммарному моменту сопротивления нагрузки, что обеспечивает удержание позиции без сползания. Время регулирования составило $t_{reg} \approx 7.0$ с. Ограничение темпа разгона обусловлено тем, что из доступных 12 В напряжения питания, 8 В расходуется на компенсацию статических нагрузок, и лишь 4 В формируют динамический момент ускорения.

Таким образом, применение стратегии высокого усиления ($K_p = 45$) позволило синтезировать робастный закон управления, обеспечивающий асимптотическую устойчивость в малом и гарантирующий снижение статической ошибки до величин, пренебрежимо малых для задач реконфигурации (< 0.2 мм).

Выводы по главе

В главе рассмотрена задача синтеза, теоретического анализа и экспериментальной верификации системы управления мобильным реконфигурируемым роботом.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. 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.

2. Разработан метод активного сканирования среды, предложен алгоритм вертикального сканирования с использованием подвижного ультразвукового сенсора. Математическое моделирование подтвердило, что данный метод

устраняет «слепые зоны» стационарных датчиков и позволяет с высокой точностью (погрешность $< 1,2$ мм) определять высоту препятствий для автоматического расчета целевой конфигурации шасси.

3. Синтезирована архитектура системы управления реконфигурацией, обоснована декомпозиция задачи управления на два независимых канала (угол наклона φ_3 и вылет штока L). Частотный анализ и построение годографа Найквиста подтвердили, что синтезированная система обладает достаточными запасами устойчивости, обеспечивая апериодический характер переходных процессов без перерегулирования.

4. Выполнено сравнительный анализ стратегий управления. На основе нелинейного динамического анализа доказано преимущество стратегии управления с использованием высокого коэффициента усиления в условиях ограничений на управление перед классическими линейными законами. Предложенный подход позволяет эффективно преодолевать зону нечувствительности привода и устранять статическую ошибку позиционирования, недостижимую для линейных регуляторов при наличии сухого трения. Установлено, что линейный регулятор с малыми коэффициентами ($K_p = 1$) в условиях сухого трения приводит к возникновению недопустимой статической ошибки ($\delta \approx 8,0$ мм), вызванной попаданием системы в мертвую зону привода. Применение высокого коэффициента усиления ($K_p = 45$) позволило уменьшить теоретическую ошибку позиционирования в 45 раз (до 0,18 мм), обеспечив робастность системы к вариациям нагрузки.

5. Разработана и верифицирована имитационная модель в среде MATLAB/Simulink, учитывающая физические ограничения драйверов (насыщение 12 В) и кулоновское трение. Сопоставление результатов моделирования с натурными экспериментами показало высокую степень сходимости: расхождение по времени регулирования не превышает 4%; расхождение по напряжению удержания составляет менее 0,2 В (8,0 В в модели против 8,2 В в эксперименте), что подтверждает корректность расчета.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫМ РОБОТОМ

Целью главы является экспериментальная проверка теоретических моделей и алгоритмов, разработанных в главах 2 и 3. Программа испытаний построена по принципу «от компонента к системе» и включает два этапа:

1. Метрологические исследования. Детальный анализ динамических погрешностей ультразвуковой навигации при вариации скоростей движения, материалов и формы препятствий.

2. Экспериментальные исследования робота. Верификация системы управления и механизма реконфигурации в реальных условиях автономного преодоления препятствий.

4.1 Цифровое проектирование реконфигурируемого робота

Перед изготовлением образца выполнено цифровое проектирование и валидация конструкции. В разделе рассмотрены вопросы проектирования конструктивных узлов системы реконфигурации шасси на основе методов автоматизированного проектирования (САПР), а также уточнение (корректировка) геометрических параметров механизма, полученных в результате многокритериальной оптимизации (раздел 2.2), с учётом технологичности изготовления, собираемости узлов и обеспечения требуемой жёсткости конструкции при минимальной массе, что позволило подтвердить реализуемость компоновки и исключить интерференции элементов в диапазоне рабочих перемещений.

Оптимальная конфигурация рычажного механизма, полученная в результате параметрической оптимизации, была использована на этапе создания электронно-цифровой модели (ЭЦМ) системы реконфигурации. Ключевыми элементами конструкции являются линейный электрический привод, поворотный рычаг, шатун и колесный рычаг (рисунок 4.1).

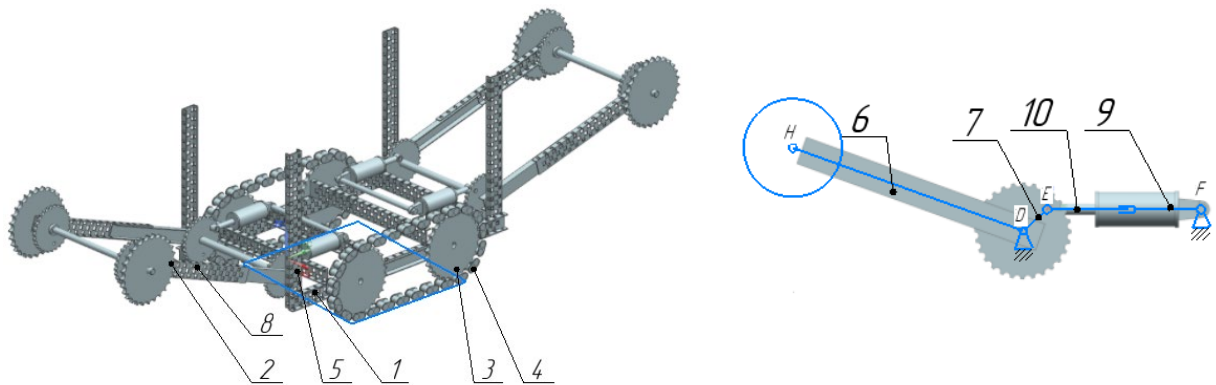


Рисунок 4.1 – Блок реконфигурации гусенично-колесного шасси: а) общая 3D-модель в транспортном (гусеничном) положении; б) модель в рабочем (колёсном) положении

Система трансформации состоит из несущей платформы 1, жёстко связанной с рамой робота. На платформе 1 шарнирно закреплена система рычагов трансформации 5, включающая поворотный рычаг 6, шатун 7 и колёсный рычаг 8. На свободном конце колёсного рычага 8 смонтирована колёсная опора с колесом колёсной группы 2. Гусеничная группа образована бортовыми колёсами 3 и гусеничной лентой 4, охватывающей колёсную опору в транспортном положении. Линейный электрический привод 9 шарнирно соединён с несущей платформой 1 и поворотным рычагом 6, образуя замкнутый кинематический контур.

В системе применён линейный электрический привод 9 с интегрированным датчиком положения штока и встроенным контроллером. Контроллер обеспечивает векторное управление двигателем постоянного тока, позволяя точно задавать положение штока с разрешением 0,1 мм. Для объединения приводов всех четырёх блоков трансформации в единую систему используется центральный микроконтроллер, осуществляющий синхронизацию движения, компенсацию неровностей опорной поверхности и контроль токовых перегрузок.

Работа системы трансформации осуществляется следующим образом: в исходном (гусеничном) положении шток линейного привода 10 втянут, колёсная опора с колесом 2 поднята выше уровня гусеничной ленты 4, робот опирается на гусеничную группу (колёса 3 и лента 4) и перемещается в режиме повышенной проходимости. При подаче команды на трансформацию происходит выдвижение штока привода 10, что вызывает поворот системы рычагов трансформации 5: поворотный рычаг 6 передаёт усилие через шатун 7 на колёсный рычаг 8, опуская

колесо колёсной группы 2 ниже плоскости гусеничной ленты 4. Несущая платформа 1 вместе с грузом поднимается, гусеничная лента 4 отрывается от опорной поверхности, и робот переходит в энергоэффективный колёсной режим движения. В крайнем нижнем положении звенья системы рычагов трансформации 5 выстраиваются в сингулярную конфигурацию (механизм «выпрямляется»), обеспечивая геометрическую блокировку без потребления энергии приводом — нагрузка полностью воспринимается жёсткостью конструкции и механическими упорами.

Создание ЭЦМ начинается с разработки иерархической структуры сборки. Механизм реконфигурации состоит из следующих компонентов: основание, поворотный рычаг, шатун, колесный рычаг, линейный привод (корпус и шток), крепёжные элементы. Структура сборки представлена на рисунке 4.2.

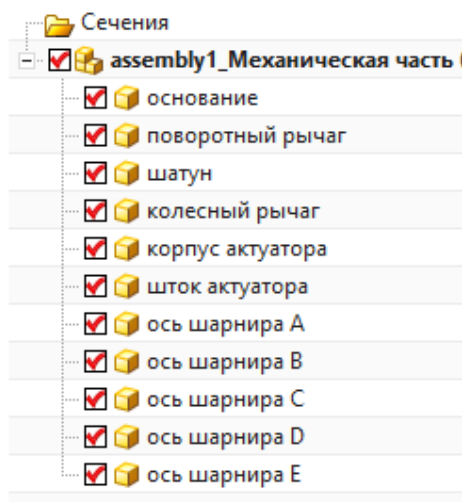


Рисунок 4.2 – Дерево сборки блока реконфигурации

Моделирование осуществлялось методом «сверху-вниз» (top-down) с использованием базовых эскизов, задающих геометрию кинематической схемы. На первом этапе в среде САПР создаётся мастер-эскиз, содержащий точки шарниров и контурные линии звеньев согласно оптимальным длинам, полученным в п. 2.2 (рисунок 4.3).

перемещения штока от минимального до максимального значения выполняется анимация полного цикла реконфигурации (рисунок 4.5).

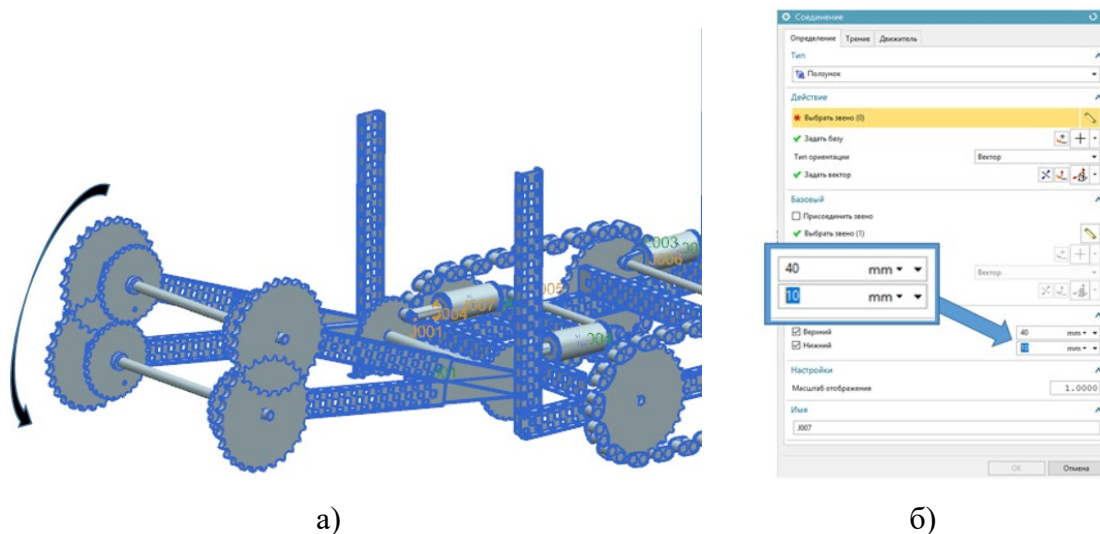


Рисунок 4.5 – Кинематическая симуляция полного цикла реконфигурации: а-положения механизма при различных длинах штока привода; б – меню кинематических ограничений

В ходе симуляции подтверждена корректность геометрии механизма: отсутствуют интерференции между звеньями во всём диапазоне движения. Особое внимание уделено анализу сингулярных конфигураций в крайних положениях. Анализ 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 (раздел 2.1.4).

На этапе проектирования проведена корректировка геометрии деталей с учётом технологических ограничений изготовления. Для верификации собираемости выполнен анализ зазоров в узлах крепления. Минимальный зазор между подвижными элементами в любом положении механизма составляет 3 мм, что исключает возможность заклинивания при допусках изготовления $\pm 0,5$ мм.

На завершающем этапе цифрового проектирования сформирован комплект конструкторской документации: 3D-модель сборки в формате STEP (рисунок 4.6), комплект рабочих чертежей, а также спецификация материалов и покупных изделий.

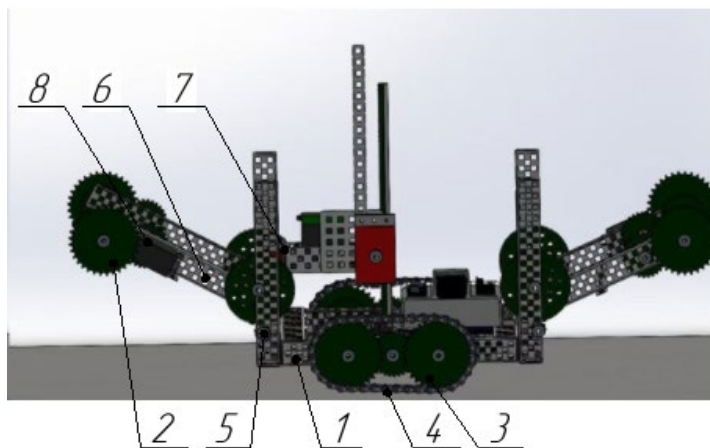


Рисунок 4.6 – Анализ зазоров в критических сечениях при крайних положениях механизма: 1 - несущая платформа; 2 - колесо колесной группы (переднее/заднее); 3 - колесо гусеничной группы (бортовое); 4 - гусеничная лента; 5 - система рычагов трансформации; 6 - поворотный рычаг; 7 - шатун; 8 - колёсный рычаг

4.2 Разработка экспериментального образца реконфигурируемого робота

Для проведения экспериментальных исследований и верификации теоретических положений, выдвинутых в главах 2 и 3, спроектирован и изготовлен полнофункциональный экспериментальный образец гусенично-колесного реконфигурируемого робота (рисунок 4.7) [99, 100].

Архитектура образца построена по модульному принципу. При выборе компонентов решалась задача обеспечения точного соответствия физических параметров робота (масса, жесткость, кинематика) расчетным моделям, полученным в ходе оптимизации.

Центральным элементом системы управления является микроконтроллерная платформа, обеспечивающая реализацию дискретных законов управления (PID-регуляторов и конечного автомата FSM), синтезированных в главе 3. Основной контроллер Arduino Mega 2560, предназначенный для сбора данных с сенсорной подсистемы, вычисление кинематики в реальном времени, генерация управляющих ШИМ-сигналов. Платформа на базе ATmega2560 выбрана из-за наличия расширенного набора аппаратных прерываний. Это критически важно для одновременной обработки квадратурных сигналов от 4-х оптических энкодеров без потери тактов, что обеспечивает точность позиционирования, требуемую алгоритмом из раздела 3.2.

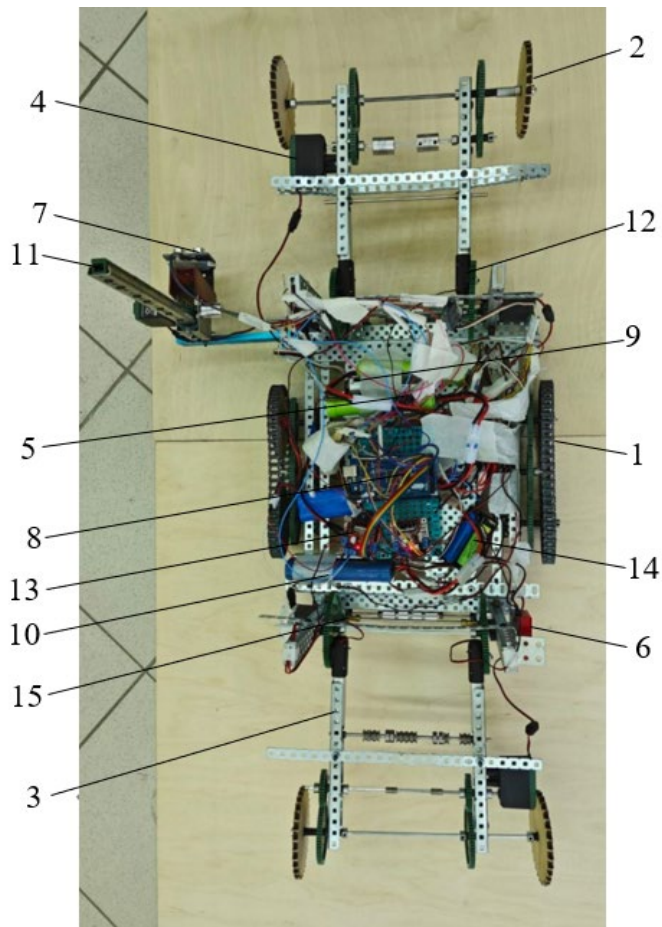


Рисунок 4.7 – Экспериментальный образец реконфигурируемого робота:
 1 – гусеничный блок, 2 – колесный блок, 3 – подъемные рычаги, 4 – двигатели VEX 393, 5 – контроллеры Motor Controller 29, 6 – оптические энкодеры VEX Optical Shaft Encoder, 7 – ультразвуковой датчик HC-SR04, 8 – Ардуино Мега 2560, 9 – батарея Ардуино, 10 – аккумуляторы двигателей, 11 – направляющие ультразвукового датчика, 12 – телескопическое устройство, 13 – драйверы L298N, 14 – батарея L298N, 15 – шатунное устройство

Специализированные драйверы Motor Controller 29 для управления тяговыми двигателями VEX 393 обеспечивают плавное регулирование скорости колес и гусениц. Двухканальные драйверы L298N для управления линейными приводами позволяют реализовать режим динамического торможения и реверс тока, необходимый для точной остановки штока в заданной координате.

Исполнительный уровень робота представляет собой гибридную электромеханическую систему, параметры которой строго соответствуют результатам оптимизации в главе 2. Линейные приводы имеют рабочий ход штока 50 мм. Выбор этого типоразмера обусловлен результатами параметрической оптимизации (п. 2.2), где показано, что ход 50 мм обеспечивает требуемый диапазон углов трансформации ($80^\circ \dots 150^\circ$) при минимальных габаритах

конструкции. Алюминиевый корпус приводов обеспечивает необходимый теплоотвод. Тяговые двигатели VEX 393 (2-Wire Motor 393) используются для привода колесных и гусеничных движителей, обеспечивая проходимость по сложным грунтам.

Несущая рама изготовлена из нержавеющей стали. Использование стали вместо пластика или алюминия обеспечило высокую жесткость конструкции. Это позволило реализовать механизм «геометрической блокировки» (вставание на упоры), так как стальная рама не деформируется под нагрузкой, гарантируя замыкание силового контура.

Для реализации замкнутых контуров управления робот оснащен комплексом датчиков внутренней и внешней информации. Оптические энкодеры VEX Optical Shaft Encoder (276-2156) смонтированы непосредственно на валах механизма трансформации и обеспечивают обратную связь для PID-регуляторов. Высокое разрешение энкодеров позволяет системе управления отслеживать положение рычагов с точностью < 0.2 мм (валидация требований п. 3.4), что предотвращает перекося механизма при синхронном подъеме.

Ультразвуковой дальномер HC-SR04 (рабочая частота 40 кГц, эффективный угол обзора 15°) установлен на подвижной каретке для реализации функции активного вертикального сканирования, что позволяет компенсировать недостатки стационарного размещения.

4.3 Метрологическое исследование характеристик ультразвуковой навигационной системы

Для обоснования алгоритмов управления, синтезированных в главе 3, необходимо экспериментально определить границы применимости ультразвуковых сенсоров HC-SR04 в динамических условиях. Эксперименты проводились на специализированном стенде (рисунок 4.8), позволяющем имитировать относительное движение робота и препятствия с контролируемой скоростью.

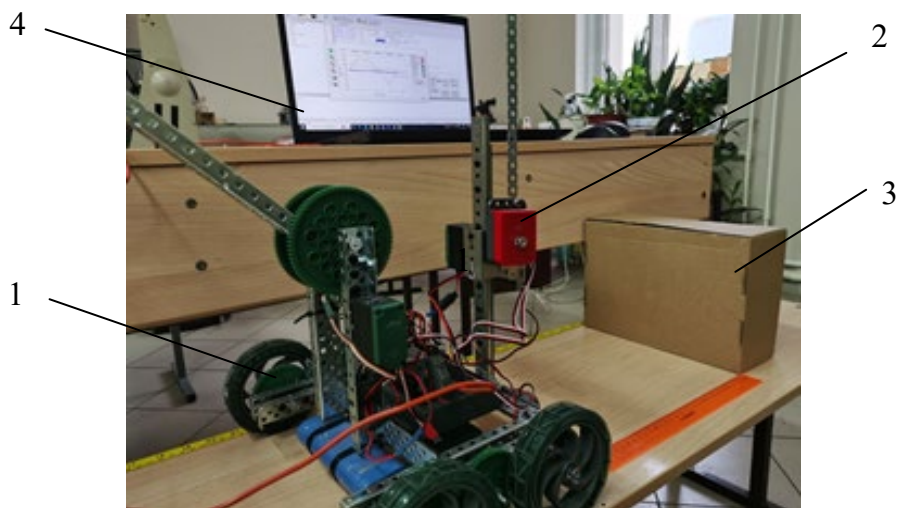


Рисунок 4.8 – Схема экспериментальной установки для исследования метрологических характеристик: 1 – мобильная платформа; 2 – датчик HC-SR04; 3 – сменное препятствие; 4 – модуль регистрации данных.

Для выявления границ применимости сенсора в движении проведена серия экспериментов с измерением фиксированных дистанций на различных скоростях [89-92]. Анализ полученных характеристик выявил сложный нелинейный характер зависимости погрешности от скорости и расстояния.

1. Ближняя и переходная зоны ($L = 20 \dots 300$ мм). На рисунках 4.9–4.11 представлены характеристики датчика на малых дистанциях: на дистанции 20 мм (рисунок 4.9) в зоне насыщения при скорости 60 мм/с наблюдаются критические выбросы ошибки; аналогичный характер зависимости наблюдается и на расстоянии 300 мм (рисунок 4.11), однако, степень нелинейности характеристики здесь гораздо меньше.

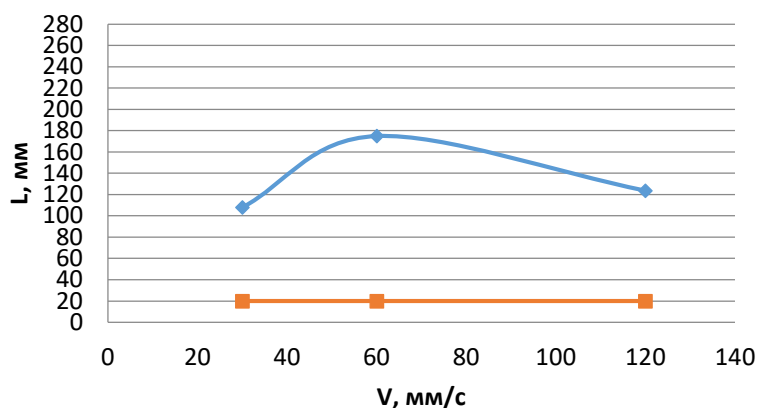


Рисунок 4.9 – Динамическая погрешность на дистанции 20 мм

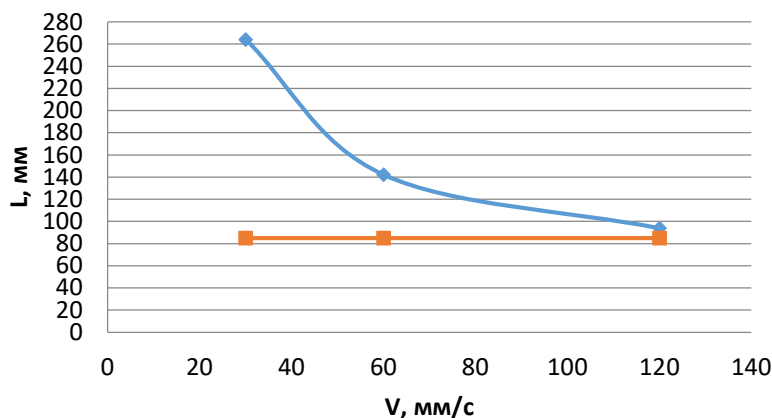


Рисунок 4.10 – Динамическая погрешность на дистанции 80 мм

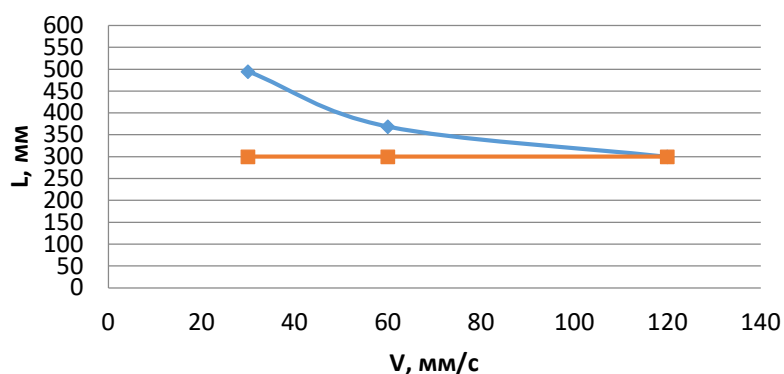


Рисунок 4.11 – Динамическая погрешность на дистанции 300 мм

Погрешность измерения на данной дистанции становится практически приемлемой на скоростях выше 60 мм/с. Это позволяет определить дистанцию 300 мм как нижнюю границу зоны уверенного детектирования в движении.

2. Рабочая зона ($L = 400 \dots 500$ мм) — инверсия погрешности. При дальнейшем увеличении расстояния измерения появляются специфические нелинейности в разных зонах скоростей: дистанция 400 мм (рисунок 4.12); дистанция 500 мм (рисунок 4.13).

Наибольшие погрешности наблюдаются на границах диапазона скоростей (минимальной и максимальной). В то же время, на средней скорости движения (60 мм/с) погрешность практически отсутствует.

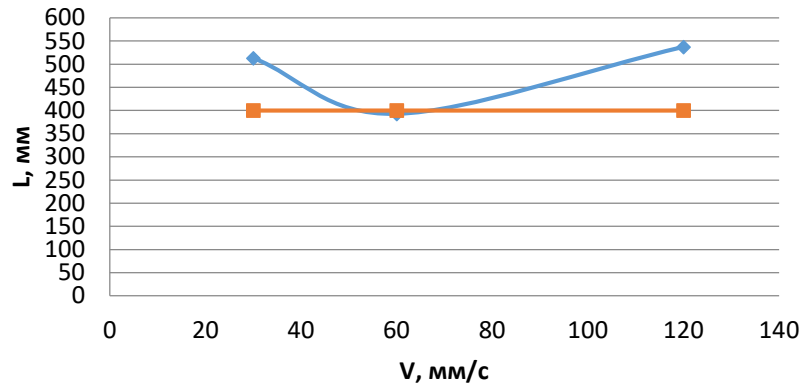


Рисунок 4.12 – Распределение погрешности на дистанции 400 мм

Здесь наблюдается обратная картина по сравнению с дистанцией 400 мм. Погрешность отсутствует на границах диапазона скоростей. На средних скоростях она достигает максимума в 50 мм. Относительная погрешность составляет порядка 10%. Несмотря на величину, данное отклонение можно считать приемлемым для своевременного определения момента начала реконфигурации робота.

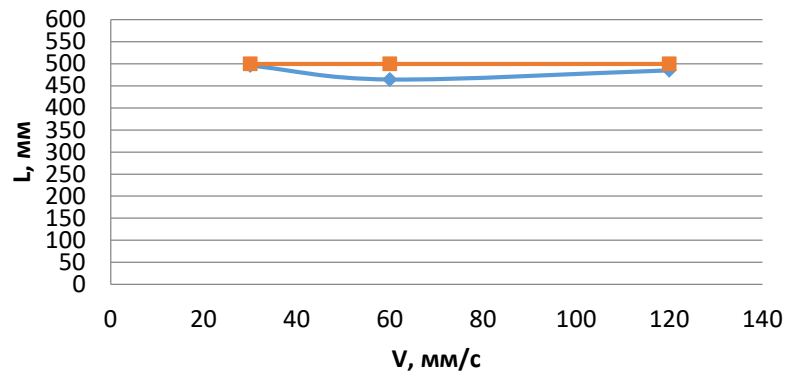


Рисунок 4.13 – Распределение погрешности на дистанции 500 мм

3. Дальняя зона ($L = 3000 \dots 4000$ мм) Характеристики на предельных дистанциях представлены на рисунках 4.8 и 4.9: дистанция 3000 мм (рисунок 4.14); дистанция 4000 мм (рисунок 4.15).

Динамическая характеристика на всем диапазоне скоростей практически совпадает со стационарной. Относительная погрешность измерения при этом стабильна и не превышает 1%.

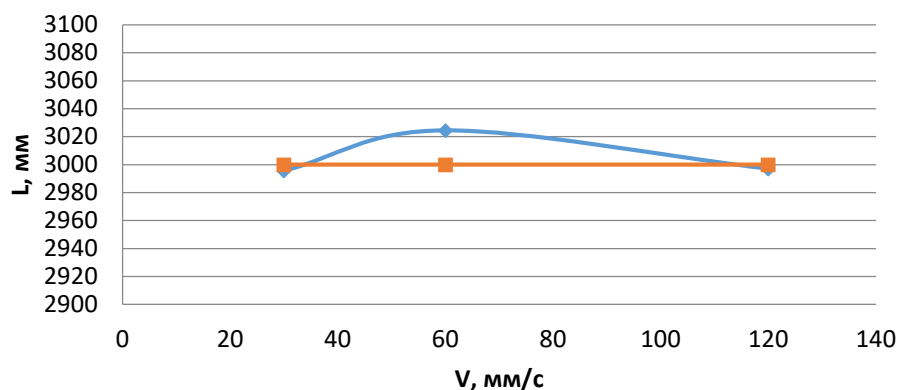


Рисунок 4.14 – Стабильная характеристика на дистанции 3000 мм

На заявленной границе диапазона измерений датчика максимальная относительная погрешность находится в районе 13% на малых скоростях. С увеличением скорости наблюдается тенденция к уменьшению ошибки, которая спадает до нуля около верхней границы скоростей. Таким образом, на данном предельном расстоянии для достижения наибольшей точности рекомендуется проводить измерения на скоростях порядка 100 мм/с.

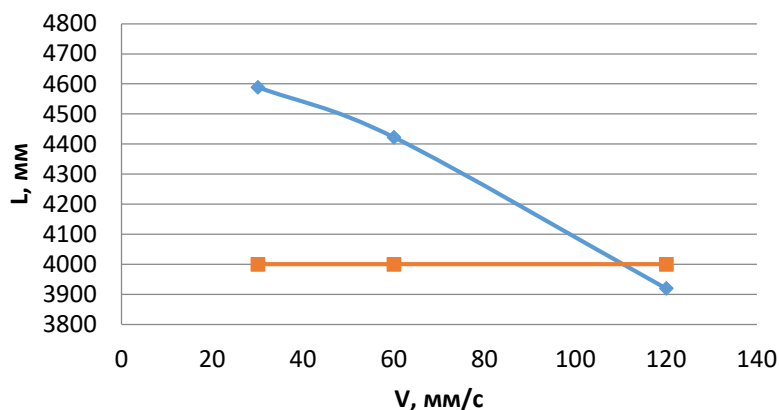


Рисунок 4.15 – Характеристика на предельной дистанции 4000 мм

Для обеспечения робастности системы управления исследовалась зависимость отклика датчика от материала и геометрии объекта. Влияние материала поверхности на результаты измерений показано на рисунке 4.16, где представлена сравнительная гистограмма для различных типов покрытий. Полученные данные свидетельствуют о том, что для твёрдых материалов, таких как стекло и кирпич, результаты оказываются близкими и отличаются незначительно. В то же время пористые материалы (например, картон) приводят к появлению устойчивого систематического смещения порядка -10 мм из-за частичного поглощения фронта звуковой волны. Для компенсации выявленного эффекта 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.

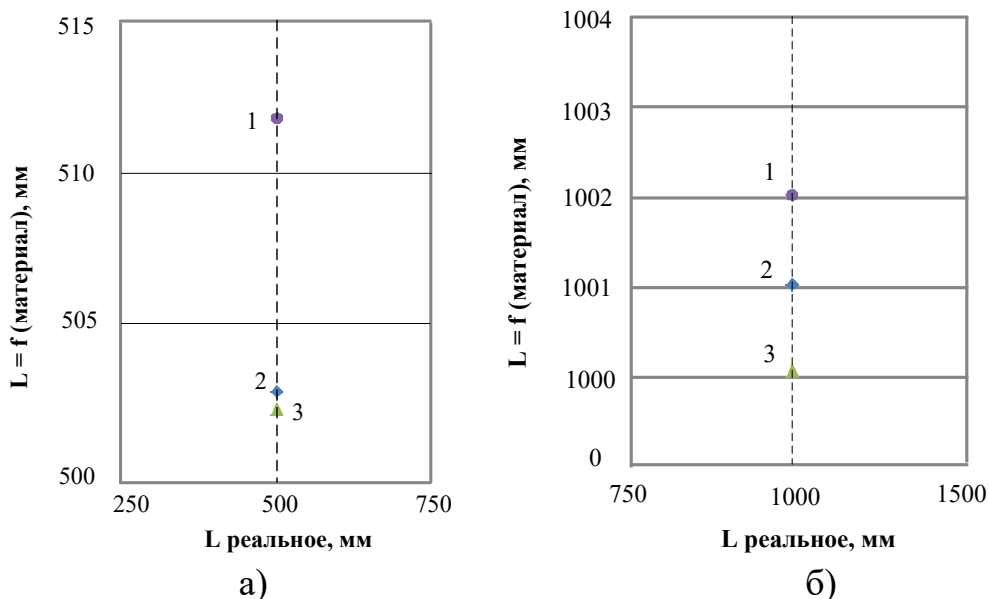


Рисунок 4.16 – Влияние коэффициента отражения материала на точность измерения:
1 – кирпич, 2 – стекло, 3 – картон

Для выявления влияния ширины препятствия на результаты измерения проведены сравнительные испытания на четырех различных значениях ширины препятствия (рисунок 4.17). При изменении расстояния до препятствия с дистанции 200 мм с уменьшением ширины препятствия абсолютная погрешность увеличивается до 7 мм. Таким образом, относительная погрешность в данном случае составляет 3,5 %. При изменении расстояния до препятствия абсолютная погрешность увеличивается также до 7 мм, но при всех значениях в сторону уменьшения результата относительно реального расстояния. Относительная погрешность в этом случае соответственно составляет менее 1,7 %, что позволяет сделать вывод о предпочтительном измерении параметров препятствия с данной дистанции. На основании полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности выполнения процедур сканирования и измерения параметров препятствия с дистанции 400 мм, так как данный режим обеспечивает более высокую метрологическую достоверность.

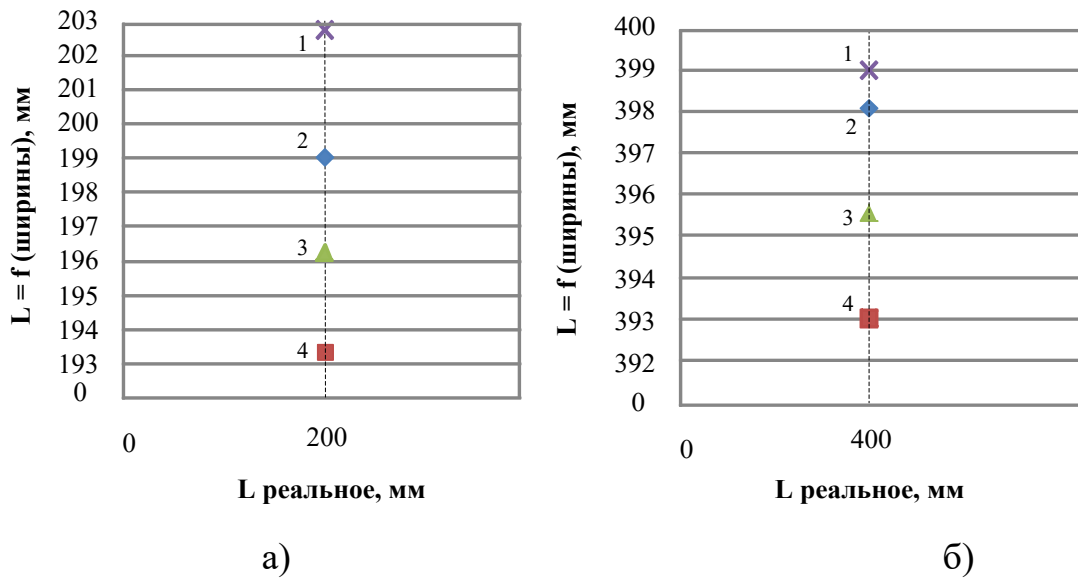
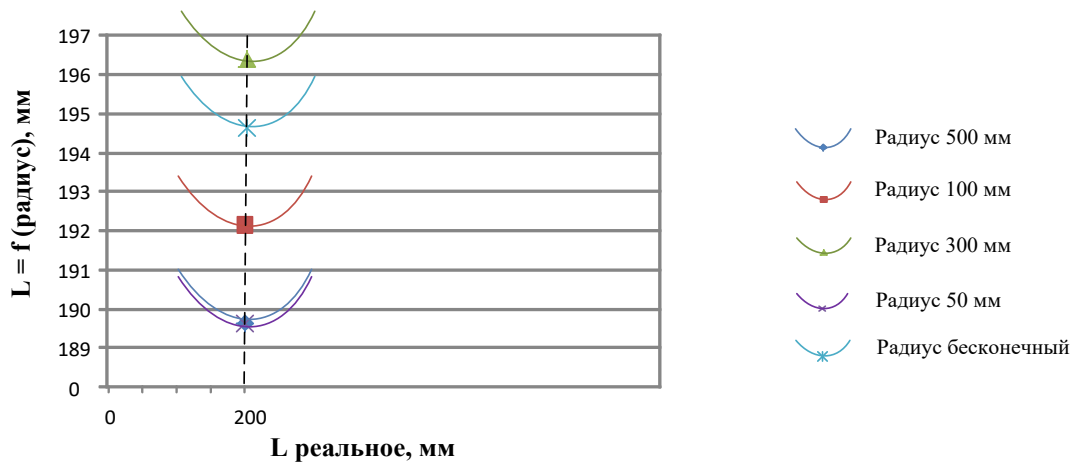
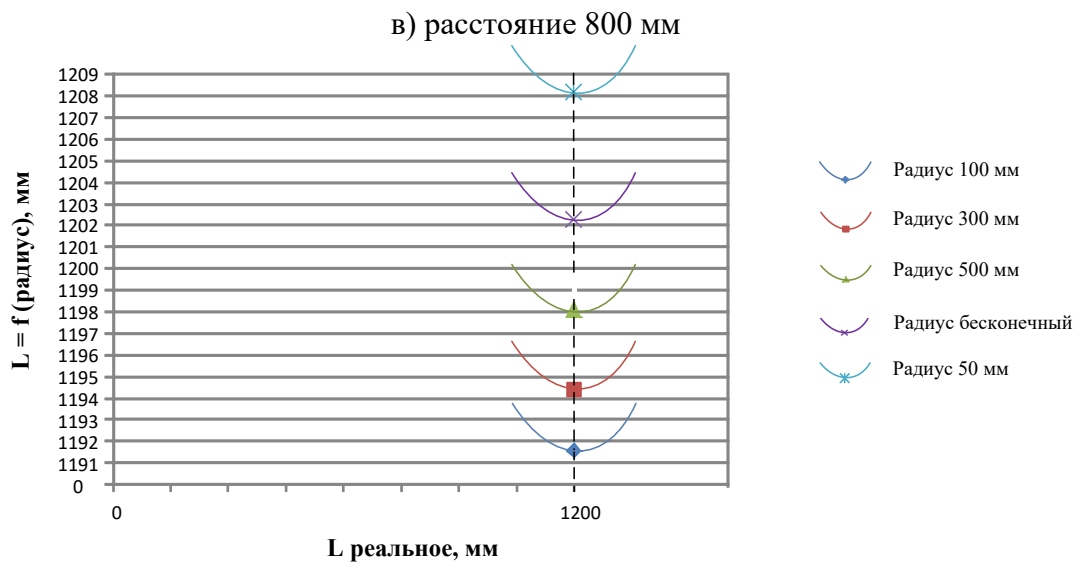
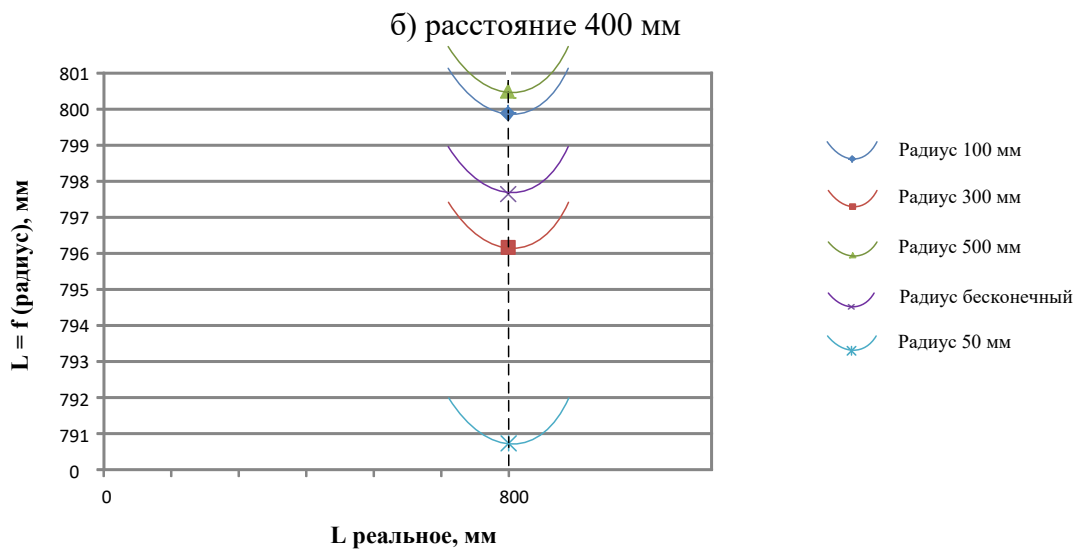
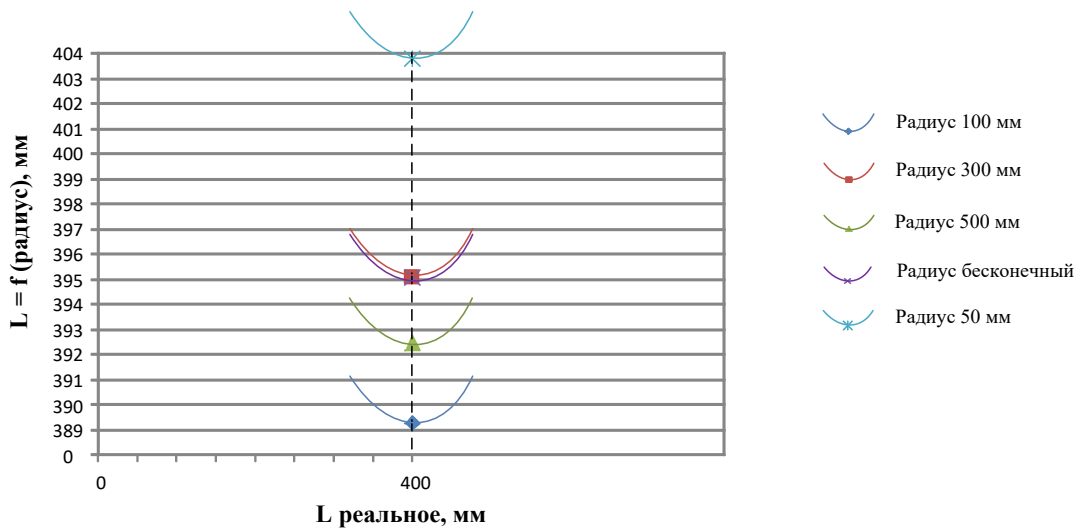


Рисунок 4.17 – Зависимость погрешности от ширины препятствия:
1 – 800 мм, 2 – 400 мм, 3 – 200 мм, 4 – 100 мм

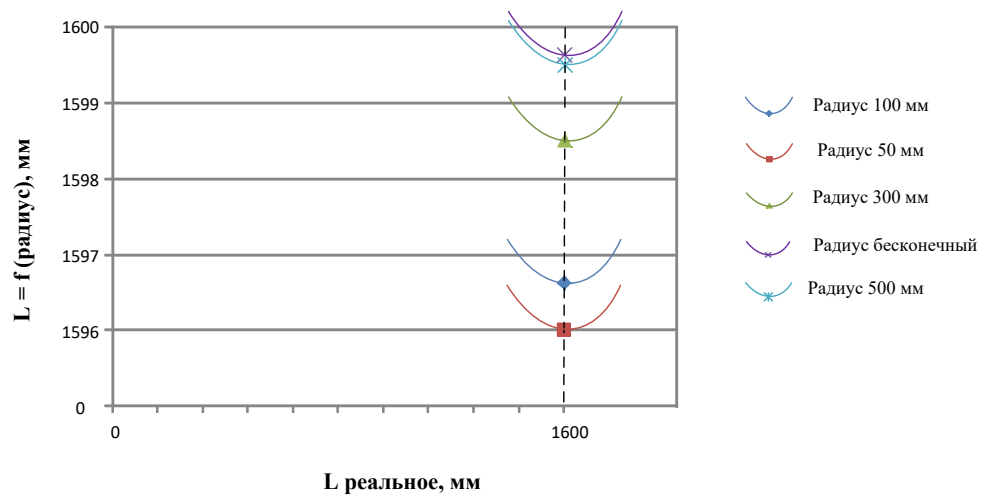
Серия экспериментов по оценке влияния формы препятствия на точность измерений проводилась для объектов с различными радиусами кривизны: 50, 100, 300, 500 мм, а также для плоской поверхности (бесконечный радиус). Характеристики, полученные для дистанций 200, 400, 800, 1200 и 1600 мм, представлены на графиках рисунка 4.18.



а) расстояние 200 мм



г) расстояние 1200 мм



д) расстояние 1600 мм

Рисунок 4.18 – Характеристики обнаружения препятствий сложной геометрической формы

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что кривизна поверхности оказывает существенное влияние на метрологические параметры системы: с уменьшением радиуса препятствия относительная погрешность измерения возрастает, достигая 5%. При этом выявлено, что оптимальной дистанцией до препятствия, обеспечивающей минимизацию погрешности измерений независимо от радиуса кривизны объекта, является диапазон около 1000 мм.

Вторым определяющим параметром для проведения реконфигурации робота, после расстояния до препятствия, является его высота. Точное знание этого параметра необходимо для расчета угла подъема рычагов φ_3 . Для исследования зависимости точности измерения высоты от дистанции сканирования были проведены эксперименты с препятствиями различной ширины.

На рисунке 4.19 представлен результат измерения высоты препятствия шириной 540 мм в зависимости от расстояния до него.

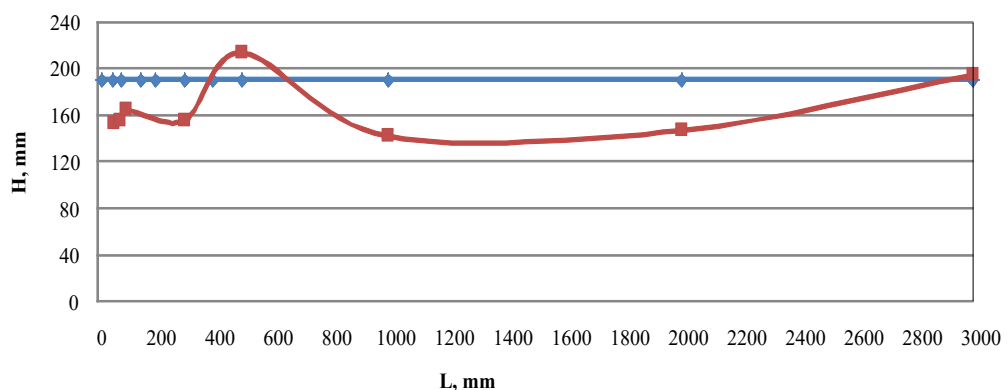


Рисунок 4.19 – Зависимость результатов измерения высоты препятствия от расстояния (ширина препятствия 540 мм)

Анализ экспериментальных данных показывает, что на расстояниях до 800 мм абсолютная погрешность измерения не превышает 30 мм, а относительная погрешность не превышает 4%. При этом характер погрешности носит нелинейный характер: в области около 500 мм наблюдается завышение измеренного значения высоты относительно реального, тогда как при дальнейшем увеличении расстояния (свыше 500 мм) измерения начинают занижаться, и величина ошибки постепенно уменьшается, стремясь к нулю к концу диапазона измерений. Результаты подтверждают, что для препятствий большой ширины используемый датчик обеспечивает приемлемую точность на дистанциях до 1 м.

При существенном уменьшении ширины препятствия (до 160–190 мм) картина кардинально меняется. Результаты представлены на рисунке 4.20.

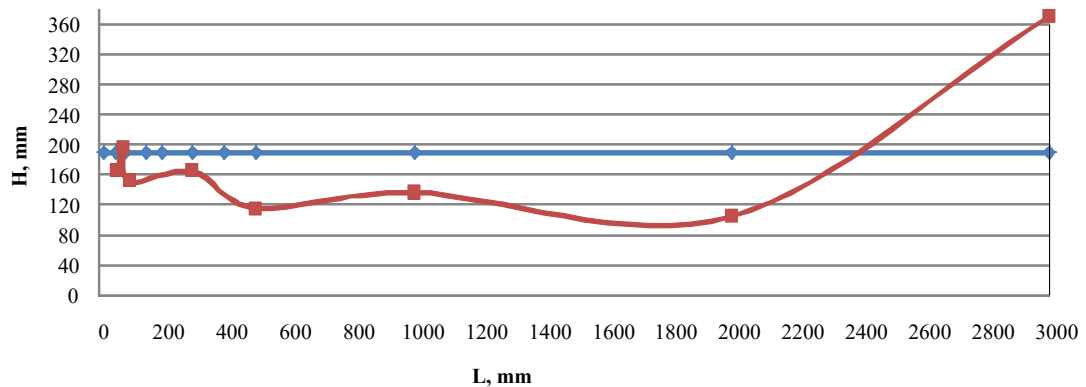


Рисунок 4.20 – Зависимость результатов измерения высоты препятствия от расстояния (ширина препятствия 160 мм)

График демонстрирует нестабильность показаний на дальних дистанциях. На расстояниях в районе 2000 мм и 2800 мм рабочая характеристика датчика имеет абсолютную погрешность около 50%. Столь значительные выбросы обусловлены тем, что узкое препятствие занимает малую часть диаграммы направленности датчика, и сигнал переотражается от пола или теряется. Такая погрешность является недопустимой для использования при расчёте параметров реконфигурации (риск удара шасси о препятствие).

На основе анализа рисунков 4.19 и 4.20 установлено граничное условие для алгоритма активного сканирования: для надежного определения высоты препятствий (в том числе узких) допустимая дистанция сканирования не должна превышать 300 мм. Это экспериментальное заключение легло в основу логики конечного автомата (FSM), реализованного в п. 4.4 робот: обязан приблизиться к

препятствию на дистанцию $D < 300$ мм, остановиться и только затем начать вертикальное сканирование.

4.4 Программная реализация системы управления и алгоритмов активного сканирования

На основе выявленных в п. 4.3 метрологических ограничений сенсоров разработана архитектура программного обеспечения, компенсирующая аппаратные недостатки за счет интеллектуальных алгоритмов обработки данных.

Программный комплекс реализован на языке C++ в среде Arduino IDE с использованием объектно-ориентированного подхода. Архитектура построена по иерархическому принципу:

1. Драйверный уровень (HAL): низкоуровневая работа с таймерами для генерации ШИМ и обработки прерываний энкодеров.
2. Модуль кинематики: реализация математических моделей из главы 2 (прямая и обратная задачи кинематики).
3. Модуль навигации: фильтрация данных УЗ-датчика и построение профиля препятствия.
4. Конечный автомат (FSM): верхнеуровневый менеджер состояний, координирующий работу всех подсистем.

Эксперименты п. 4.3 показали, что динамическая ошибка измерения дальности на скорости 60 мм/с может достигать 160 мм. Для устранения этого фактора был внедрен алгоритм «Stop-and-Scan» (Остановка-и-Сканирование) [101, 102].

Логика работы алгоритма:

1. Приближение: робот движется к препятствию до срабатывания порогового условия $D_{sensor} < 300$ мм. Данный порог выбран на основе анализа переходной зоны (п. 4.3, рисунок 4.12).
2. Стабилизация: производится полная остановка двигателей (PWM = 0) с задержкой 500 мс для гашения инерционных колебаний корпуса.
3. Вертикальное сканирование:

- Активируется привод каретки сенсора (рисунок 4.21).
- Датчик перемещается вверх с шагом 5 мм.
- Микроконтроллер фиксирует массив значений дистанции $D(h)$.

4. Детектирование края: высота препятствия H_{obs} определяется как координата h , при которой происходит скачкообразное изменение показаний датчика ($D(h) \gg D(h - 1)$), что означает выход луча выше препятствия.

Конструкция механизма активного вертикального сканирования для реализации алгоритма Stop-and-Scan представлена на рисунке 4.21.

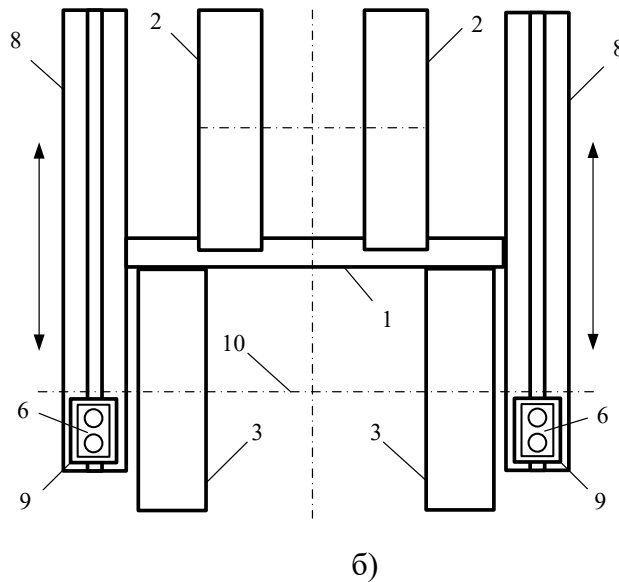
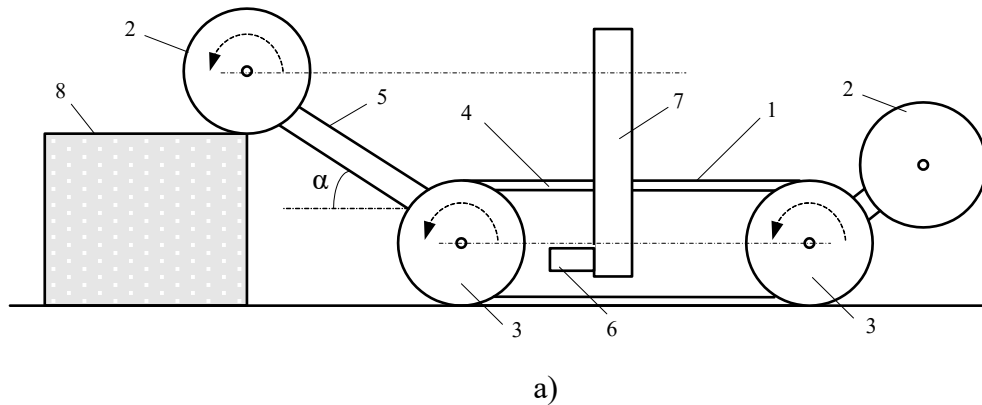


Рисунок 4.21 – Конструкция механизма активного вертикального сканирования для реализации алгоритма Stop-and-Scan: 1 – платформа, 2 – колесо колёсной группы, 3 – колесо гусеничной группы, 4 – гусеница, 5 – система рычагов, 6 – ультразвуковой датчик, 7 – приводной блок датчика, 8 – бесштоковый цилиндр, 9 – каретка цилиндра, 10 – продольная ось гусеничных групп.

Для подтверждения работоспособности разработанных алгоритмов управления и проверки адекватности математических моделей проведены экспериментальные исследования системы управления роботом.

Экспериментальные исследования направлены на оценку влияния дискретности датчиков и цифрового шума на качество управления, подбор параметров ПИД-регулятора для компенсации реальных физических возмущений (люфтов, несоосности и упругих деформаций), а также сопоставление телеметрии с результатами имитационного моделирования.

В качестве тестового воздействия подавался ступенчатый сигнал задания положения штока $L_{ref}=50$ мм. Регистрация параметров (текущая координата, скважность ШИМ, ток потребления) производилась в реальном времени через интерфейс UART с последующей обработкой в среде MATLAB. Настройка коэффициентов ПИД-регулятора осуществлялась комбинированным методом: начальные значения выбирались на основе симуляции (п. 3.4.3), а финальная корректировка производилась методом последовательного замыкания контуров (метод Циглера-Никольса).

Процесс настройки включал три последовательных этапа:

1. Обеспечение статической жесткости. Устанавливался расчетный коэффициент $K_p = 45$, при этом привод уверенно преодолевает зону нечувствительности. Время нарастания (t_{rise}) соответствует модели. Однако в реальной системе из-за наличия упругих деформаций в передаче наблюдалось перерегулирование $\sigma \approx 5\%$ и затухающие колебания, которые отсутствовали в жесткой математической модели.

2. Демпфирование колебаний. В контур вводилась дифференциальная составляющая K_d . При значении $K_d = 3.0$ колебания полностью устранены, переходный процесс приобрел апериодический характер. Эффективность демпфирования подтверждает гипотезу о возможности стабилизации системы с высоким усилением без потери быстродействия.

3. Компенсация остаточной ошибки. На финальном этапе анализировалась точность позиционирования. Без интегральной составляющей ($K_i = 0$) фиксировалась статическая ошибка $\delta_{st} \approx 0,3$ мм, что коррелирует с теоретическим расчетом п. 3.4.3 (0.18 мм), но несколько превышает его из-за механических люфтов. Введение малой интегральной составляющей $K_i = 0,15$ с ограничением

накопления позволило свести ошибку к нулю ($\delta_{st} \rightarrow 0$) за время $t < 0,5$ с после остановки вала.

Для подтверждения научной обоснованности предложенного подхода было выполнено сопоставление результатов имитационного моделирования в среде Simulink и данных экспериментальных исследований. Сводные данные представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сравнительный анализ характеристик системы

Параметр (Критерий качества)	Модель (Simulink)	Эксперимент (Prototype)	Абсолютное отклонение	Относительная погрешность
Коэффициенты ПИД	P=45, I=0, D=3	P=45, I=0.15, D=3	-	-
Время регулирования (t_{reg})	7,0 с	7,25 с	0.25 с	3,5%
Перерегулирование (σ)	0%	$\approx 1,5\%$ (шум)	-	-
Статическая ошибка (δ_{st})	0,18 мм	0,0 мм	-	-
Напряжение удержания (U_{hold})	8,0 В	$8,2 \pm 0.1$ В	0,2 В	2,5%

Следует отметить, что в имитационной модели интегральная составляющая была намеренно отключена для проверки теоретической зависимости ошибки от коэффициента усиления. В эксперименте K_i включен для полной компенсации ошибки.

Анализ результатов верификации показал следующее:

1. Расхождение во времени регулирования составляет менее 4%. Незначительное замедление реального прототипа (7,25 с против 7,0 с) объясняется падением напряжения на активном сопротивлении проводов и разъемов, а также нелинейностью КПД редуктора, которые не учитывались в модели.

2. Особый интерес представляет анализ напряжения в режиме удержания позиции (Holding Mode). Экспериментально зафиксировано, что для удержания нагрузки регулятор формирует напряжение $U \approx 8,2$ В. Это практически совпадает с модельным значением (8,0 В). Данный факт подтверждает правильность идентификации параметров гравитационной нагрузки и сил сухого трения. Модель адекватно описывает энергетический баланс системы.

3. На экспериментальных графиках наблюдается высокочастотный шум амплитудой до 1,5%, обусловленный дискретизацией сигнала энкодера. Однако благодаря стабильной частоте опроса (50 Гц) и инерционности двигателя, данный шум не сказывается на плавности движения механизма.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили работоспособность предложенной стратегии управления в режиме насыщения по напряжению. Достигнутая точность позиционирования (абсолютная погрешность $< 0,1$ мм) и сходимость с математической моделью (погрешность $< 5\%$) позволяют рекомендовать разработанные алгоритмы для внедрения в систему управления мобильным роботом.

4.5 Экспериментальные исследования и верификация характеристик робота

Завершающим этапом работы стала проверка функционирования интегрированной системы (механика + сенсорика + управление) в реальных условиях эксплуатации [98, 103]. В качестве тестового сценария была выбрана задача автономного преодоления вертикального препятствия (ступени) высотой 150 мм. Данная высота является типовой для городской среды и требует полной реализации кинематического потенциала механизма (ход штока 50 мм).

Робот двигался в полностью автономном режиме под управлением конечного автомата (FSM), описанного в п. 4.4. Программа для реализации управляющих алгоритмов приведена в Приложении 1. Процесс преодоления препятствия зафиксирован на серии кадров:

Этап 1. Обнаружение и сканирование (States: SEARCH \rightarrow SCAN). Робот обнаружил препятствие на дистанции 200 мм и выполнил остановку, после чего был активирован механизм вертикального сканирования (рисунок 4.22). В результате система построила профиль препятствия и определила высоту $H_{obs} = 150$ мм . Ошибка измерения составила $\Delta H = \pm 2$ мм , что подтверждает эффективность алгоритма «Stop-and-Scan».

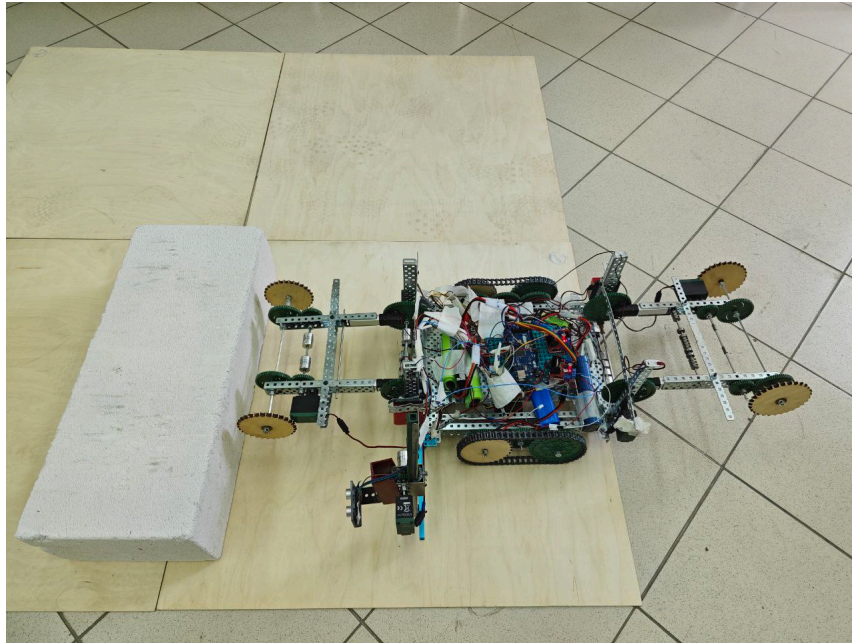
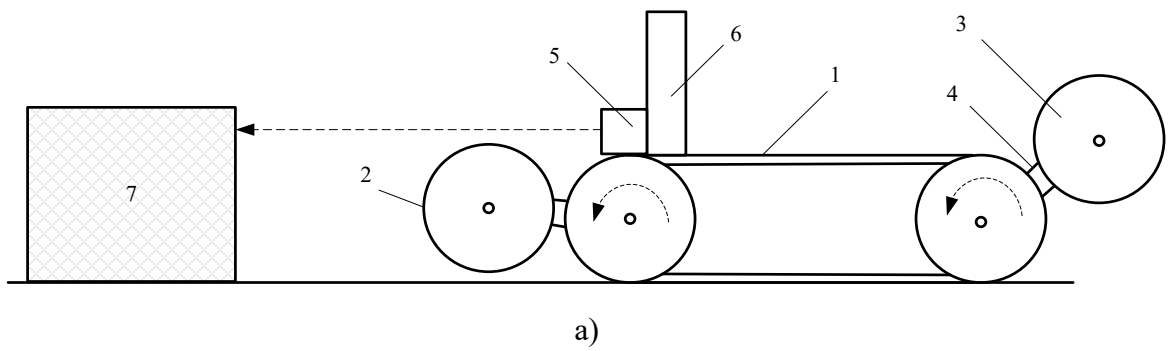


Рисунок 4.22 – Фаза сканирования: определение высоты препятствия

Этап 2. Реконфигурация и стабилизация (States: RECONF → STABILIZE). Контроллер рассчитал необходимый угол атаки φ_3 и запустил процесс трансформации. Управляющее воздействие включало синхронное выдвижение штоков линейных приводов и выдвижение задних телескопических опор (рисунок 4.23). В результате использование телескопических опор позволило сместить точку опоры назад, компенсируя смещение центра масс при подъеме (проблема, выявленная при моделировании в главе 2). Это предотвратило опрокидывание робота.

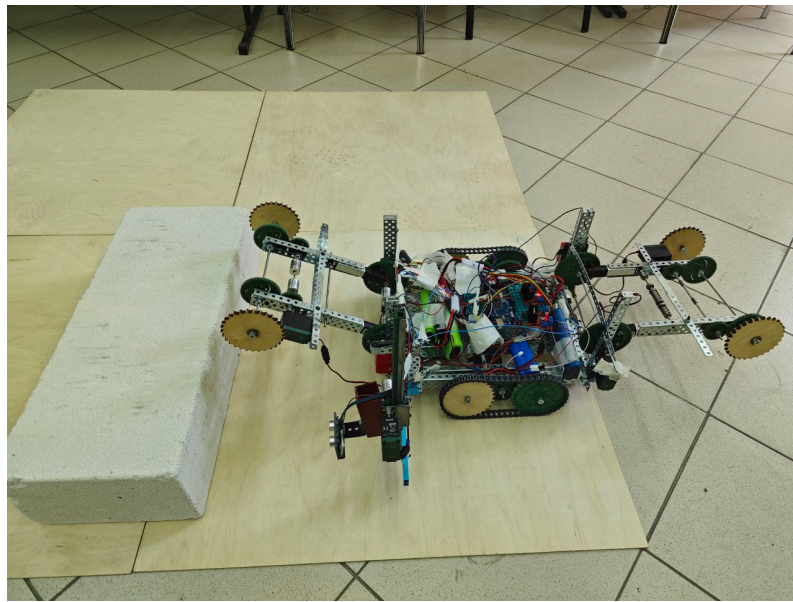
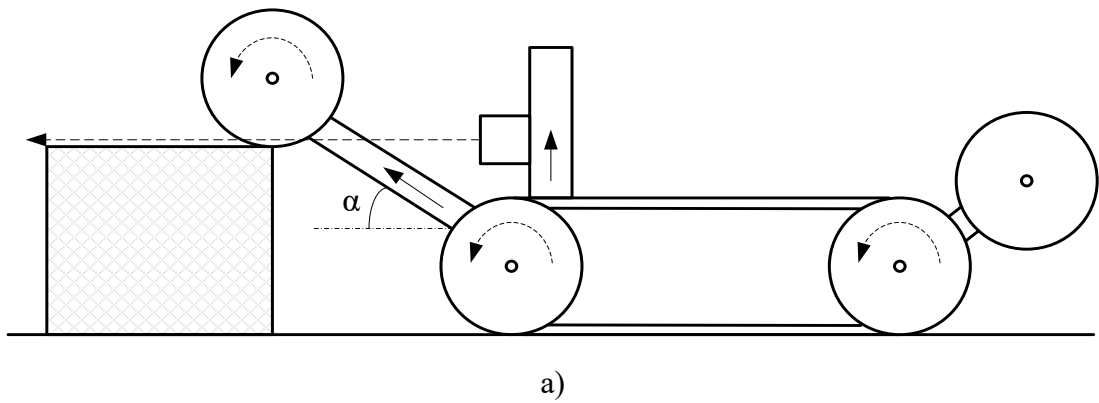
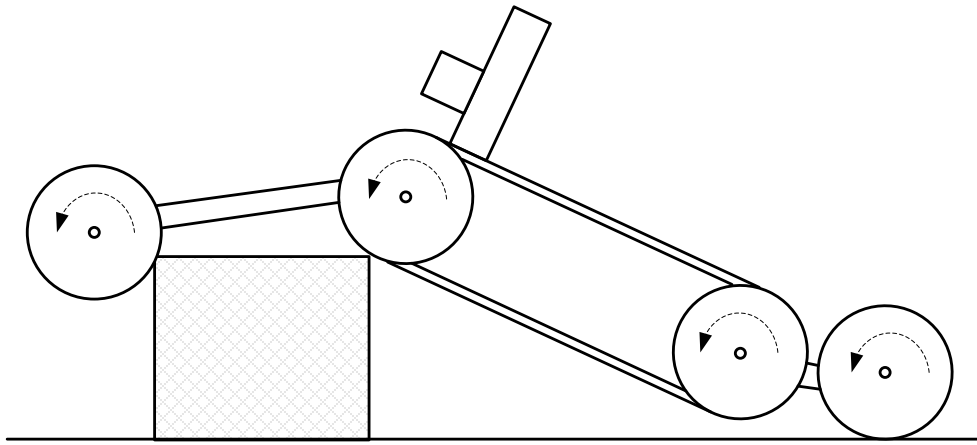
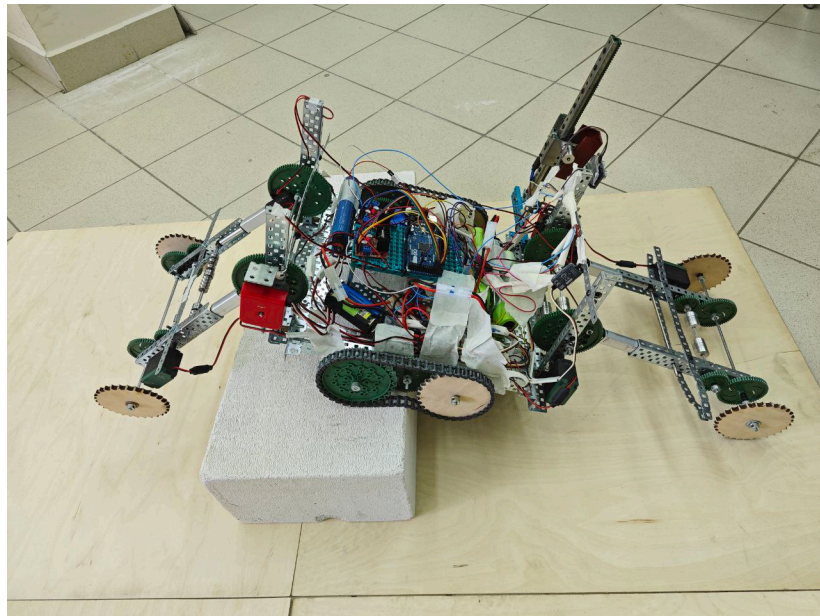


Рисунок 4.23 – Активация системы реконфигурация (телескопические опоры)

Этап 3. Преодоление и фиксация (States: CROSS \rightarrow HOLD). Робот, используя комбинированную тягу гусениц и колес, заехал на препятствие, рычаги переведены в крайнее верхнее положение (рисунок 4.24). В результате робот успешно занял позицию на препятствии. Визуальный контроль подтвердил, что поворотные рычаги вошли в контакт с механическими упорами.



а)



б)

Рисунок 4.24 –Фаза преодоления препятствия и фиксации положения

Так как одной из ключевых целей диссертации является создание энергоэффективного механизма, то в фазе фиксации робота на препятствии (рисунок 4.24) исследованы электрические параметры приводов.

В расчетном режиме без блокировки для удержания веса робота на рычагах без упоров потребовалось бы напряжение $U \approx 12$ В и ток $I \approx 2,5$ А . В экспериментальном режиме с блокировкой, после того как рычаги встали на упоры (сингулярная конфигурация), система управления снизила напряжение (PWM). Минимальное напряжение, достаточное для удержания контакта с упором, составило $U_{hold} = 8,2$ В. Ток потребления снизился до $I_{hold} \approx 0,4$ А.

Таким образом, эксперимент подтвердил теоретические расчёты, приведенные в главе 3, когда прогнозировалось напряжение 8 В. Использование механической блокировки позволяет снизить энергопотребление в статическом режиме более чем в 6 раз, что существенно увеличивает автономность робота.

В процессе преодоления препятствия конструкция робота испытывала пиковые нагрузки (изгибающие моменты на раму), поэтому дополнительно была выполнена проверка жёсткости. Благодаря использованию рамы из нержавеющей стали, деформации основания отсутствовали. Рассогласование энкодеров левого и правого борта в процессе подъема не превышало 5 импульсов ($< 1^\circ$), что говорит об отсутствии перекосов ("винта") рамы. Гибридная схема (гусеницы + колеса) обеспечила уверенное сцепление с бетонной поверхностью ступени. Пробуксовки в момент заезда не зафиксировано.

Сравнительный анализ полученных энергетических характеристик (снижение тока потребления в 6 раз в режиме блокировки) демонстрирует корреляцию с результатами, достигнутыми для аналогичных трансформируемых платформ в работах Hirose [104] и Dubowsky [105]. При этом экспериментально подтверждено, что разработанная методика испытаний и полученные метрики надежности полностью соответствуют требованиям национального стандарта ГОСТ Р 60.6.3.1-2019 Роботы и робототехнические устройства [106].

Выводы по главе

1. Выявлены зоны динамической неустойчивости УЗ-датчика (при $V = 60$ мм/с ошибка до 160 мм). Экспериментально доказана необходимость и эффективность алгоритма «Stop-and-Scan», обеспечивающего точность измерения высоты ± 2 мм.

2. Разработанный конечный автомат (FSM) успешно координирует работу сенсоров и приводов, обеспечивая автономное принятие решений. Алгоритм синхронизации приводов (Cross-Coupling) компенсирует механические люфты, удерживая перекося рамы в пределах 1° .

3. Экспериментальные исследования системы управления роботом доказали, что введение малой интегральной составляющей ($K_i = 0,15$) в дополнение к высокому пропорциональному усилению позволяет полностью устранить остаточную статическую ошибку ($\delta_{st} \rightarrow 0$). Система обеспечивает субмиллиметровую точность реконфигурации, достаточную для преодоления лестничных маршей и сложных препятствий.

4. Экспериментальные исследования подтвердили, что механизм геометрической блокировки (упоры + сингулярность) эффективно функционирует, позволяя удерживать робота при напряжении 8,2 В (вместо номинальных 12 В). Биметаллическая конструкция (сталь/алюминий) обеспечила необходимую жесткость системы для безопасной работы телескопических опор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача создания мобильного реконфигурируемого робота с адаптивной системой управления, способного эффективно функционировать в условиях сложного рельефа при минимизации энергопотребления.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

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. Предложен метод параметрического синтеза параметров 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.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hannah L., Dimitrios A. Validation of two reconfigurable wheel-track testbeds for military vehicles // *Journal of Terramechanics*. – 2021. – Vol. 98. – P. 34–41.
2. Reconfigurable wheel-track for all-terrain mobility: pat. WO2020223298 (PCT). – Publ. 05.11.2020.
3. Артемьев А. В., Гайдук В. Д., Пичахчи С. В., Шаманов Д. В., Шевелёв А. М. Мобильное колесно-гусеничное шасси автономного робототехнического комплекса: пат. RU 2784975 С1, МПК В62D55/04, В25J5/00; патентообладатель: Артемьев А. В. – Оpubл. 01.12.2022.
4. Liu C., Wang J., Liu J., et al. Actual research technology and perspective of reconfigurable wheel-tracked locomotion systems for ground mobile platforms // *Transactions of Beijing Institute of Technology*. – 2024. – Vol. 44, No. 6. – P. 553–564.
5. Kislassi T., Zarrouk D. A minimally actuated reconfigurable continuous track robot // *IEEE Robotics and Automation Letters*. – 2020. – Vol. 5, No. 3. – P. 652–659.
6. Xuan C., Lu J., Tian Z., et al. Novel design of reconfigurable tracked robot with geometry-changing tracks // *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2024) (Abu Dhabi, UAE, 14–18 Oct. 2024)*. – Piscataway, NJ: IEEE, 2024. – P. 10953–10960.
7. Wang H., Wang T., Chen J., et al. Design and locomotion analysis of an arm-wheel-track multimodal mobile robot // *Intelligent Service Robotics*. – 2023. – Vol. 16. – P. 485–495.
8. Drew D. S. Multi-agent systems for search and rescue applications // *Current Robotics Reports*. – 2021. – Vol. 2, No. 2. – P. 189–200.
9. Williams A., Sebastian B., Ben-Tzvi P. Review and analysis of search, extraction, evacuation, and medical field treatment robots // *Applied Mechanics Reviews*. – 2019. – Vol. 96. – P. 401–418.
10. Ugenti A., Galati R., Mantriota G., Reina G. Analysis of an all-terrain tracked robot with innovative suspension system // *Mechanism and Machine Theory*. – 2023. – Vol. 182. – Art. 105237.

11. Kim J. H., Kim J. W., Lee D. Mobile robot with passively articulated driving tracks for high terrainability and maneuverability on unstructured rough terrain: design, analysis, and performance evaluation // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2018. – Vol. 32, No. 11. – P. 5389–5400.
12. Chitikena H., Sanfilippo F., Ma S. Robotics in search and rescue (SAR) operations: an ethical and design perspective framework for response phase // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 13. – Art. 1800.
13. Thaker R. K. Robotics in disaster management: AI-driven rescue, aerial mapping, and emerging IoT applications for effective response // *IJIRMPS*. – 2024. – Vol. 12, Iss. 6. – Art. 2406231435.
14. Abadi B. N. R., West A., Peel H., et al. CARMA II: a ground vehicle for autonomous surveying of alpha, beta and gamma radiation // *Frontiers in Robotics and AI*. – 2023. – Vol. 10.
15. Huang Y., Shi X., Zhou Y., Xiong Z. Autonomous navigation of mobile robot in radiation environment with uneven terrain // *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*. – 2023. – Vol. 7. – P. 497–509.
16. Rubio F., Valero F., Llopis-Albert C. A review of mobile robots: concepts, methods, theoretical framework, and applications // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2019. – Vol. 16, No. 2.
17. Ge L., Sadhu A. Deep learning-enhanced smart ground robotic system for automated structural damage inspection and mapping // *Automation in Construction*. – 2025. – Vol. 170. – Art. 105951.
18. Ulloa C. C., Torres Llerena G., Barrientos A., del Cerro J. Autonomous 3D thermal mapping of disaster environments for victims detection // *Robot Operating System (ROS): The Complete Reference*. Vol. 7 / ed. A. Koubaa. – Cham: Springer, 2023. – (Studies in Computational Intelligence; Vol. 1051). – P. 83–117.
19. Schwaiger S., Muster L., Novotny G., et al. Semi-autonomous mobile search and rescue robot for radiation disaster scenarios [Электронный ресурс] // *arXiv*. – 2024. – arXiv:2406.14385. – URL: <https://arxiv.org/abs/2406.14385> (дата обращения: 17.02.2026).

20. Gao X., Guan X., Yang Y., Zhang J. Design and ground performance evaluation of a multi-joint wheel-track composite mobile robot for enhanced terrain adaptability // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, No. 12. – Art. 7270.
21. Zhang F., Yu Y., Wang Q., Zeng X. Y. Physics-driven locomotion planning method for a planar closed-loop terrain-adaptive robot // *Mechanism and Machine Theory*. – 2021. – Vol. 162. – Art. 104353.
22. Li H., Xie Z., Cao Y., Zhang R., Qin J. Design and analysis of a mobile robot with transformable wheel-legged mechanism // *Journal of Mechanisms and Robotics*. – 2025. – Vol. 17, No. 6. – Art. 061015.
23. Cabrol N. A., Wettergreen D., Gaskin T., et al. Atacama Desert Trek: the 1999 Nomad rover field experiment // *Journal of Geophysical Research: Planets*. – 2001. – Vol. 106, No. E4. – P. 7759–7777.
24. Rollins E., Luntz J., Shamah B., Whittaker W. NOMAD: a demonstration of the transforming chassis // *IFAC Proceedings Volumes*. – 1998. – Vol. 31, No. 2. – P. 211–216.
25. Datar A., Pan C., Nazeri M., Xiao X. Toward wheeled mobility on vertically challenging terrain: platforms, datasets, and algorithms [Электронный ресурс] // *arXiv*. – 2023. – arXiv:2303.00998. – URL: <https://arxiv.org/abs/2303.00998> (дата обращения: 18.02.2026).
26. Zhang B., Li G., Zheng Q., et al. Path planning for wheeled mobile robot in partially known uneven terrain // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, No. 14. – Art. 5217.
27. Cosenza C., Niola V., Pagano S., Savino S. Theoretical study on a modified rocker-bogie suspension for robotic rovers // *Robotica*. – 2023. – Vol. 41, No. 10. – P. 2915–2940.
28. Zhang Minglu, Li Min, Tian Ying, et al. Design and parameter analysis of wheel-track composite passive adaptive robot // *Mechanical Science and Technology*. – 2019. – Vol. 38, No. 2. – P. 198–204.
29. Siegwart R., Lamon P., Estier T., Lauria M., Piguet R. Innovative design for wheeled locomotion in rough terrain // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2002. – Vol. 40, No. 2–3. – P. 151–162.

30. Estier T., Piguet R., Eichhorn R., Siegwart R. Shrimp, a rover architecture for long range Martian mission // Proceedings of the Sixth ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation (ASTRA) (Noordwijk, Netherlands, 5–7 Dec. 2000) [Электронный ресурс]. – URL: <http://hdl.handle.net/20.500.11850/82102> (дата обращения: 18.02.2026).

31. Pan D., Jia Y., Yuan B. F., et al. Design and verification of the active suspension mobility system of the Zhurong Mars rover // SCIENTIA SINICA Technologica. – 2022. – Vol. 52, No. 2. – P. 278–291.

32. Liu Y., Qi Y., Pan D., et al. Gradeability of ‘Zhu Rong’ Mars rover based on the simulated Martian terrain // Journal of Terramechanics. – 2023. – Vol. 106. – P. 57–73.

33. «КАПИТАН» — малогабаритный робототехнический комплекс (МРК) [Электронный ресурс]. – URL: <https://rtc.ru/solution/kapitan/> (дата обращения: 01.02.2026).

34. «КУРСАНТ» — малогабаритная разведывательная платформа (МРП) [Электронный ресурс]. – URL: <https://rtc.ru/solution/kursant/> (дата обращения: 01.02.2026).

35. Bai R., Niu R., Liang H. et al. Motion planning and performance analysis of a novel six-tracked robot // 2021 IEEE International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering: Proceedings. – Wuhan, China: IEEE, 2021. – P. 299–305.

36. Yamauchi B. M. PackBot: a versatile platform for military robotics // Unmanned Ground Vehicle Technology VI: Proc. of SPIE. – 2004. – Vol. 5422. – P. 228–237.

37. Wells P., Deguire D. TALON: a universal unmanned ground vehicle platform, enabling the mission to be the focus // Unmanned Ground Vehicle Technology VII: Proc. of SPIE. – 2005. – Vol. 5804. – P. 747–757.

38. Peraton Remotec. Keeping danger at a distance: product catalog [Электронный ресурс]. – Peraton, 2023. – 40 p. – URL: https://www.peraton.com/wp-content/uploads/1223_Remotec_ProductCatalog_v5_dig.pdf (дата обращения: 18.02.2026).

39. Rachkov M. Modelling of demining manipulator optimal functioning // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. – 2019. – Vol. 20, No. 5. – P. 280–290.
40. Sun S., Huang H., Li C. Advancements in humanoid robot dynamics and learning-based locomotion control methods // *Intelligence & Robotics*. – 2025. – Vol. 5, No. 3. – P. 631–660.
41. Mikołajczyk T., Mikołajewski D., Kłodowski A., et al. Energy sources of mobile robot power systems: a systematic review and comparison of efficiency // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, No. 13. – Art. 7547.
42. Boston Dynamics. Atlas humanoid robot [Электронный ресурс]. – URL: <https://bostondynamics.com/products/atlas/> (дата обращения: 18.02.2026).
43. Xie Xia, Zhang Xueling, Duan Xiubing, et al. Research on obstacle-surmounting performance of wheel-track vehicle chassis // *Transactions of Beijing Institute of Technology*. – 2018. – Vol. 38, Suppl. 1. – P. 107–111.
44. Reconfigurable wheel-track for all-terrain mobility: pat. WO2020223295 A1 (PCT), IPC B62D55/04; applicant/assignee: Carnegie Mellon University; international application PCT/US2020/030392. – Publ. 05.11.2020.
45. Wang J., Liu C., Wei W., Yan Q. Review on the reconfigurable wheel-tracked system // *Proceedings of the 11th Asia-Pacific Regional Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems (ISTVS 2022)*. – 2022. – Paper 0861.– URL: <https://2022.istvs.org/papers/0861> (дата обращения: 18.02.2026).
46. Luo Z., Shang J., Wei G., Ren L. Reconfigurable hybrid wheel-track mobile robot based on Watt II six-bar linkage // *Mechanism and Machine Theory*. – 2018. – Vol. 128. – P. 16–32.
47. Tang Y., Xu X., Zhang L., et al. Structure Design and Configuration Optimization of the Reconfigurable Deformed Tracked Wheel based on Terramechanics Characteristics // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2023. – Vol. 108. – Art. 7.
48. Zhang K., Sun X., Li R., et al. A linkage-type self-adaptive deformable tracked mechanism based on the six-bar mechanism // *Mechanical Sciences*. – 2024. – Vol. 15. – P. 541–553.

49. Park I., Yoon H., Kim S., et al. Review on Transformable Wheel: Mechanism Classification and Analysis According to Mechanical Complexity // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2025. – Vol. 26. – P. 737–755.

50. Nourizadeh P., Stevens McFadden F. J., Browne W. N. In situ slip estimation for mobile robots in outdoor environments // Journal of Field Robotics. – 2023. – Vol. 40, No. 3. – P. 467–482.

51. Teji M. D., Zou T., Zeleke D. S. A survey of off-road mobile robots: slippage estimation, robot control, and sensing technology // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2023. – Vol. 109. – Art. 38.

52. Dai M., Lu Z., Li N., Wang Y. Enhanced agility and safety in mobile manipulators through centroidal momentum-based motion planning // Proceedings of the European Control Conference (ECC). – 2025. – URL: <https://shadow.merl.com/publications/TR2025-092> (дата обращения: 18.02.2026).

53. Li X., Gu Y., Wu L., Sun Q., Song T. Time and energy optimal trajectory planning of wheeled mobile dual-arm robot based on tip-over stability constraint // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, No. 6. – Art. 3780.

54. Korayem M. H., Safarwali M., Yousefi Lademakhi N. Adaptive robust control with slipping parameters estimation based on intelligent learning for wheeled mobile robot // ISA Transactions. – 2024. – Vol. 147. – P. 577–589.

55. Rachkov M., Emelyanov A., Kolot V. Reconfigurable autonomous wheel-tracked robot // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): Proceedings. – 2019. – P. 1–5.

56. FLIR Defense. PackBot 510 [Электронный ресурс]. – URL: <https://defense.flir.com/defense-products/packbot-510/?segment=uis&vertical=ugs> (дата обращения: 18.02.2026).

57. Prados C., Hernando M., Gamba E., Brunete A. A review and evaluation of control architectures for modular legged and climbing robots // Biomimetics. – 2024. – Vol. 9, No. 6. – Art. 319.

58. Schrick M., Hinckeldeyn J., Thiel M., Kreutzfeldt J. A microservice based control architecture for mobile robots in safety-critical applications // Robotics and Autonomous Systems. – 2025. – Vol. 183. – Art. 104795.

59. Wang Z., Wang S., Xie Y., Xiong T., Wang C. Autonomous Navigation of Mobile Robots: A Hierarchical Planning–Control Framework with Integrated DWA and MPC // *Sensors*. – 2025. – Vol. 25, No. 7. – Art. 2014. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/7/2014> (дата обращения: 18.02.2026).

60. Andreev V., Kim V., Pryanichnikov V. A hierarchical modular architecture for reconfigurable mobile robots // *Proceedings of the 30th International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*. – Zadar, Croatia: DAAAM International, 2019. – P. 1152–1159.

61. Андреев В. П., Ким В. Л., Эприков С. Р. Аппаратно-программный фреймворк для разработки модульных мобильных роботов с иерархической архитектурой // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2020. – № 1. – С. 199–218.

62. Andreev V., Kim V., Eprikov S. ModRob: the hardware-software framework for modular mobile robots prototyping // *Proceedings of the 31st DAAAM International Virtual Symposium*. – Mostar, BiH: DAAAM International, 2020. – P. 0391–0402.

63. Topalović N., Garai J. P., Giancarlo D., Matheson E. A modular approach to motor control: the CANopenDrivers library // *Mechanisms and Machine Science*. – Vol. 190. – P. 466–473.

64. Андреев В. П., Плетенев П. Ф. Метод информационного взаимодействия для систем распределённого управления в роботах с модульной архитектурой // *Труды СПИИРАН*. – 2018. – № 2(57). – С. 134–160.

65. González-Santamarta M. Á., Rodríguez-Lera F. J., Fernández-Llamas C., Matellan-Olivera V. A hybrid cognitive architecture to generate, control, plan, and monitor behaviors for interactive autonomous robots // *International Journal of Social Robotics*. – 2025. – Vol. 17. – P. 3135–3151.

66. Iovino M., Scukins E., Styruđ J., Ögren P., Smith C. A survey of behavior trees in robotics and AI // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2022. – Vol. 154. – Art. 104096.

67. Duc L. T., Ho Sy P., Phan Van D., et al. Observer-based hybrid PID control for trajectory tracking of wheeled mobile robot subject to disturbances // *Advances in Information and Communication Technology (ICTA 2024) // Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2025. – Vol. 1205. – P. 566–574.

68. García-Hernández J. C., Gonzalez-Villela V. J., Souza-Jimenez J. A., Meda-Campaña J. A. Tip-over stability estimation and simulation of a manipulator using the mean normal ground reaction criterion // *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*. – 2025. – Vol. 9. – P. 1154–1172.

69. Toledo Fuentes A., Kempf F., Kipfmüller M., et al. Tip-over detection and avoidance algorithms as stabilization strategy for small-footprint and lightweight mobile manipulators // *Machines*. – 2023. – Vol. 11, No. 1. – Art. 44.

70. Jang M., Kim S., Yoo B., Oh K. Robust path tracking controller for autonomous mobility with control delay compensation using backstepping control // *Actuators*. – 2024. – Vol. 13, No. 12. – Art. 508.

71. Ye Y., Nie Z., Liu X., et al. ROS2 real-time performance optimization and evaluation // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2023. – Vol. 36. – Art. 144.

72. Pankert J., Valsecchi G., Baret D., et al. Design and motion planning for a reconfigurable robotic base [Электронный ресурс] // *arXiv*. – 2023. – arXiv:2206.15298v3. – URL: <https://arxiv.org/abs/2206.15298> (дата обращения: 18.02.2026).

73. Zhao Z., Xie P., Meng M. Q.-H. ODD: Omni differential drive for simultaneous reconfiguration and omnidirectional mobility of wheeled robots [Электронный ресурс] // *arXiv*. – 2024. – arXiv:2407.10127v1. – URL: <https://arxiv.org/abs/2407.10127> (дата обращения: 18.02.2026).

74. Xuan C., Lu J., Tian Z., et al. Novel design of reconfigurable tracked robot with geometry-changing tracks // *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. – 2024. – P. 10953–10960.

75. Wu Q., Rachkov M. Yu. Reconfiguration mechanism analysis of the wheel-track robot // *Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2023)*. – Springer, 2023. – P. 11–21.

76. Hendzel Z., Rykala L. Modelling of dynamics of a wheeled mobile robot with mecanum wheels with the use of Lagrange equations of the second kind // *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. – 2017. – Vol. 22, No. 1. – P. 81–99.

77. У Ц., Рачков М. Ю. Расчет и оптимизация работы механизма реконфигурации колесно-гусеничного мобильного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – Т. 23, № 4. – С. 209–215.

78. Luo Z. R., Shang J. Z., Wei G. W., Ren L. A reconfigurable hybrid wheel-track mobile robot based on Watt II six-bar linkage // Mechanism and Machine Theory. – 2018. – Vol. 128. – P. 16–32.

79. Li Zelin, Xu Linsen, Liu Jinfu, et al. Mechanism design and mechanical analysis of reconfigurable wheel-track wheel based on offset guide rod mechanisms // Proceedings of the 4th International Symposium on Robotics & Intelligent Manufacturing Technology. – Changzhou, China: IOP, 2022. – P. 1–11.

80. У Ц., Рачков М. Ю. Исследование кинематики реконфигурации колесно-гусеничного робота // Science and Technology Innovations: сб. ст. VII Междунар. науч.-практ. конф. (Петрозаводск). – М.: Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2022. – С. 38–43.

81. Yan L., Xu X., Tang Y., et al. The static analysis of reconfigurable wheel-track transformation mechanism // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2383. – Art. 012148.

82. Teng X. Y., Li Y. Z., Liu Y., Yao Y. A. Design and reconfiguration analysis of the trunk mechanism for a reconfigurable wheeled mobile platform // Journal of Mechanisms and Robotics. – 2024. – Vol. 16, No. 5. – Art. 054505.

83. Merlet J.-P. Singular configurations of parallel manipulators and Grassmann geometry // The International Journal of Robotics Research. – 1989. – Vol. 8, No. 5. – P. 45–56.

84. Gosselin C., Angeles J. Singularity analysis of closed-loop kinematic chains // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1990. – Vol. 6, No. 3. – P. 281–290.

85. Zheng C., Sane S., Lee K., et al. α -WaLTR: adaptive wheel-and-leg transformable robot for versatile multiterrain locomotion // IEEE Transactions on Robotics. – 2023.

86. Jiang J., Lin S., Wang H. Task-driven geometric synthesis method of a bistable compliant mechanism for the rigid guidance problem // Mechanical Sciences. – 2024. – Vol. 15. – P. 515–529.

87. У Ц. Новые тенденции в развитии мобильных реконфигурируемых роботов // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 29. – С. 175–180.

88. У Ц., Рачков М. Ю. Разработка информационного контура системы управления мобильным реконфигурируемым роботом // Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. XXIV Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2022. – С. 73–77.

89. Рачков М. Ю., У Ц. Ультразвуковая локационная система мобильного реконфигурируемого робота // Труды «НПЦАП». Системы и приборы управления. – 2023. – № 4(66). – С. 23–32.

90. У Ц., Рачков М. Ю. Особенности использования ультразвукового датчика препятствий для мобильного робота // Актуальные научные исследования: сб. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2023. – С. 59–65.

91. Rachkov M. Y., Wu Q. Ultrasonic location system of a reconfigurable mobile robot // Proceedings of the 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon) (Sochi, Russia). – 2024. – P. 994–999.

92. Рачков М. Ю., У Ц. Особенности измерения расстояния до препятствий разной формы ультразвуковым датчиком мобильного робота // Современные исследования высшей школы — 2024: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (27 февр. 2024 г.). – Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2024. – С. 32–38.

93. Ahn S., Kyung Y., Choi S., et al. Monocular vision-based obstacle height estimation for mobile robot // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, No. 23. – Art. 12711.

94. Lee W., Ryu S., Park G., et al. Mobile robot design with linkage-based reaction wheel mechanism for horizontal–vertical force transmission // Intelligent Service Robotics. – 2025. – Vol. 18. – P. 1089–1101.

95. Wang J., Wang R., Wang Z., et al. Autonomous obstacle-crossing motion control method for a mobile robot based on finite state machine // Robot. – 2022. – Vol. 44, No. 5. – P. 655–664.

96. Rodríguez-Liñán M. del C., Heath W. P. Controller structure for plants with combined saturation and stiction // Proceedings of the Institution of Mechanical

Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. – 2018. – Vol. 232, No. 11. – P. 1394–1399.

97. Zheng C., Su Y., Mercorelli P. Simple saturated relay non-linear PD control for uncertain motion systems with friction and actuator constraint // IET Control Theory & Applications. – 2019. – Vol. 13, No. 12. – P. 1920–1928.

98. У Ц., Рачков М. Ю., Архипов М. В. Система управления преодолением препятствий для трансформируемого робота на основе PID-регулирования // СМиС-2025. Технологии управления качеством = SMaC 2025: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Москва, 21–24 мая 2025 г.) / сост. А. П. Аддылина, Д. А. Ключкова. – Москва: Московский Политех, 2025. – С. 452–456.

99. Rachkov M. Y., Wu Q. Development of a transport robot with a reconfigurable structure // Journal of Nanyang Institute of Technology. – 2021. – Vol. 13, No. 2. – P. 48–52.

100. У Ц., Рачков М. Ю., Архипов М. В. Система управления мобильным транспортируемым роботом на платформе Arduino // СМиС-2025. Технологии управления качеством = SMaC 2025: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Москва, 21–24 мая 2025 г.) / сост. А. П. Аддылина, Д. А. Ключкова. – Москва: Московский Политех, 2025. – С. 456–459.

101. Knechtel J., Klingbeil L., Haunert J.-H., Dehbi Y. Optimal position and path planning for stop-and-go laserscanning for the acquisition of 3D building models // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2022. – Vol. V-4-2022. – P. 129–136.

102. Park S., Ju S., Nguyen M. H., et al. Automated point cloud registration approach optimized for a stop-and-go scanning system // Sensors. – 2024. – Vol. 24, No. 1. – Art. 138.

103. У Ц., Рачков М. Ю., Аддылина А. П. Автономный технологический мобильный робот // СМиС-2024. Технологии управления качеством = SMaC 2024: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Москва: Московский Политех, 2024. – С. 373–379.

104. Hirose S., Fukushima E. F., Damoto R., et al. Design of terrain adaptive versatile crawler vehicle Helios-VI // Proceedings 2001 IEEE/RSJ International

Conference on Intelligent Robots and Systems. – Maui, HI: IEEE, 2001. – Vol. 3. – P. 1540–1545.

105. Iagnemma K., Dubowsky S. Traction control of wheeled robotic vehicles in rough terrain with application to planetary rovers // The International Journal of Robotics Research. – 2004. – Vol. 23, No. 10–11. – P. 1029–1040.

106. ГОСТ Р 60.6.3.1-2019. Роботы и робототехнические устройства. Методы испытаний сервисных мобильных роботов для работы в экстремальных условиях. – М.: Стандартинформ, 2019. – С. 1–7.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Программа для реализации управляющих алгоритмов автономным мобильным реконфигурируемым роботом при автоматическом преодолении препятствий

```

#include <Servo.h> // Подключение библиотеки Servo для управления моторами с PWM-
сигналом
#include <math.h> // Для функций atan и преобразования углов

// ----- Глобальные параметры и переменные состояния -----
const float pidScale = 5.0; // Коэффициент масштабирования PID, регулируется в
зависимости от реальной настройки
unsigned long waitStartTime = 0;
bool waiting = false;

unsigned long armLiftStartTime = 0;
bool armIsLifting = false;
bool telescopicStarted = false;

bool armAtTarget = false;
bool rodExtendTriggered = false;
bool armLiftHoldCompleted = false;
unsigned long armTargetReachedTime = 0;

static bool retractingRod = false;
static unsigned long rodRetractStartTime = 0;

static bool preLiftPhase = true; // Фаза подъёма
static bool liftHoldPhase = false; // Фаза удержания после подъёма
static unsigned long liftHoldStartTime = 0;

// ----- Определение перечислений -----
enum RodState {
    ROD_IDLE,
    ROD_EXTENDING,

```

```

    ROD_STOPPING,
    ROD_EXTENDED
};
RodState rodState = ROD_IDLE;

unsigned long rodActionStartTime = 0;
unsigned long rodExtendDuration = 5000; // Время выдвижения телескопических рычагов
(регулируемое)

bool shouldExtendRod = false; // Флаг для активации выдвижения телескопического рычага

// ----- Параметры PID -----
float KpFront = 9.0;
float KiFront = 0.15;
float KdFront = 3.0;

float KpRear = 10.5;
float KiRear = 0.15;
float KdRear = 4.0;

// ----- Определение флагов состояний подъема -----
enum LiftState {
    LIFT_IDLE,
    LIFT_RISING,
    LIFT_RISE_PAUSE,
    LIFT_FALLING_FRONT_ALONE,
    LIFT_FALLING_BOTH
};
LiftState liftState = LIFT_IDLE;

unsigned long fallStartTime = 0;
unsigned long riseCompleteTime = 0;

// ----- Интеграция ошибок и хранение ошибок -----
float integralFront = 0, lastErrorFront = 0;
float integralRear = 0, lastErrorRear = 0;

```

```

// ----- Параметры регулировки PID (разные параметры для переднего и заднего
рычагов) -----
float KpFrontRise = 9.0, KiFrontRise = 0.15, KdFrontRise = 3.0;
float KpRearRise = 10.5, KiRearRise = 0.15, KdRearRise = 4.0;

float KpFrontFall = 9.0, KiFrontFall = 0.15, KdFrontFall = 3.0;
float KpRearFall = 10.5, KiRearFall = 0.15, KdRearFall = 4.0;

float pidScaleFrontRise = 5.0;

// ----- Определение выводов -----
// Задание пинов управления мотором PWM
#define LeftTrackMotorPin 2
#define RightTrackMotorPin 3
#define FrontLiftMotorPin 4
#define RearLiftMotorPin 5
#define FrontWheelMotorPin 6
#define RearWheelMotorPin 7
#define UltraMoveMotorPin 8

// Задание пинов для ультразвукового датчика
#define UltraTrigPin 9
#define UltraEchoPin 10

// Выводы энкодеров
#define EncoderFrontA 18
#define EncoderFrontB 19
#define EncoderRearA 20
#define EncoderRearB 21

// Задание пинов для управления PWM (H-мост L298N и управления мотором)
#define ENA 11
#define IN1 22
#define IN2 23
#define ENB 12

```

```
#define IN3 24
```

```
#define IN4 25
```

```
#define IN5 26
```

```
#define IN6 27
```

```
#define ENA2 44
```

```
#define IN7 28
```

```
#define IN8 29
```

```
#define ENB2 45
```

```
// ----- Предварительное объявление функций -----
```

```
void encoderFrontISR();
```

```
void encoderRearISR();
```

```
void stopAllMotors();
```

```
void setMotorSpeedByID(Servo &motor, int speed, bool reverse);
```

```
float getUltrasonicDistance();
```

```
void measureObstacleHeight();
```

```
float calculateArmAngleFromHeight(float height);
```

```
void stopTrackWheelMotors();
```

```
float runPID(float currentAngle, float targetAngle, float &integral, float &lastError,  
            float Kp, float Ki, float Kd, bool reverse);
```

```
void resetUltrasonicPosition();
```

```
void extendTelescopicArms();
```

```
void stopTelescopicArms();
```

```
// ----- Переменные подсчета показаний энкодеров -----
```

```
volatile long encoderFrontCount = 0;
```

```
volatile long encoderRearCount = 0;
```

```
// ----- Параметры переднего и заднего рычагов -----
```

```
const float armLength = 19.0; // см Длина переднего и заднего рычагов без выдвигания (в  
сантиметрах)
```

```
const int pulsesPerRevolution = 90; // Количество импульсов энкодеров за один оборот
```

```
const float degreesPerPulse = 360.0 / pulsesPerRevolution;
```

```

// Переменная динамического присваивания угла
float targetAngle = 80.0; // Начальное значение

// ----- Экземпляры моторов -----
Servo frontLiftMotor;
Servo rearLiftMotor;
Servo leftTrackMotor;
Servo rightTrackMotor;
Servo frontWheelMotor;
Servo rearWheelMotor;
Servo ultraMoveMotor;

// ----- Конфигурация направления моторов -----
bool reverseFront = true;
bool reverseRear = false;
bool reverseLeftTrack = false;
bool reverseRightTrack = true;
bool reverseFrontWheel = true;
bool reverseRearWheel = true;

// ----- Параметры синхронного управления -----
unsigned long frontStartTime = 0;
bool frontOnlyPhase = true;
bool syncControlStarted = false; // Вход в синхронное управление
unsigned long rearStartTime = 0;
bool rearOnlyPhase = false;

// ----- Установка скорости PWM -----
// Ниже установлены значения скорости для каждого сервомотора типа PWM
// Диапазон PWM сервомоя обычно составляет 1000~2000 микросекунд, 1500 - нейтраль
(остановка)
// Соответствует функции управления writeMicroseconds

int speedLeftTrack = 2000; // PWM значение мотора левой гусеницы (соответствует Servo
leftTrackMotor)

```

```
int speedRightTrack = 1000; // PWM значение мотора правой гусеницы (соответствует
Servo rightTrackMotor), противоположное направление
```

```
int speedFrontWheel = 2000; // PWM значение мотора переднего колеса (соответствует
Servo frontWheelMotor)
```

```
int speedRearWheel = 1000; // PWM значение мотора заднего колеса (соответствует Servo
rearWheelMotor)
```

```
int speedFrontLift = 1500; // Начальное значение PWM для переднего рычага (фактически
динамически обновляется в PID управлении)
```

```
int speedRearLift = 1500; // Начальное значение PWM для заднего рычага (фактически
динамически обновляется в PID управлении)
```

```
int speedUltraMove = 1500; // PWM значение мотора подъема ультразвукового датчика
(соответствует Servo ultraMoveMotor)
```

```
// -----Переменная ультразвуково модуля -----
```

```
float H_obstacle = 0.0;
```

```
// ----- Переменные для угловой зависимости -----
```

```
float Kp = 2.0;
```

```
const float minTargetAngle = 80.0;
```

```
const float maxTargetAngle = 150.0;
```

```
// Преобразование высоты препятствия в угол рычагов (в градусах)
```

```
float calculateTargetAngleFromHeight(float height) {
```

```
float h = constrain(height, 0.0, armLength);
```

```
float radians = acos(h / armLength);
```

```
float degrees = radians * 180.0 / PI;
```

```
float target = 180.0 - degrees;
```

```
return constrain(target, minTargetAngle, maxTargetAngle);
```

```
}
```

```
// ----- Основная функция: синхронизация поднятия к целевому положению ----
```

```
-----
```

```
void synchronizeLiftToTarget() {
```

```

float frontCurrentAngle = encoderFrontCount * degreesPerPulse;
float rearCurrentAngle = encoderRearCount * degreesPerPulse;

float errorF = targetAngle - frontCurrentAngle;
float errorR = targetAngle - rearCurrentAngle;

int pwmF = 1500 + Kp * errorF;
int pwmR = 1500 + Kp * errorR;

pwmF = constrain(pwmF, 1000, 2000);
pwmR = constrain(pwmR, 1000, 2000);

frontLiftMotor.writeMicroseconds(reverseFront ? (3000 - pwmF) : pwmF);
rearLiftMotor.writeMicroseconds(reverseRear ? (3000 - pwmR) : pwmR);
}

// ----- Вычисление текущего угла -----
float frontAngle = 0;
float angleError = 0;

// ----- Переменные PWM сервомотора -----
int pwmFront = 1500;
int pwmRear = 1500;

// ----- setup() -----
void setup() {
  Serial.begin(9600);

  // Инициализация моторов
  frontLiftMotor.attach(FrontLiftMotorPin);
  rearLiftMotor.attach(RearLiftMotorPin);
  leftTrackMotor.attach(LeftTrackMotorPin);
  rightTrackMotor.attach(RightTrackMotorPin);
  frontWheelMotor.attach(FrontWheelMotorPin);
  rearWheelMotor.attach(RearWheelMotorPin);
  ultraMoveMotor.attach(UltraMoveMotorPin);

```

```
// Инициализация выводов ультразвукового датчика
pinMode(UltraTrigPin, OUTPUT);
pinMode(UltraEchoPin, INPUT);

// Инициализация выводов энкодеров
pinMode(EncoderFrontA, INPUT);
pinMode(EncoderFrontB, INPUT);
pinMode(EncoderRearA, INPUT);
pinMode(EncoderRearB, INPUT);

// Привязка прерываний
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(EncoderFrontA), encoderFrontISR, CHANGE);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(EncoderFrontB), encoderFrontISR, CHANGE);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(EncoderRearA), encoderRearISR, CHANGE);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(EncoderRearB), encoderRearISR, CHANGE);

// Остановка всех моторов
stopAllMotors();

// Конфигурация выводов PWM
pinMode(ENA, OUTPUT);
pinMode(IN1, OUTPUT);
pinMode(IN2, OUTPUT);
pinMode(ENB, OUTPUT);
pinMode(IN3, OUTPUT);
pinMode(IN4, OUTPUT);

pinMode(IN5, OUTPUT);
pinMode(IN6, OUTPUT);
pinMode(ENA2, OUTPUT);

pinMode(IN7, OUTPUT);
pinMode(IN8, OUTPUT);
pinMode(ENB2, OUTPUT);
```

```

// Время запуска
rearStartTime = millis();
}

void loop() {
  static bool resetPhase = false;
  static unsigned long resetStartTime = 0;
  static int resetStep = 0;
  static unsigned long resetWaitStart = 0;

  static bool preLiftPhase = true;      // Этап поднятия
  static bool liftHoldPhase = false;    // Этап удержания после подъема
  static unsigned long liftHoldStartTime = 0;

  static bool initialLiftPhase = true;
  static unsigned long initialLiftStartTime = 0;

  static bool isRisingPhase = true;     // Флаг управления подъемом, true=подъем,
false=спуск

  static unsigned long liftStartTime = 0;
  static bool rodTriggered = false; // Флаг активации телескопических рычагов

  static bool syncLowerPhase = false; // Флаг синхронного спуска переднего и заднего
рычагов

  // ===== Инициализация движения вперед =====
  // Управление всеми моторами для вращения вперед (четыре группы)
  digitalWrite(IN1, HIGH); digitalWrite(IN2, LOW); // Первая группа
  digitalWrite(IN3, HIGH); digitalWrite(IN4, LOW); // Вторая группа
  digitalWrite(IN5, HIGH); digitalWrite(IN6, LOW); // Третья группа
  digitalWrite(IN7, HIGH); digitalWrite(IN8, LOW); // Четвертая группа

  // Включение четырех моторов (ENA2 и ENB2)
  analogWrite(ENA, 255); // Соответствует первой группе
  analogWrite(ENB, 255); // Соответствует второй группе

```

```

analogWrite(ENA2, 255); // Соответствует третьей группе
analogWrite(ENB2, 255); // Соответствует четвертой группе

if (initialLiftPhase) {
  setMotorSpeedByID(leftTrackMotor, speedLeftTrack, reverseLeftTrack);
  setMotorSpeedByID(rightTrackMotor, speedRightTrack, reverseRightTrack);

  stopTelescopicArms(); // вызов функции stop() после завершения управления

  if (initialLiftStartTime == 0) initialLiftStartTime = millis();

  if (millis() - initialLiftStartTime >= 1000) {
    frontLiftMotor.writeMicroseconds(1500);
    rearLiftMotor.writeMicroseconds(1500);
    initialLiftPhase = false;
  }
  return; // Завершение текущего цикла
}

// ===== Этап обнаружения препятствий =====
if (!syncControlStarted) {
  setMotorSpeedByID(leftTrackMotor, speedLeftTrack, reverseLeftTrack);
  setMotorSpeedByID(rightTrackMotor, speedRightTrack, reverseRightTrack);
  stopTelescopicArms();

  float distance = getUltrasonicDistance();
  Serial.print("Текущее расстояние: "); Serial.println(distance);

  if (distance <= 20.0) {
    stopAllMotors();
    delay(300);

    // --- Управление мотором ультразвукового датчика для подъема и измерения высоты
    ---

    // Задание pwm мотору подъема ультразвукового модуля:
    // 1500us - остановка, >1500us - движение вверх, <1500us - движение вниз

```

```

ultraMoveMotor.writeMicroseconds(1600); // 1600 примерно означает движение вверх
delay(2000); // Измерение высоты препятствия
ultraMoveMotor.writeMicroseconds(1500); // Остановка мотора ультразвука

measureObstacleHeight();

Serial.print("Измеренная высота препятствия составила: ");
Serial.print(H_obstacle);
Serial.println(" см");

// Вычислить угол цели
float targetHeight = H_obstacle + 1.0;
targetAngle = calculateTargetAngleFromHeight(targetHeight);

int pwmFront = 1500;
int pwmRear = 1500;

Serial.print("Целевой угол подъема рычага: "); Serial.println(targetAngle);

syncControlStarted = true;
frontStartTime = millis();

integralFront = 0; lastErrorFront = 0;
integralRear = 0; lastErrorRear = 0;
preLiftPhase = true;
liftHoldPhase = false;
isRisingPhase = true;

liftStartTime = millis();
rodTriggered = false;
syncLowerPhase = false; // Сброс знака стадии спуска

return; // Фаза подъема рычагов и завершение текущего цикла
} else {
delay(50);
return; // завершить текущий цикл

```

```

    }
}

// ===== Стадия подъема рычага =====
if (preLiftPhase) {
    unsigned long now = millis();

    if (!liftHoldPhase) {
        int liftUpPWM = 1200; // Менее 1500 микросекунд для подъема
        frontLiftMotor.writeMicroseconds(reverseFront ? (3000 - liftUpPWM) : liftUpPWM);
        rearLiftMotor.writeMicroseconds(reverseRear ? (3000 - liftUpPWM) : liftUpPWM);

        stopTelescopicArms();

        if (!rodTriggered && (now - liftStartTime >= 1200)) {
            shouldExtendRod = true;
            rodState = ROD_EXTENDING;
            rodActionStartTime = now;
            rodTriggered = true;
            Serial.println("Целевой угол достигнут, запуск выдвигания телескопических
рычагов");
        }

        if (now - liftStartTime >= 1200) {
            frontLiftMotor.writeMicroseconds(1500);
            rearLiftMotor.writeMicroseconds(1500);
            liftHoldPhase = true;
            liftHoldStartTime = now;
            Serial.println("Целевой угол достигнут, вход в фазу удержания на 5 секунд");
        }
    } else {
        frontLiftMotor.writeMicroseconds(1500);
        rearLiftMotor.writeMicroseconds(1500);

        if (now - liftHoldStartTime >= 5000) {
            preLiftPhase = false;

```

```

Serial.println("Удержание завершено, этап выдвижения телескопических рычагов
завершён");
// После завершения подъема рычага, переходит в фазу синхронного спуска
syncLowerPhase = true;
isRisingPhase = false; // Переключение в режим спуска
}
}
return; // Завершение подъема рычага
}

// ===== Управление телескопическими рычагами
=====

if (shouldExtendRod) {
  unsigned long now = millis();
  switch (rodState) {
    case ROD_EXTENDING:
      extendTelescopicArms();
      if (now - rodActionStartTime >= rodExtendDuration) {
        rodState = ROD_STOPPING;
        Serial.println("Время выдвижения телескопического рычага завершено, подготовка к
остановке");
      }
      break;
    case ROD_STOPPING:
      stopTelescopicArms();
      rodState = ROD_EXTENDED;
      shouldExtendRod = false;
      Serial.println("Выдвижение телескопического рычага завершено");
      break;
    case ROD_EXTENDED:
      stopTelescopicArms();
      break;
    case ROD_IDLE:
      default:
      stopTelescopicArms();
      break;
  }
}

```

```

    }
} else {
    stopTelescopicArms();
}

// ===== Чтение текущего угла =====
float angleFront = abs(encoderFrontCount * degreesPerPulse);
float angleRear = abs(encoderRearCount * degreesPerPulse);

bool frontDone = (angleFront >= targetAngle - 1.0);
bool rearDone = (angleRear >= targetAngle - 1.0);

// ===== Стадия синхронного спуска переднего и заднего рычагов
=====

if (syncLowerPhase) {
    // Запуск гусениц и колес
    setMotorSpeedByID(leftTrackMotor, speedLeftTrack, reverseLeftTrack);
    setMotorSpeedByID(rightTrackMotor, speedRightTrack, reverseRightTrack);
    setMotorSpeedByID(frontWheelMotor, speedFrontWheel, reverseFrontWheel);
    setMotorSpeedByID(rearWheelMotor, speedRearWheel, reverseRearWheel);

    // Чтение текущего угла
    float angleFront = abs(encoderFrontCount * degreesPerPulse);
    float angleRear = abs(encoderRearCount * degreesPerPulse);

    // Целевой угол, подтверждение, что это целевой угол спуска
    float target = targetAngle;

    // Запуск PID, получение базовых PWM значений (обработка реверса не требуется)
    pwmFront = runPID(angleFront, target, integralFront, lastErrorFront,
        KpFrontFall, KiFrontFall, KdFrontFall, reverseFront);

    pwmRear = runPID(angleRear, target, integralRear, lastErrorRear,
        KpRearFall, KiRearFall, KdRearFall, reverseRear);
}

```

```

// Вычисление разницы углов между двумя рычагами для компенсации
float angleDiff = angleFront - angleRear;

// Если разница углов больше заданной, то сделать микрокорректировку, чтобы
// обеспечить синхронное движение обоих рычагов
if (abs(angleDiff) > 2.0) {
    if (angleDiff > 0) {
        // Угол переднего рычага больше, чем у заднего, значит, задний рычаг отстает.
        // Увеличить PWM заднего рычага, чтобы ускорить спуск
        // Поскольку в runPID есть переверт, увеличивается амплитуда PWM соответственно
        pwmRear = constrain(pwmRear + 20, 1000, 2000);
    } else {
        // Угол заднего рычага больше, чем у переднего, значит, передний рычаг отстает.
        // Увеличивается PWM переднего рычага, чтобы ускорить спуск
        pwmFront = constrain(pwmFront + 20, 1000, 2000);
    }
}

// Проверка, достигли ли оба рычага целевого угла (допускается ошибка в 1 градус)
bool frontDone = (angleFront >= target - 1.0);
bool rearDone = (angleRear >= target - 1.0);

if (frontDone && rearDone) {
    Serial.println("Синхронное опускание переднего и заднего рычагов завершено,
остановка подъема");

    // Остановка PWM для моторов перемещения (нейтраль для сервомоторов)
    frontLiftMotor.writeMicroseconds(1500);
    rearLiftMotor.writeMicroseconds(1500);

    // Завершение этапа спуска, продолжение движения гусениц и колес
    syncLowerPhase = false;

    return; // Завершение текущего цикла
}

```

```

// Управление PWM сигналов управления к моторам подъема
frontLiftMotor.writeMicroseconds(pwmFront);
rearLiftMotor.writeMicroseconds(pwmRear);

return; // Контроль на этапе синхронного спуска
}

// ===== После успешного преодоления препятствий, через 10 секунд
переход в полный режим сброса =====
static bool postCrossResetPhase = false;
static unsigned long postCrossStartTime = 0;
static int postResetStep = 0;
static unsigned long postStepStartTime = 0;

if (!postCrossResetPhase && frontDone && rearDone && !resetPhase) {
    // После завершения работы передний и задний рычаги переходят в 10-секундное
    ожидание
    if (postCrossStartTime == 0) postCrossStartTime = millis();

    if (millis() - postCrossStartTime >= 10000) {
        postCrossResetPhase = true;
        postResetStep = 0;
        postStepStartTime = millis();
        Serial.println("10 секунд после преодоления препятствия, вход в фазу полной
инициализации");
    }
}

if (postCrossResetPhase) {
    unsigned long now = millis();

    switch (postResetStep) {
        case 1:
            // Шаг 1: Вернуться в противоположном направлении к начальному углу
            Serial.println("Стадия сброса: передний и задний рычаги возвращаются в начальное
положение в обратном направлении");

```

```

frontLiftMotor.writeMicroseconds(reverseFront ? 1900 : 1100); // переворот
rearLiftMotor.writeMicroseconds(reverseRear ? 1100 : 1900); // переворот
if (now - postStepStartTime >= 1000) {
    frontLiftMotor.writeMicroseconds(1500);
    rearLiftMotor.writeMicroseconds(1500);
    postResetStep++;
    postStepStartTime = now;
}
break;

```

case 2:

```

// Шаг 2: Сократить телескопический рычаг за 5 секунд
Serial.println("Стадия сброса: телескопические рычаги втягиваются");
retractTelescopicArms(); // Функция сокращения
if (now - postStepStartTime >= 5000) {
    stopTelescopicArms();
    postResetStep++;
    postStepStartTime = now;
}
break;

```

case 3:

```

// Шаг 3: Остановить передние и задние колеса
Serial.println("Стадия сброса: остановка передних и задних колес");
stopMotorByID(frontWheelMotor);
stopMotorByID(rearWheelMotor);
postResetStep++;
postStepStartTime = now;
break;

```

case 4:

```

// Шаг 4: Ультразвуковой датчик вернуть в начальное положение
Serial.println("Этап сброса: ультразвуковой датчик вернуть в начальное положение");
// Запуск мотора для подъема датчика:
// 1500us - остановка, >1500us - движение вверх, <1500us - движение вниз
ultraMoveMotor.writeMicroseconds(1300); // 1300 примерно означает движение вниз

```

```

if (now - postStepStartTime >= 5000) {
    ultraMoveMotor.writeMicroseconds(1500); // Остановка мотора ультразвука
    postResetStep++;
    postStepStartTime = now;
}
break;

case 5:
    // Шаг 5: Сброс PID и кодировщика, возвращение к задаче
    Serial.println("Стадия сброса: сброс PID и энкодеров, возврат к задаче обнаружения");

    integralFront = 0; lastErrorFront = 0;
    integralRear = 0; lastErrorRear = 0;
    encoderFrontCount = 0;
    encoderRearCount = 0;

    syncControlStarted = false;
    postCrossResetPhase = false;
    postCrossStartTime = 0;
    frontStartTime = 0;
    rearOnlyPhase = true;

    // Поддержание движения только гусениц
    setMotorSpeedByID(leftTrackMotor, speedLeftTrack, reverseLeftTrack);
    setMotorSpeedByID(rightTrackMotor, speedRightTrack, reverseRightTrack);

    Serial.println("Сброс завершен, начинается цикл задач");
    break;
}

return; // Контроль процесса сброса
}

// ===== Задачи управления движением =====
if (frontOnlyPhase) {

```

```

    pwmFront = runPID(angleFront, targetAngle, integralFront, lastErrorFront, KpFront, KiFront,
KdFront, reverseFront);
    rearLiftMotor.writeMicroseconds(1500);
    stopTrackWheelMotors();

    if (millis() - frontStartTime >= 3000) {
        frontOnlyPhase = false;
        integralFront = 0; lastErrorFront = 0;
        integralRear = 0; lastErrorRear = 0;
    }
    } else {
        pwmFront = runPID(angleFront, targetAngle, integralFront, lastErrorFront, KpFront, KiFront,
KdFront, reverseFront);
        pwmRear = runPID(angleRear, targetAngle, integralRear, lastErrorRear, KpRear, KiRear,
KdRear, reverseRear);

        float angleDiff = angleFront - angleRear;
        if (abs(angleDiff) > 2.0) {
            if (angleDiff > 0) pwmRear = constrain(pwmRear + 20, 1000, 2000);
            else pwmFront = constrain(pwmFront + 20, 1000, 2000);
        }

        if (frontDone && rearDone && !resetPhase) {
            stopTrackWheelMotors();
            pwmFront = 1500;
            pwmRear = 1500;
            resetPhase = true;
            resetStartTime = millis();
            Serial.println("Преодоление препятствия завершено, начало сброса");
        } else if (!resetPhase) {
            setMotorSpeedByID(leftTrackMotor, speedLeftTrack, reverseLeftTrack);
            setMotorSpeedByID(rightTrackMotor, speedRightTrack, reverseRightTrack);
            setMotorSpeedByID(frontWheelMotor, speedFrontWheel, reverseFrontWheel);
            setMotorSpeedByID(rearWheelMotor, speedRearWheel, reverseRearWheel);
        }
    }
}

```

```

frontLiftMotor.writeMicroseconds(pwmFront);
rearLiftMotor.writeMicroseconds(pwmRear);

Serial.print("Угол переднего рычага: "); Serial.print(angleFront); Serial.print("°, PWM: ");
Serial.print(pwmFront);
Serial.print(" | Угол заднего рычага: "); Serial.print(angleRear); Serial.print("°, PWM: ");
Serial.println(pwmRear);

delay(10);
}

// ----- Определения функций -----

// Получить расстояние до ультразвукового датчика (сантиметры)
float getUltrasonicDistance() {
    digitalWrite(UltraTrigPin, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(UltraTrigPin, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(UltraTrigPin, LOW);
    long duration = pulseIn(UltraEchoPin, HIGH, 20000); // Таймаут 20ms
    if (duration == 0) return 999.0; // Нет ответа
    return duration * 0.034 / 2.0; // Преобразование в расстояние
}

// Измерение высоты препятствия
void measureObstacleHeight() {
    int stepDelay = 300; // Задержка на каждом шаге (миллисекунды)
    int maxSteps = 210; // Максимальное количество шагов
    int steps = 0;
    float minDistance = 1000.0;
    int stableCount = 0;
    const int MAX_STABLE_COUNT = 3;
    const float threshold = 2.0;

```

```

while (steps < maxSteps) {
  ultraMoveMotor.writeMicroseconds(1700); // Движение вниз
  delay(stepDelay);
  steps++;
  float currentDistance = getUltrasonicDistance();
  Serial.print("Измеренное расстояние: ");
  Serial.println(currentDistance);

  if (currentDistance < minDistance) {
    minDistance = currentDistance;
    stableCount = 0;
  } else if (currentDistance > minDistance + threshold) {
    stableCount++;
  } else {
    stableCount = 0;
  }
  if (stableCount >= MAX_STABLE_COUNT) break;
}
ultraMoveMotor.writeMicroseconds(1500); // Остановка
delay(200);
// Оценка высоты по количеству шагов (каждый шаг 0.1 см)
H_obstacle = steps * 0.1;
}

// Преобразование угла
float calculateArmAngleFromHeight(float height) {
  float h = constrain(height, 0.0, armLength);
  float radians = acos(h / armLength);
  float degrees = radians * 180.0 / PI;
  float target = 180.0 - degrees; // Угол захвата
  return constrain(target, 80.0, 150.0); // безопасный диапазон
}

// Все моторы остановлены
void stopAllMotors() {
  frontLiftMotor.writeMicroseconds(1500);
}

```

```

rearLiftMotor.writeMicroseconds(1500);
leftTrackMotor.writeMicroseconds(1500);
rightTrackMotor.writeMicroseconds(1500);
frontWheelMotor.writeMicroseconds(1500);
rearWheelMotor.writeMicroseconds(1500);
ultraMoveMotor.writeMicroseconds(1500);
}

```

```
// Гусеницы и колеса прекращают движение
```

```

void stopTrackWheelMotors() {
    leftTrackMotor.writeMicroseconds(1500);
    rightTrackMotor.writeMicroseconds(1500);
    frontWheelMotor.writeMicroseconds(1500);
    rearWheelMotor.writeMicroseconds(1500);
}

```

```
// алгоритм PID управления
```

```

float runPID(float currentAngle, float targetAngle, float &integral, float &lastError, float Kp,
float Ki, float Kd, bool reverse) {
    float error = targetAngle - currentAngle;
    integral += error;
    // Ограничение интеграла от всплесков
    if (integral > 1000) integral = 1000;
    if (integral < -1000) integral = -1000;
    float derivative = error - lastError;
    lastError = error;

    float output = Kp * error + Ki * integral + Kd * derivative;

    int pwm = 1500 + (reverse ? -output : output);
    // Ограничение диапазона PWM
    if (pwm > 2000) pwm = 2000;
    if (pwm < 1000) pwm = 1000;
    return pwm;
}

```

```

// Программа прерывания работы энкодеров
void encoderFrontISR() {
  int a = digitalRead(EncoderFrontA);
  int b = digitalRead(EncoderFrontB);
  if (a == b) encoderFrontCount++;
  else encoderFrontCount--;
}

void encoderRearISR() {
  int a = digitalRead(EncoderRearA);
  int b = digitalRead(EncoderRearB);
  if (a == b) encoderRearCount++;
  else encoderRearCount--;
}

// Сброс положения ультразвукового модуля
void resetUltrasonicPosition() {
  const int stepDelay = 50;
  const int maxSteps = 210;
  const float minDistance = 2.0;

  int steps = 0;

  while (steps < maxSteps) {
    ultraMoveMotor.writeMicroseconds(1300); // Движение вниз
    delay(stepDelay);
    steps++;

    float currentDistance = getUltrasonicDistance();
    Serial.print("Сброс измерения: ");
    Serial.println(currentDistance);

    if (currentDistance <= minDistance) {
      Serial.println("Снижение до начального положения, остановка ультразвукового
модкля");
      break;
    }
  }
}

```

```

    }
}
ultraMoveMotor.writeMicroseconds(1500); // Остановка
delay(300);
}

// Установка скорости для конкретного мотора (PWM)
void setMotorSpeedByID(Servo &motor, int speed, bool reverse) {
    if (reverse) speed = 3000 - speed;
    motor.writeMicroseconds(speed);
}

// Выдвижение телескопических рычагов
void extendTelescopicArms() {
    // Первая пара
    digitalWrite(IN1, HIGH);
    digitalWrite(IN2, LOW);
    // Вторая пара
    digitalWrite(IN3, HIGH);
    digitalWrite(IN4, LOW);
    // Третья пара
    digitalWrite(IN5, HIGH);
    digitalWrite(IN6, LOW);
    // Четвертая пара
    digitalWrite(IN7, HIGH);
    digitalWrite(IN8, LOW);

    analogWrite(ENA, 255);
    analogWrite(ENB, 255);
    analogWrite(ENA2, 255);
    analogWrite(ENB2, 255);

    Serial.println(">>> Выполнение: все 4 группы телескопических рычагов выдвинуты");
}

// Остановка всех моторов телескопических рычагов

```

```
void stopTelescopicArms() {  
    // Остановить все  
    digitalWrite(IN1, LOW);  
    digitalWrite(IN2, LOW);  
    digitalWrite(IN3, LOW);  
    digitalWrite(IN4, LOW);  
    digitalWrite(IN5, LOW);  
    digitalWrite(IN6, LOW);  
    digitalWrite(IN7, LOW);  
    digitalWrite(IN8, LOW);  
  
    analogWrite(ENA, 0);  
    analogWrite(ENB, 0);  
    analogWrite(ENA2, 0);  
    analogWrite(ENB2, 0);  
  
    Serial.println(">>> Выполнение: все 4 группы телескопических рычагов остановлены");  
}
```

```
void retractTelescopicArms() {  
    // Первая пара  
    digitalWrite(IN1, LOW);  
    digitalWrite(IN2, HIGH);  
    // Вторая пара  
    digitalWrite(IN3, LOW);  
    digitalWrite(IN4, HIGH);  
    // Третья пара  
    digitalWrite(IN5, LOW);  
    digitalWrite(IN6, HIGH);  
    // Четвертая пара  
    digitalWrite(IN7, LOW);  
    digitalWrite(IN8, HIGH);  
  
    analogWrite(ENA, 255);  
    analogWrite(ENB, 255);  
    analogWrite(ENA2, 255);
```

```
analogWrite(ENB2, 255);
```

```
Serial.println(">>> Выполнение: все 4 группы телескопических рычагов втянуты");  
}
```

```
void moveUltrasonicDown() {  
    // Управление мотором ультразвукового модуля для движения вниз  
    ultraMoveMotor.writeMicroseconds(1300); // Движение вниз  
}
```

```
void stopUltrasonicMotor() {  
    ultraMoveMotor.writeMicroseconds(1500); // Остановка  
}
```

```
void stopMotorByID(Servo &motor) {  
    motor.writeMicroseconds(1500);  
}
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025682232

**Программа для системы управления автономным
мобильным реконфигурируемым роботом при
автоматическом преодолении препятствий**

Правообладатели: *Архипов Максим Викторович (RU), У Цюе (RU), Рачков Михаил Юрьевич (RU)*

Авторы: *У Цюе (RU), Рачков Михаил Юрьевич (RU),
Архипов Максим Викторович (RU)*



Заявка № 2025668444

Дата поступления 21 июля 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 21 августа 2025 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 0462e761ab300b544240f670bca2026
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.03.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 230281**Автоматическое гусенично-колесное транспортное средство**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Московский политехнический университет" (Московский Политех) (RU)*

Авторы: *Рачков Михаил Юрьевич (RU), У Цюе (RU)*

Заявка № **2024118770**Приоритет полезной модели **04 июля 2024 г.**Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **25 ноября 2024 г.**Срок действия исключительного права на полезную модель истекает **04 июля 2034 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 0092e761a6300c15402401670bca2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 228192**Гусенично-колесное транспортное средство с рычажным приводом**

Патентообладатель: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Московский политехнический университет" (Московский Политех) (RU)**

Авторы: **Рачков Михаил Юрьевич (RU), У Цюе (CN)**

Заявка № 2024118845

Приоритет полезной модели **05 июля 2024 г.**Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **19 августа 2024 г.**Срок действия исключительного права на полезную модель истекает **05 июля 2034 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0692e761a63001b542401670bca2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

АКТ

№ _____

 (место составления)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
 к.т.н.

_____ А.Ю. Наливайко
 «06» _____ 2026 г.
 (сербовозна печать)

О внедрении в учебный процесс университета результатов диссертационной работы «Разработка и исследование автономного гусенично-колесного реконфигурируемого робота», выполненной аспирантом кафедры «Автоматика и управление» Цюе У.

Мы, нижеподписавшиеся директор департамента по образовательной политике, декан факультета машиностроение, заведующий кафедрой «Автоматика и управление» составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы по теме «Разработка и исследование автономного гусенично-колесного реконфигурируемого робота» имеют теоретическое и практическое значение для учебного процесса и внедрены в учебный процесс Московского политехнического университета при обучении студентов направления 27.03.04. «Управление в технических системах» (профиль «Электронные системы управления») в форме учебного макета мобильного реконфигурируемого робота для выполнения лабораторных и выпускных квалификационных работ.

Кафедра, внедрившая результаты: «Автоматика и управление».

Номер протокола и дата заседания кафедры, на котором рассмотрены результаты внедрения: протокол № 1 от 01.09.2025 г.

Начало использования объекта внедрения: 01 сентября 2025 года.

Директор департамента по
 образовательной политике

_____ (личная подпись)

А.Б. Максимов

Декан факультета,
 внедривший разработку

_____ (личная подпись)

Е.В. Сафонов

Заведующий кафедрой

_____ (личная подпись)

А.А. Радионов

ПРИЛОЖЕНИЕ 6



Общество с ограниченной ответственностью
"РОБОКОМПОНЕНТ",
ИНН 9703113163, КПП 772201001,
111024, Город Москва, вн.тер.г. муниципальный
округ Лефортово, ул.Авиамоторная, д.73А, стр. 6

Исх. от «16» февраля 2026г. № 12

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы

У Цюе по теме: «Разработка и исследование автономного гусенично-колесного
реконфигурируемого робота» в проектно-конструкторской и производственной
деятельности ООО «РобоКомпонент»

Полученные в диссертационной работе результаты использованы в ООО «РобоКомпонент». При непосредственном участии У Цюе разработана архитектура системы управления мобильным роботом, обеспечивающая автономное распознавание и преодоление препятствий на основе метода активного вертикального сканирования и алгоритмов адаптивного ПИД-регулирования приводами механизма реконфигурации. Разработанная система управления обеспечивает автономность функционирования робота в неструктурированных средах при ограниченных вычислительных ресурсах, может быть применена для использования в промышленной робототехнике и представляет собой перспективную альтернативу существующим решениям

Генеральный директор
ООО «РобоКомпонент»

Шмаков Д.А.

