

## Отзыв официального оппонента

кандидата технических наук, старшего научного сотрудника, Семенова Евгения Александровича на диссертационную работу У Цюе «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 диссертации

В связи с большим количеством природных и техногенных чрезвычайных ситуаций в настоящее время важной значимой задачей является обеспечение безопасности и эффективности проведения восстановительных и поисково-спасательных работ. В условиях разрушенной городской инфраструктуры, завалов, пожаров и радиационного загрязнения выполнение операций человеком сопряжено с недопустимым риском. Для решения этих задач целесообразно применение мобильных роботизированных комплексов, способных выполнять инженерную разведку, разборку завалов и доставку технологического оборудования и грузов в неструктурированной окружающей обстановке. Современная робототехника движется в направлении создания реконфигурируемых мобильных роботов, которые способны адаптировать свою геометрию и кинематику к условиям местности. Мировая практика подтверждает актуальность этого подхода. Однако на пути его реализации стоят следующие научно-технические вызовы:

- Проблема механической конструкции. Многие существующие решения совмещают движители без жесткой фиксации. В результате вся весовая и динамическая нагрузка приходится на валы электроприводов, что снижает надежность и сокращает ресурс системы.

- Высокие затраты на навигацию. Для автономной навигации и управления трансформацией часто требуются дорогостоящие и энергоемкие системы технического зрения. Это делает невозможным создание экономичных малогабаритных роботов для широкого применения.

В связи с изложенным, актуальной научной задачей выступает разработка теоретической базы и конструктивных решений для мобильных реконфигурируемых роботов. В таких системах высокая проходимость и энергоэффективность достигаются посредством внедрения механизма с системой геометрической блокировки, а автономность обеспечивается за счет применения интеллектуальных алгоритмов технического зрения. Последние базируются на активном сканировании окружающей среды и адаптивном управлении приводами в условиях неопределенности. Таким образом, актуальность темы диссертационной работы, посвященной решению указанных проблем, не вызывает сомнений.

### **Структура и содержание диссертации**

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

Основное содержание диссертации 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.

*В первой главе* автором проведен анализ современного состояния проблемы. Показано, что традиционные мобильные роботы не обладают

достаточной универсальностью для эффективного применения в спасательных операциях. Преодоление данного ограничения возможно посредством разработки реконфигурируемых платформ, широкое внедрение которых на текущий момент сдерживается недостаточной надежностью механических узлов и высокой сложностью систем управления. Дается обоснование применения гибридной архитектуры системы управления, интегрирующей иерархическое планирование с реактивным поведением модулей нижнего уровня. Такой подход позволяет минимизировать задержки при стабилизации неустойчивых режимов трансформации. Математически сформулирована задача реконфигурации робота как процесс динамического управления опорным многоугольником, обеспечивающий выполнение условия устойчивости. На основе анализа энергетического функционала доказана целесообразность применения механизма с геометрической блокировкой. Реализация данного решения позволяет перевести систему в режим, существенно снижающий нагрузку на приводы и общее энергопотребление.

*Во второй главе* рассмотрена задача проектирования и синтеза электромеханической системы реконфигурации. На основе теоретического анализа и имитационного моделирования разработана математическая модель кинематики и квазистатики системы. Получены аналитические зависимости, 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. Проведена многокритериальная оптимизация параметров. С использованием аддитивной свертки критериев определен оптимальный вектор геометрических размеров звеньев механизма реконфигурации. Обоснован выбор стандартного линейного привода с ходом, обеспечивающего требуемый угол подъема шасси при минимизации пиковых усилий.

Выполнена верификация динамических характеристик. Имитационное моделирование в среде MATLAB показало, что выбранный привод обеспечивает время полной трансформации 4,0 с при номинальной скорости 12,5 мм/с. Выявленное динамическое запаздывание 0,2 с носит прогнозируемый характер и не препятствует точному позиционированию.

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

Теоретически доказано, что переход механизма в сингулярную точку снижает требование к удерживающему моменту практически до нуля. Это открывает возможность применения стратегии управления с насыщением, разработка и исследование которой являются предметом следующей главы 3.

*В третьей главе* рассмотрена задача синтеза, теоретического анализа и экспериментальной верификации системы управления мобильным реконфигурируемым роботом. Разработана архитектура системы управления, включающая верхний уровень режимной логики на базе конечного автомата и нижний уровень локальных контуров управления исполнительными механизмами. В структуру введен модуль автоматического восстановления работоспособности. Он реализован на основе специальных диагностических состояний и возвратных переходов конечного автомата, активируемых при сбоях позиционирования; превышении допустимого времени выполнения операций и при рассогласовании приводов. Модуль обеспечивает автономный выход робота из аварийных режимов без участия оператора.

Предложен метод активного сканирования среды с алгоритмом вертикального сканирования, использующим подвижный ультразвуковой сенсор. Математическое моделирование подтвердило, что метод устраняет

«слепые зоны» стационарных датчиков и позволяет с высокой точностью (погрешность  $< 1,2$  мм) определять высоту препятствий для автоматического расчета целевой конфигурации шасси. Синтезирована архитектура системы управления реконфигурацией с обоснованной декомпозицией задачи управления на два независимых канала: угол наклона и вылет штока. Частотный анализ и построение годографа Найквиста подтвердили достаточные запасы устойчивости системы, обеспечивающие апериодический характер переходных процессов без перерегулирования. Выполнен сравнительный анализ стратегий управления. Нелинейный динамический анализ доказал преимущество стратегии с высоким коэффициентом усиления в условиях ограничений на управление перед классическими линейными законами. Предложенный подход эффективно преодолевает зону нечувствительности привода и устраняет статическую ошибку позиционирования, недостижимую для линейных регуляторов при наличии сухого трения. Разработана и верифицирована имитационная модель в среде MATLAB/Simulink, учитывающая физические ограничения драйверов и кулоновское трение. Сопоставление результатов моделирования с натурными экспериментами показало высокую степень сходимости, что подтверждает корректность проведенных расчетов.

*В четвертой главе* приводятся результаты экспериментальной проверки разработанных теоретических моделей и алгоритмов. Для проведения экспериментальных исследований и верификации теоретических положений спроектирован и изготовлен полнофункциональный экспериментальный макет мобильного робота. Перед изготовлением макета выполнено цифровое проектирование и валидация конструкции. Рассмотрены вопросы проектирования конструктивных узлов системы реконфигурации шасси на основе методов автоматизированного проектирования, а также уточнение геометрических параметров механизма, полученных в результате многокритериальной оптимизации, с учетом технологичности изготовления, собираемости узлов и обеспечения требуемой жесткости конструкции при

минимальной массе, что позволило подтвердить реализуемость компоновки и исключить интерференции элементов в диапазоне рабочих перемещений.

Проведено метрологическое исследование характеристик ультразвуковой навигационной системы в составе робота. Выявлены зоны динамической неустойчивости ультразвукового датчика. Экспериментально доказана эффективность алгоритма «Stop-and-Scan», обеспечивающего точность измерения высоты  $\pm 2$  мм.

Разработан конечный автомат для координации работ сенсоров и приводов, обеспечивая автономное принятие решений. Алгоритм синхронизации приводов (Cross-Coupling) компенсирует механические люфты, удерживая перекося рамы в пределах  $1^\circ$ .

Экспериментальные исследования системы управления роботом доказали, что введение малой интегральной составляющей в дополнение к высокому пропорциональному усилению позволяет полностью устранить остаточную статическую ошибку. Система обеспечивает субмиллиметровую точность реконфигурации, достаточную для преодоления лестничных маршей и сложных препятствий.

Экспериментальные исследования подтвердили тот факт, что механизм геометрической блокировки эффективно функционирует, а биметаллическая конструкция (сталь/алюминий) обеспечила необходимую жесткость системы телескопических опор для обеспечения безопасности.

### **Научная новизна работы**

1. Разработана методика 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, что гарантирует высокую конструктивную жесткость платформы и защиту

гибридной силовой установкой и изменяемой геометрией шасси.

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

**Обоснованность научных положений, выводов и практических рекомендаций** определяется использованием проверенных научных и экспериментальных методов, в частности, методов теоретической механики и теории механизмов и машин, методов классической и нелинейной теории автоматического управления, методов математического моделирования, алгоритмизации и программирования. Экспериментальные методы включали проведение натурных испытаний на разработанном физическом макете робота. Осуществлялась верификация точности позиционирования механизма, проверка адекватности математических моделей и оценка эффективности предложенных алгоритмов в реальных условиях эксплуатации.

**Личный вклад соискателя в разработку научной проблемы.** Все положения и выводы, содержащиеся в диссертации и выносимые на защиту, разработаны соискателем лично, имеют научную новизну, практическую, экономическую и социальную значимость. Имеется публикация без соавторов, а также публикации, где соискатель является главным автором (соискатель первый в списке соавторов работы).

### **Замечания**

1. На с. 16 указывается, что обеспечивается адаптация кинематической структуры робота к текущему рельефу. Однако, отсутствует сравнительная иллюстрация, для каких поверхностей перемещения и для каких препятствий какая конфигурация робота наиболее

подходит.

2. На рис. 4.21 в составе робота используются два ультразвуковых дальномера. Не пояснено, чем вызвана необходимость применения второго дальномера.
3. В разделе 4.3 «Метрологическое исследование характеристик ультразвуковой навигационной системы» приведены результаты серии экспериментов по оценке влияния формы препятствия на точность измерений проводилась для объектов с различными радиусами кривизны. Желательно было бы также выявить влияние скругленных форм верхнего края препятствия, так как это может влиять на точность определения высоты препятствия при ультразвуковой локации.
4. Не приведены классы точности средств измерения при экспериментальных исследованиях, в частности, оптического энкодера и ультразвукового дальномера.

Следует отметить, что высказанные выше замечания не влияют на общую положительную оценку проведенного автором исследования.

## **Заключение**

Диссертационная работа У Цюе на тему «Разработка и исследование автономного гусенично-колесного реконфигурируемого робота» представляет собой самостоятельную, структурированную и законченную научно-исследовательскую работу, направленную на решение актуальной задачи, имеющей существенное значение для отрасли знаний.

Основные результаты диссертационной работы соответствуют поставленной цели, являются новыми и имеют теоретическую и практическую значимость. Ключевые результаты работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий,

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, предложенный подход позволяет реализовать 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.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение для встраиваемых систем управления, включающее модули активного вертикального сканирования среды и автоматического восстановления работоспособности.

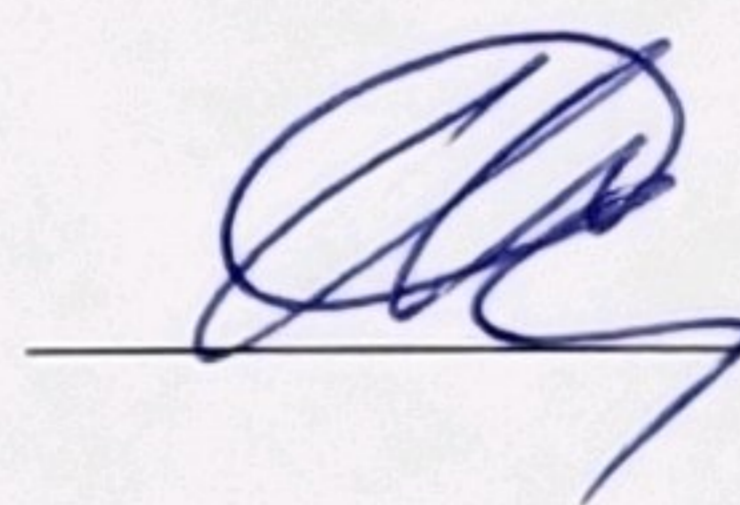
2. Создан действующий экспериментальный образец мобильного робота с

рекомендованных ВАК. Используемые в работе методы исследования являются корректными, а выводы обоснованными.

В связи с вышеизложенным, считаю, что диссертационная работа У Цюе «Разработка и исследование автономного гусенично-колесного реконфигурируемого робота», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.4 - «Роботы, мехатроника и робототехнические системы», соответствует критериям п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ «О порядке присуждения ученых степеней» от 24.09.2013 №842, а автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.4 - «Роботы, мехатроника и робототехнические системы».

**Официальный оппонент:**

Кандидат технических наук,  
(специальность 05.02.03 системы приводов) старший научный сотрудник лаборатории робототехники и мехатроники Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН



Е.А. Семенов  
«18» мая 2026 г.

**Контактная информация:**

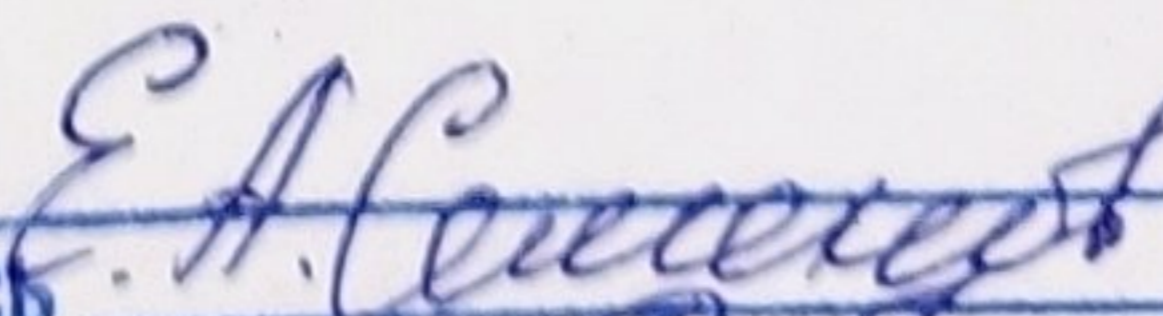
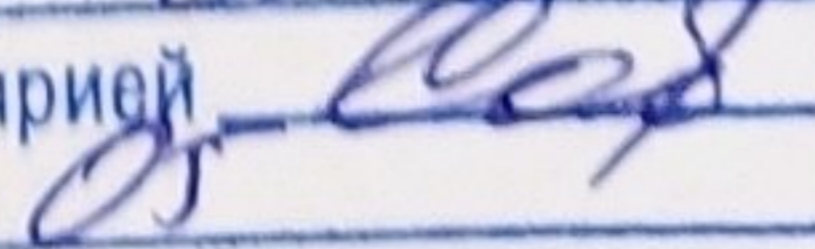
119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Телефон: +7 (495) 433-77-66

E-mail: im1166@yandex.ru



подпись		ЗАВЕРЯЮ:
Зав. Канцелярией		И.А. Сафронова
18		2026 г.