

*В диссертационный совет 24.2.282.07
при ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет»*

**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

05/1
01.12.2025

Караваев Юрий Леонидович

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 Караваева Ю.Л. удостоверяю:

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

Э.Г. Крылов

« 05 »	Вх.№ 0.5 - 65 - 191
листов	
« 03 »	12 2025.
ВолГГТУ	



Составлено комиссией
03.12.2025. *Бордюгов*