



**УТВЕРЖДАЮ**

Директор

АНО ВО «Университет Иннополис»

Д.В. Вандюков

«26» мая 2026 г.

## **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

Автономной некоммерческой организации высшего образования «Университет Иннополис» на диссертационную работу У Цюе на тему «Разработка и исследование автономного гусенично-колесного реконфигурируемого робота», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.4 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Диссертационная работа У Цюе посвящена разработке и исследованию автономного гусенично-колесного реконфигурируемого робота, ориентированного на движение в сложной, слабоструктурированной и потенциально опасной среде. Значимость данного направления определяется практической потребностью в мобильных робототехнических комплексах, способных выполнять разведывательные, транспортные и вспомогательные операции в условиях, где участие человека связано с повышенным риском: в зонах разрушенной городской инфраструктуры, техногенных аварий, пожаров, завалов и на участках с неопределенным рельефом.

Для таких условий эксплуатации особенно важны не только проходимость и устойчивость платформы, но и способность робота изменять конфигурацию ходовой части, сохранять работоспособность при ограниченной сенсорной информации и рационально расходовать энергетические ресурсы. Традиционные колесные схемы обеспечивают высокую скорость и экономичность на ровных поверхностях, но имеют ограниченные возможности при преодолении ступеней, порогов и рыхлых участков грунта. Гусеничные платформы лучше приспособлены к сложному рельефу, однако характеризуются увеличенными потерями энергии, меньшей маневренностью и повышенными нагрузками на элементы движителя.

В указанном контексте научно-техническая задача, решаемая в диссертации, является актуальной: автор предлагает гибридную гусенично-колесную платформу с изменяемой геометрией шасси, механизмом силовой фиксации в крайних положениях и алгоритмами автономного распознавания препятствий на основе активного вертикального сканирования. Важным

достоинством выбранного подхода является ориентация на сравнительно простую элементную базу и микроконтроллерное управление, что повышает прикладную ценность результатов для создания малогабаритных робототехнических систем массового назначения.

Таким образом, тематика исследования соответствует современным направлениям развития мобильной робототехники, мехатронных систем и автономного управления и представляет интерес как с научной, так и с инженерно-практической точки зрения.

### **Структура и содержание диссертационной работы**

Диссертационная работа включает введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложения. Работа изложена на 159 страницах, содержит графические и табличные материалы, необходимые для раскрытия результатов исследования; список литературы включает 106 источников. Структура диссертации логично отражает последовательность решения поставленной научно-технической задачи: от анализа существующих подходов и постановки проблемы до моделирования, синтеза алгоритмов, изготовления экспериментального образца и проверки его характеристик.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель, объект и предмет исследования, определены задачи диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о методах исследования, достоверности, апробации и публикациях по теме диссертации. Положения, выносимые на защиту, соответствуют заявленной цели и охватывают как конструктивную часть разработки, так и алгоритмическое обеспечение автономной реконфигурации.

В первой главе выполнен анализ современного состояния мобильных робототехнических платформ, применяемых для работы в сложных условиях. Рассмотрены колесные, гусеничные, шагающие и реконфигурируемые схемы, дана оценка их преимуществ и ограничений по критериям скорости, энергоэффективности, сцепления, устойчивости и способности преодолевать препятствия. Отдельное внимание уделено архитектурам систем управления мобильными роботами и формализации процесса изменения конфигурации шасси. По результатам анализа автор обосновывает необходимость создания платформы, объединяющей преимущества колесного и гусеничного движителей и способной механически разгружать исполнительные приводы в транспортных режимах.

Во второй главе разработаны математические модели кинематики и квазистатики механизма реконфигурации. Рассмотрены связи между ходом

линейных приводов, положением рычажных звеньев, геометрией опорного контура и распределением нагрузок в элементах конструкции. Выполнена многокритериальная оптимизация параметров механизма с учетом ограничений по компактности, ходу штоков, воспринимаемым усилиям и условиям механической блокировки. Представленная конструктивная схема показывает возможность передачи статических и динамических нагрузок на силовой контур механических упоров, что снижает требования к удерживающему моменту приводов.

В третьей главе предложена архитектура управления механизмом реконфигурации и описано аппаратно-программное обеспечение робота. Исследованы погрешности ультразвуковой локации, построена математическая модель активного вертикального сканирования, рассмотрены вопросы выбора датчиков обратной связи и влияния дискретизации. Автор синтезирует алгоритм управления, реализующий стратегию останковки, сканирования и последующей реконфигурации, а также исследует динамику приводов и системы управления в среде MATLAB/Simulink. Проведенный анализ временных, частотных и нелинейных характеристик позволяет обосновать выбранные параметры регуляторов и режимы работы приводов.

Четвертая глава посвящена цифровому проектированию, изготовлению экспериментального образца и проведению натурных исследований. Описаны конструкция робота, состав приводной и сенсорной подсистем, реализация программных алгоритмов и результаты метрологического исследования ультразвуковой навигационной системы. Экспериментальная часть подтверждает работоспособность механизма реконфигурации, эффективность алгоритма активного сканирования и возможность автономного преодоления препятствий при использовании ограниченного набора датчиков.

Главы диссертации завершаются выводами, отражающими полученные результаты. Заключение содержит обобщение научных и практических итогов работы и подтверждает достижение поставленной цели исследования.

### **Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**

Обоснованность результатов диссертационной работы обеспечивается использованием комплекса методов, соответствующих предметной области исследования: теоретической механики, теории механизмов и машин, математического моделирования, теории автоматического управления, численной оптимизации, имитационного моделирования и экспериментальной проверки на физическом образце.

Кинематические и квазистатические зависимости механизма реконфигурации выведены с учетом геометрических ограничений рычажной системы и особенностей силового замыкания конструкции. Моделирование исполнительных приводов и контуров управления выполнено с учетом нелинейностей, существенных для реального малогабаритного робота: сухого трения, зазоров, насыщения управляющего сигнала и ограниченной точности измерений. Применение MATLAB/Simulink для анализа динамики и C++/Arduino IDE для практической реализации алгоритмов позволяет проследить связь между расчетной моделью и работой экспериментального образца.

Достоверность выводов подтверждается совпадением расчетных, имитационных и экспериментальных данных в пределах, приемлемых для поставленных инженерных задач, а также воспроизводимыми испытаниями механизма реконфигурации, сенсорного узла и алгоритмов управления. Проведенные эксперименты демонстрируют, что предложенные решения обеспечивают автономное определение параметров препятствий, согласованное движение исполнительных механизмов и снижение энергетических затрат в режиме удержания за счет механической фиксации.

### **Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы состоит в получении и экспериментальном подтверждении совокупности результатов, направленных на повышение автономности, надежности и энергоэффективности реконфигурируемых мобильных роботов.

1. Разработана методика параметрической оптимизации механизма реконфигурации, при которой геометрические размеры звеньев и ход линейных приводов определяются с учетом условий механической блокировки и силовой фиксации в характерных положениях. В отличие от схем, где удержание конфигурации возлагается преимущественно на привод, предложенный подход обеспечивает перераспределение нагрузки на механические упоры и раму робота, что повышает жесткость и энергоэффективность конструкции.

2. Разработана архитектура автономного управления реконфигурируемым роботом, объединяющая режимы движения, диагностики, восстановления и реконфигурации на основе иерархической логики конечного автомата. Введение специализированных диагностических состояний и возвратных переходов повышает устойчивость поведения робота при сбоях позиционирования и ошибках выполнения команд.

3. Разработан алгоритм активного вертикального сканирования препятствий, позволяющий получать оценку геометрических параметров препятствия при использовании ультразвукового дальномера и одной управляемой степени свободы. Данное решение расширяет возможности недорогих сенсорных систем и снижает зависимость робота от лидаров, стереокамер и иных сложных систем технического зрения.

4. Синтезирован алгоритм управления исполнительными приводами механизма реконфигурации с учетом насыщения управляющего сигнала, сухого трения и дискретности обратной связи. Использование форсированного пропорционального воздействия и синхронизации каналов управления позволяет обеспечить требуемую согласованность движения рычагов без усложнения системы наблюдателями состояния.

Указанные результаты обладают признаками новизны и в совокупности образуют научно обоснованную методику проектирования и управления малогабаритной реконфигурируемой платформой.

### **Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы**

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии методов моделирования и параметрического синтеза мобильных реконфигурируемых систем. Полученные зависимости между геометрией механизма, положением исполнительных звеньев и распределением нагрузок могут быть использованы при проектировании робототехнических платформ с изменяемым опорным контуром. Дополнительную научную ценность представляет рассмотрение управления недорогими линейными приводами в режимах, где существенное влияние оказывают трение, люфты и ограничения управляющего сигнала.

Практическая значимость работы определяется созданием экспериментального образца автономного гусенично-колесного робота и программно-аппаратного комплекса управления на базе доступной элементной базы. Разработанные решения могут быть использованы при создании малогабаритных поисково-спасательных, разведывательных и транспортных робототехнических комплексов, предназначенных для работы в условиях завалов, промышленных объектов, складских и строительных площадок, а также в образовательных и исследовательских лабораториях.

К прикладным результатам также следует отнести программную реализацию алгоритмов активного сканирования, синхронизации приводов и восстановления работоспособности, а также подтверждение возможности снижения нагрузки на приводы за счет механической блокировки. Данные результаты имеют значение для разработчиков мобильных роботов,

использующих ограниченные вычислительные ресурсы и серийные компоненты.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы**

Результаты диссертационной работы целесообразно использовать при проектировании мобильных наземных роботов, предназначенных для автономного движения по сложному рельефу и преодоления локальных препятствий. Методика выбора параметров механизма реконфигурации может быть полезна конструкторским подразделениям, разрабатывающим гибридные шасси с изменяемой геометрией и повышенными требованиями к надежности силовой схемы.

Алгоритмы активного ультразвукового сканирования, диагностики и синхронного управления приводами могут применяться в учебных курсах и лабораторных работах по мобильной робототехнике, мехатронике, системам автоматического управления и встраиваемому программированию. Кроме того, материалы диссертации могут быть использованы в исследовательских проектах, связанных с бюджетными сенсорными системами, роботами для аварийно-спасательных работ и экспериментальными стендами реконфигурируемых механизмов.

### **Основные публикации, отражающие содержание диссертации**

Основные результаты исследования опубликованы в 20 научных работах, включая публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, статьи в журналах, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science, публикации в изданиях, индексируемых в РИНЦ, а также охраняемые результаты интеллектуальной деятельности: патенты Российской Федерации на полезную модель и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Представленный перечень публикаций в достаточной степени отражает содержание диссертационной работы и подтверждает апробацию результатов исследования.

Автореферат в целом раскрывает основные положения, результаты и выводы диссертации, а также соответствует структуре и содержанию представленной работы.

### **Замечания по диссертационной работе**

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В разделе 2.2, который называется «Многокритериальная оптимизация параметров механизма» задача фактически подменяется задачей однокритериальной оптимизации, где комплексный критерий качества

получается в результате аддитивной свёртки нескольких критериев с заданными весовыми коэффициентами. Это приводит к типовой проблеме: решение целиком зависит от выбора весовых коэффициентов, но как выбирать эти коэффициенты – не понятно. А полученное таким образом решение является не более обоснованным, чем любое другое решение, которое можно получить с другими значениями весовых коэффициентов.

2. Экспериментальная проверка подтверждает основные положения диссертации, однако отсутствуют статистические показатели повторяемости экспериментов и доверительные интервалы измеренных параметров. В целом, расширение программы испытаний за счет большего набора типов препятствий, наклонных поверхностей и статистической обработки серии повторных заездов позволило бы более полно оценить эксплуатационную надежность предложенного решения.

3. Алгоритм активного ультразвукового сканирования показал работоспособность на экспериментальном образце, вместе с тем в работе недостаточно подробно рассмотрены предельные случаи его применения поверхности со слабым отражением сигнала, сложная геометрия препятствий, паразитные отражения, акустические помехи, зависимость от температуры окружающей среды и других параметров.

Указанные замечания носят уточняющий и рекомендательный характер, не ставят под сомнение основные научные результаты и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

### **Соответствие диссертации научной специальности**

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 2.5.4 - Роботы, мехатроника и робототехнические системы, в том числе: п. 5 - Методы, алгоритмы, программные и аппаратные средства управления роботами, робототехническими и мехатронными системами, включая адаптивное, оптимальное, 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, многосреднего и космического применения. Работа непосредственно связана с задачами анализа, синтеза, моделирования, проектирования и экспериментальной проверки робототехнических систем с изменяемой конфигурацией.

