

## ОТЗЫВ

### официального оппонента

на диссертацию *Бордюгова Дениса Владимировича* на тему

«Управление движением опорных элементов мобильных роботов с изменяемой внутренней конфигурацией», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы

Диссертационная работа Бордюгова Д.В. посвящена разработке конструкций и исследованию управляемого движения мобильных роботов, перемещение которых осуществляется благодаря вращению внутренних масс и согласованному изменению точек опоры корпуса робота с поверхностью, по которой происходит перемещение. Конструктивно предлагаемые соискателем кинематические схемы мобильных роботов, комбинируют механизмы приведения в движение роботов, дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью, и механизмы изменения внутреннего кинетического момента и положения центра масс системы, что используется для приведения в движение капсульных мобильных роботов. Рассматриваемый в работе тип мобильных роботов существенно повышает энергетическую эффективность, точность перемещения и расширяет возможности практического применения капсульных мобильных роботов. Поэтому **актуальность диссертационного исследования** Бордюгова Д.В. не вызывает сомнений.

В диссертации Бордюгова Д.В. представлены результаты, имеющие **научную новизну и практическую значимость**, заключающиеся в разработке математических моделей, описывающих движение мобильных роботов при вращении тел, расположенных внутри корпуса, с постоянной угловой скоростью и не взаимодействующих с опорной поверхностью, и управляемом изменении точек опоры с подстилающей поверхностью; сформулированы алгоритмы управления узлами опор, обеспечивающие при заданных угловых скоростях вращения внутренних масс, движение мобильного робота вдоль заданной траектории; для определения конструктивных требований к линейному приводу, обеспечивающему не проскальзывание одной из опор, предложен метод расчета необходимых усилий,

обеспечивающих поступательное движение мобильного робота вдоль направляющей; получены результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие возможность и эффективность движения прототипов разрабатываемых типов мобильных роботов. Полученные результаты характеризуются **практической значимостью** для направления разработки конструкций данного типа мобильных роботов, включая разработку полезных нагрузок в различных сферах применения.

**Обоснованность и достоверность научных положений и выводов** подтверждается результатами натурных экспериментов, полученных с помощью специально разработанных и созданных экспериментальных прототипов мобильных роботов, а также сопоставлением полученных результатов с исследованиями других авторов. В ходе проведения экспериментальных исследований соискателем использовались хорошо известные современные методы захвата и восстановления движения робототехнических систем.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, а также одного приложения, в котором приведен акт внедрения результатов диссертационной работы. Содержание работы изложено на 134 страницах.

**Во введении** обоснована актуальность изучаемой проблемы, сформулирована цель и определен круг решаемых задач, описана научная новизна, значимость работы, изложены положения, выносимые на защиту.

**В первой** главе диссертации проводится обзор существующих конструкций мобильных роботов с учетом показателей, характеризующих конструктивные и эксплуатационные свойства при перемещении по плоскому основанию, а также приводится классификация мобильных роботов по типу применяемых движителей. Особое внимание соискателем уделяется описанию и обзору шагающих и капсульных (с подвижными внутренними массами) мобильных роботов.

**Вторая глава** посвящена описанию конструкции и принципа перемещения мобильного робота, представляющего собой корпус с выдвижными опорными стойками, внутри которого с постоянной скоростью вращается твердое тело. Описан алгоритм программного движения мобильного робота. Получены уравнения, описывающие динамику движения мобильного робота по горизонтальной плоской поверхности в виде уравнений Лагранжа второго рода, а также при его движении по плоскости имеющей наклон к горизонту. С помощью полученных уравнений движений проведено

моделирование динамики при заданных массо-инерционных и геометрических параметрах мобильного робота, которое позволило проанализировать возможные траектории движения и сформулировать алгоритмы переключения (выдвижения) опорных стоек для обеспечения движения вдоль требуемой траектории. Кроме этого, в данной главе сформулирована задача многокритериальной оптимизации энергии, расходуемой на организацию движения, в зависимости от режима движения и массо-инерционных параметров мобильного робота.

**Третья глава** посвящена теоретическим исследованиям отдельной конструкции мобильного робота, содержащего две вращающиеся массы и две опоры, управляемого фиксирующиеся относительно направляющей, вдоль которой робот способен совершать движение. Рассмотрены расчетные схемы, характеризующие положение элементов рассматриваемой конструкции в процессе движения с учетом наклона направляющей, вдоль которой осуществляется движение. Определены усилия, необходимые для реализации движения мобильного робота при заданных массо-геометрических параметрах.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям разработанных и изготовленных прототипов мобильных роботов. Описаны конструкции двух экспериментальных прототипов: мобильного робота с четырьмя выдвижными опорными стойками и постоянно вращающейся внутренней массе; и мобильного робота с двумя вращающимися массами и двумя управляемо заклиниваемыми опорами, перемещающегося по направляющей. Приведены результаты экспериментальных исследований в виде отдельных траекторий и их сравнение с результатами моделирования.

В **заключении** выделены основные результаты работы. Итогом работы является экспериментальное подтверждение работоспособности предложенных конструкций мобильных роботов и подходов к управлению их движением.

Содержание диссертации соответствует пунктам 4, 8 паспорта специальности 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы. Основные результаты диссертации в полной мере опубликованы: 7 статей в журналах входящих в перечень рекомендованных ВАК, 4 статьи в рецензируемых сборниках трудов международных конференций, индексируемых в Scopus, 9 статей в сборниках трудов конференций, индексируемых РИНЦ. Автором, в составе коллектива, также получен патент на



полезную модель «Мобильный робот». Полученные в рамках диссертационной работы результаты исследования в полной мере прошли апробацию на всероссийских и международных научно-технических конференциях.

По работе имеются следующие **замечания**:

1. Отсутствие кинематических схем, разрабатываемых и исследуемых робототехнических систем в диссертационной работе затрудняет восприятие материала.

2. При исследованиях динамики движения в модели не учитывалась сила трения, возникающая в опорах качения, а также не оценивалась вероятность отрыва опор от поверхности (потеря контакта) при движении робота по поверхности.

3. Сравнение затрат энергии капсульным роботом и роботом дискретно взаимодействующим с поверхностью в разделе 4.2 описано не достаточно подробно. Сложно сопоставить массы роботов, их геометрические размеры, перемещение. Не понятно, почему данная информация размещена в разделе, посвященном экспериментальным исследованиям.

4. Сравнения экспериментальных траекторий движения с результатами моделирования приведены только для одного эксперимента (см. рис. 4.6).

5. В главе посвященной экспериментальным исследованиям не достаточно подробно приведены статистические данные о проведенных экспериментах, нет информации о повторяемости и доверительных интервалах. Не ясно для каких условий получена погрешность для экспериментов, описанных в разделе 4.3.

6. За рамками исследований остался важный вопрос с точки зрения практического использования данного типа мобильных роботов, заключающийся в оценке способности роботов перемещать полезную нагрузку.

В целом, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования и не мешают проводить оценку научной новизны и уровня проведенных научных исследований.

Автореферат диссертации правильно и полно отражает ее содержание.

Особенно важно отметить, что соискателем были созданы экспериментальные прототипы и проведены многочисленные экспериментальные исследования, подтвердившие работоспособность конструкции, возможность и эффективность ее движения. Полученные характеристики движения сравнивались с результатами

моделирования современных исследователей, и продемонстрировали сопоставимые показатели скорости с ведущими отечественными и зарубежными аналогами.

Диссертационная работа Бордюгова Дениса Владимировича на тему «Управление движением опорных элементов мобильных роботов с изменяемой внутренней конфигурацией», является законченной научно-квалификационной работой и представляет решение актуальных задач, в полной мере соответствует п.п. 9-11, 13-14 Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Бордюгов Денис Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

Официальный оппонент,  
профессор кафедры  
«Мехатронные системы»  
ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени  
М. Т. Калашникова»,

доцент, доктор технических наук

1051

Караваяев Юрий Леонидович

01.12.2025

Дата

Докторская диссертация защищена по специальности 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

Место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Адрес: 426069, Приволжский ФО, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7

Телефон: +7 (3412) 776055

Электронная почта: karavaev\_yury@istu.ru

Подпись д.т.н., доцента Караваяева Ю.Л. удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого совета ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», д.п.н., доцент

« 05 » ЛИСТОВ	Вх. № 05 - 65 - 191 « 03 » 12 2025 г. ВолгГТУ
------------------	---



*Handwritten signature*

Э.Г. Крылов

*С отзывом ознакомлен*  
03.12.2025. *Handwritten signature*