

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу  
У Цюе

на тему «Разработка и исследование автономного гусенично-колесного реконфигурируемого робота», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.4. - Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

### **Актуальность темы исследования**

В настоящее время в мире наблюдается взрывной рост применения робототехнических устройств, в том числе мобильных роботов. К их числу относятся наземные робототехнические комплексы, способные выполнять разведку и доставку грузов в опасных и труднодоступных зонах без риска для человека. Традиционные колесные и гусеничные платформы имеют существенные ограничения для решения данных задач. Колесные роботы отличаются высокой скоростью и энергоэффективностью, но теряют проходимость на сыпучих грунтах и при преодолении вертикальных препятствий. Гусеничные платформы обеспечивают лучшее сцепление и устойчивость, однако уступают в маневренности и требуют больших энергетических затрат. Перспективным направлением решения данной проблемы является создание реконфигурируемых мобильных роботов, способных изменять геометрию шасси в зависимости от условий рельефа. Однако, существующие решения как правило не обеспечивают жесткой фиксации конструкции, из-за чего значительные нагрузки воспринимаются электроприводами, снижая надежность системы и повышая энергозатраты приводов. Для автономной навигации мобильных роботов нередко применяются сложные средства технического зрения, требующие значительных вычислительных мощностей, что ограничивает их использование в малогабаритных роботах. Таким образом, решаемая в работе задача создания надежной, энергоэффективной и сравнительно недорогой мобильной платформы, способной преодолевать препятствия при минимальном наборе сенсоров, несомненно является крайне актуальной.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, обеспечивается применением совокупности взаимодополняющих теоретических, расчетно-аналитических, численных и экспериментальных методов, адекватных поставленным задачам исследования в области робототехнических и мехатронных систем. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием

методов теоретической механики, теории механизмов и машин, кинематического, квазистатического и динамического анализа, методов синтеза и исследования систем автоматического управления, параметрической оптимизации и имитационного моделирования, а также экспериментальной апробацией разработанных конструктивных и алгоритмических решений на действующем образце гусенично-колесного реконфигурируемого робота. Дополнительным подтверждением корректности полученных выводов является согласованность результатов математического моделирования с данными натурных испытаний, реализация разработанных алгоритмов в программной среде Arduino IDE на языке C++, применение MATLAB/Simulink для анализа динамики приводов и системы управления, а также экспериментальная проверка точности активного сканирования, эффективности геометрической блокировки и устойчивости управления реконфигурацией в условиях нелинейностей и внешних возмущений

### **Научная новизна исследований**

*В качестве научных результатов диссертации* выдвинуты следующие положения:

- разработана 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 не за счет движения штоков линейных приводов, а силовым контуром механических упоров.

- разработана архитектура системы управления робота с интегрированным модулем автоматического восстановления работоспособности, реализованная на базе иерархических конечных автоматов.

- разработан алгоритм активного вертикального сканирования препятствий с использованием одной управляемой степени свободы по информации ультразвукового дальномера для построения профиля высоты объекта.

- синтезирован алгоритм управления электроприводами механизма реконфигурации в режиме насыщения управляющего сигнала, основанный на нелинейной модели динамики с учетом сухого трения в телескопических приводах.

### **Теоретическая и практическая значимость результатов исследований**

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии методов проектирования и управления мобильными реконфигурируемыми робототехническими системами, предназначенными

для движения в сложных и неструктурированных средах. В рамках исследования разработаны математические модели кинематики и квазистатики механизма реконфигурации, предложена методика параметрической оптимизации его геометрических параметров с учетом эффекта механической блокировки, а также синтезированы алгоритмы активного вертикального сканирования препятствий и управления электроприводами в условиях сухого трения, люфтов и насыщения управляющего сигнала. Полученные теоретические положения расширяют научно-методическую базу проектирования гусенично-колесных робототехнических комплексов с изменяемой геометрией шасси.

Практическая значимость работы определяется разработкой конструктивных, алгоритмических и программно-аппаратных решений для создания автономного гусенично-колесного реконфигурируемого робота, способного выполнять движение и преодоление препятствий в условиях ограниченной сенсорной информации. В диссертации создан экспериментальный образец мобильного робота, реализованы алгоритмы управления на базе микроконтроллерной платформы Arduino Mega 2560, разработан механизм геометрической блокировки, позволяющий снизить энергопотребление в режиме удержания, а также подтверждена возможность автономного определения параметров препятствий и их преодоления с использованием активного ультразвукового сканирования.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при проектировании малогабаритных разведывательных, транспортных и поисково-спасательных робототехнических комплексов, предназначенных для эксплуатации в труднодоступных и опасных зонах. Теоретические и практические результаты исследования внедрены в учебный процесс кафедры «Автоматика и управление» Московского Политеха. Реализовано применение полученных в диссертационной работе результатов в проектно-конструкторской и производственной деятельности ООО «РобоКомпонент» г. Москва.

Теоретические положения диссертационной работы и результаты экспериментальных исследований внедрены и используются в учебном процессе при подготовке студентов и магистров по направлению подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» - профиль программы «Технология машиностроения» и направлению подготовки 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» - профиль программы «Робототехника и искусственный интеллект». Реализовано применение полученных в диссертационной работе результатов в проектно-конструкторской и производственной деятельности ООО «Протезное предприятие» (г. Курск).

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** обеспечивается проведением аналитических, имитационных и экспериментальных исследований с использованием современных методов механики, мехатроники и теории автоматического управления,

подтверждается сходимостью расчетных, модельных и натурных результатов, а также согласуется с известными положениями российских и зарубежных исследований в области мобильных реконфигурируемых робототехнических систем. Представленные в работе экспериментальные данные получены на действующем образце гусенично-колесного реконфигурируемого робота и подкреплены теоретическим обоснованием, математическим моделированием и проверкой работоспособности разработанных алгоритмов управления, активного сканирования и механизма геометрической блокировки.

Основные положения работы опубликованы в 20 публикациях, в том числе 3 статьи в центральных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи в изданиях, индексируемых базами Web of Science и Scopus, 11 статей в изданиях, индексируемых в РИНЦ, получены 2 патента РФ на полезную модель, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.5.4. - Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

В автореферате изложены основные идеи и выводы диссертации. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации и удовлетворяет всем пунктам «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г.

### **Структура и содержание работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений; работа изложена на 159 страницах, включает 7 таблиц, 51 рисунок и 6 приложений, список литературы содержит 106 источников.

Структура диссертационной работы логично соответствует поставленной цели и решаемым задачам, а ее содержание последовательно отражает этапы исследования: от анализа существующих мобильных робототехнических платформ и постановки научно-технической задачи до разработки математических моделей, алгоритмов управления, создания экспериментального образца и проверки его работоспособности. Работа изложена научным и достаточно доступным языком, содержит графические материалы, таблицы, расчетные зависимости и результаты экспериментов, позволяющие наглядно представить полноту проведенных исследований и обоснованность полученных результатов.

В первой главе выполнен анализ современного состояния проблемы создания мобильных робототехнических комплексов для работы в сложных и неструктурированных средах, рассмотрены колесные, гусеничные и шагающие платформы, проведено сравнение их преимуществ и ограничений, а также обоснована необходимость разработки реконфигурируемого гусенично-колесного робота с изменяемой геометрией шасси. Кроме того,

рассмотрены архитектуры систем управления мобильными роботами, включая централизованные, иерархические, модульные и гибридные схемы, сформулированы требования к системе управления реконфигурируемой платформой и определены основные научно-технические задачи исследования.

Во второй главе представлена разработка математической модели кинематики и квазистатики механизма реконфигурации робота, описывающей взаимосвязь между ходом линейного привода, положением рычажных звеньев и возникающими силовыми нагрузками. Выполнена многокритериальная оптимизация геометрических параметров механизма с учетом требований к компактности, снижению нагрузок на привод и обеспечению механической блокировки в крайних положениях. Также предложена конструктивная схема механизма реконфигурации, проведен динамический анализ его работы и обоснована возможность снижения энергопотребления за счет передачи нагрузок на силовой контур механических упоров.

В третьей главе разработана архитектура системы управления механизмом реконфигурации, включающая верхний уровень логики на основе конечного автомата и нижний уровень локального управления исполнительными приводами. Рассмотрены математические модели активного вертикального сканирования препятствий с использованием ультразвукового дальномера, выполнен анализ погрешностей акустической локации и дискретизации сигналов энкодеров, а также синтезированы алгоритмы управления реконфигурацией. Проведено математическое и имитационное моделирование системы управления в среде MATLAB/Simulink, исследованы временные и частотные характеристики, устойчивость контуров управления, работа тягового электропривода и влияние нелинейностей, включая сухое трение, зазоры и насыщение управляющего сигнала.

В четвертой главе приведены результаты цифрового проектирования и разработки экспериментального образца гусенично-колесного реконфигурируемого робота, описаны его конструктивные узлы, система приводов, датчиков и микроконтроллерного управления. Выполнены метрологические исследования ультразвуковой навигационной системы, позволившие определить рабочие диапазоны и ограничения датчика при измерении параметров препятствий. На основе полученных данных реализованы программные алгоритмы активного сканирования и управления реконфигурацией, после чего проведены экспериментальные испытания робота, подтвердившие работоспособность предложенных технических решений, эффективность механической блокировки, снижение энергопотребления в режиме удержания и возможность автономного преодоления вертикальных препятствий.

Главы диссертации заканчиваются соответствующими выводами, в заключении работы представлены основные результаты и рекомендации.

Материалы диссертационной работы и автореферата изложены грамотным техническим языком.

Автореферат полностью раскрывает содержание диссертационной работы.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В обзоре приведены примеры известных роботов с реконфигурируемым шасси, однако не описано, как у них решались задачи управления реконфигурацией

2. Работа существенно выиграла, если бы в ней были приведены результаты оптимизации размеров шасси для роботов разных габаритов.

3. Точность ультразвуковых локаторов существенно зависит не только от температуры атмосферного воздуха, но и от других его свойств (давление, влажность, скорость ветра), однако их влияние на погрешность измерения препятствий в работе не рассмотрена.

4. В алгоритме активного сканирования и реконфигурации (рис. 3.2) блок-терминатор «Конец» имеет выход, что является нарушением ГОСТ 19.701.

5. При разработке модели робота не рассмотрена возможность применения в шарнирных соединениях подшипников качения.

6. Работа имеет ряд опечаток и неточностей: при отделении десятичной дробной части у чисел часто вместо запятой используются точки, плохо читаемы некоторые графики, отсутствуют подписи у некоторых рисунков, имеются некоторые отклонения от стандартов при оформлении списка литературы и т.д.

Замечания и отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертации. Диссертационная работа У Цюе является законченной работой, выполненной самостоятельно на должном уровне.

### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

Диссертационная работа У Цюе «Разработка и исследование автономного гусенично-колесного реконфигурируемого робота» соответствует областям исследований, указанным в пунктах 1, 4 и 11 паспорта специальности 2.5.4 -Роботы, мехатроника и робототехнические системы: п. 1. Развитие теоретических основ и методов анализа, структурного и параметрического синтеза и автоматизированного проектирования роботов и робототехнических систем; п. 4. Математическое и полунатурное моделирование мехатронных и робототехнических систем, включая взаимодействие со средой, анализ их характеристик, оптимизация и синтез по результатам моделирования; п. 11. Методы и средства автоматизированного проектирования, анализа и оптимизации роботизированных систем,

комплексов, ячеек и линий. Исследование, повышение эффективности и безопасности эксплуатации автоматизированных технологических процессов, создаваемых на базе робототехнических и мехатронных систем.

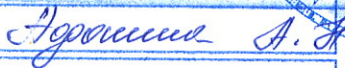

Диссертационная работа имеет научную и практическую значимость в рассматриваемой области исследований, является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне. Основные ее результаты опубликованы в 20 статьях и прошли апробацию на международных и всероссийских научных конференциях.

Диссертационная работа соответствует пунктам 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г., а ее автор, У Цое, достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.4. - Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

**Официальный оппонент:**

Доктор технических наук  
(специальность 05.02.07  
Технология и оборудование  
механической и физико-  
технической обработки), доцент,  
профессор кафедры  
информационных  
робототехнических систем ФГАОУ  
ВО «Белгородский национальный  
государственный исследовательский университет».



Личную подпись удостоверяю Специалист отдела кадрового обеспечения Управления организационного и и кадрового обеспечения	
	 20 » 05 2026 г.

Афонин Андрей Николаевич

«20» мая 2026 г.

**Контактная информация:**

308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

Телефон: +7 (953) 619-18-21

E-mail: afonin@bsuedu.ru