



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279, ОКПО 02068574
ул. Политехническая, д. 29 литера Б,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,
г. Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)552-60-80, office@spbstu.ru

на № 18.11.2025 № 10/11
05-67-86 от 24.10.2025

УТВЕРЖДАЮ
первый проректор по научной работе
федерального государственного
автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН
Сергеев Виталий Владимирович



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

На диссертационную работу

Бордюгова Дениса Владимировича

«Управление движением опорных элементов мобильных роботов с
изменяемой внутренней конфигурацией», представленную в
диссертационный совет 24.2.282.07 на соискание ученой степени кандидата
технических наук по научной специальности 2.5.4 Роботы, мехатроника и
робототехнические системы

Актуальность темы диссертационной работы

Перспективными с точки зрения методов организации движения могут
быть мобильные роботы, конструкция которых включает движители,
расположенные на корпусе робота и дискретно взаимодействующие с
поверхностью, и подвижное внутреннее тело. В этом случае силы реакции,
приложенные к корпусу, создаются за счет генерируемой приводом силы,
приложенной к внутренней массе. Отличительной особенностью движения
таких роботов является отсутствие проскальзывания опорных элементов по
поверхности, так как в процессе перемещения робота обеспечивается их
«жесткая фиксация» в точке контакта с поверхностью. Это позволяет
минимизировать потери энергии на трение и повысить устойчивость при
движении робота.

005168

Диссертационная работа Д.В. Бордюгова посвящена актуальной проблеме разработки и обоснования алгоритмов временной последовательности смены взаимодействующих с поверхностью опорных элементов мобильного робота при стационарном движении внутренних тел и заданном программном перемещении робота. Исследование носит поисковый характер и направлено на развитие теоретических основ управления движением роботов, как механических систем с изменяемой структурой голономных связей.

Содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, включающих 16 параграфов, и заключения. Список использованной литературы включает 112 наименований. Общий объем диссертационной работы 134 страницы.

Во введении раскрывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, определяются его цель и ключевые задачи. Сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы, основные положения, выносимые на защиту. Описываются использованные методы исследования и аргументируется достоверность достигнутых результатов. Приводятся данные об апробации исследования, вкладе автора в разработку темы, публикациях по теме диссертации, а также сведения о её структуре и объёме.

В первой главе определены тенденции применения наиболее простых по конструкции движителей, но обеспечивающих высокую маневренность при движении роботов по гладким, шероховатым поверхностям без проскальзывания по ним, выявлены их недостатки. Проанализированы существующие варианты мобильных роботов с подвижными внутренними телами. В результате выполненного обзора автор предложил конструкции роботов, включающие в себя совместное использование подвижного тела, находящегося внутри корпуса, и опорных стоек, накладывающих ограничение на перемещение робота при его движении по плоским и цилиндрическим

поверхностям. На основании сделанных выводов сформулированы актуальность и задачи исследования.

Во второй главе разработаны расчетные схемы мобильных роботов с опорными стойками и одним или несколькими внутренними телами, совершающими вращательное движение. Представлены математические модели динамики движения, позволяющие устанавливать характерные закономерности изменения кинематических и силовых параметров в процессе взаимодействия опорных элементов с поверхностью.

В главе подробно рассмотрено влияние движения внутренних тел на перемещение робота. Автором обоснованы принципы формирования управляющих воздействий на основе введения ограничений на перемещение отдельных точек робота.

Предложен метод планирования движения мобильного робота с опорными стойками и вращающимся внутренним телом по плоским поверхностям, обеспечивающий оптимальность по показателям скорости перемещения, устойчивости и минимизации отклонения центра масс корпуса от заданной программной траектории при движении робота из начальной точки в окрестности конечной. Отдельное внимание уделено вопросам выбора алгоритма управления опорными элементами.

В третьей главе решена задача определения необходимых усилий, развиваемых линейным приводом, позволяющих осуществлять заданное перемещение мобильного робота с опорными втулками, работающими на эффекте периодического заклинивания, по различно ориентированным направляющим.

Развиваемые линейным приводом усилия определяются с учётом коэффициентов трения в периферийной и внутренней поверхностях втулки, её геометрических параметров, значения силы сопротивления, угла наклона направляющей, расположения привода, и таким образом, чтобы в цикле работы линейного актуатора обеспечивалась стабильная смена состояний втулок – переход свободной втулки в режим заклинивания и наоборот.

Полученные зависимости демонстрируют допустимые режимы работы линейного привода и подтверждают корректность предложенной математической модели.

В четвертой главе изложена методика экспериментальных исследований, приведено описание разработанных прототипов мобильных роботов с опорными элементами и подвижными внутренними телами, а также результаты испытаний на плоских и цилиндрических поверхностях.

Проведена серия экспериментов, включающая регистрацию траекторий и параметров движения роботов при реализации предложенных алгоритмов управления опорными элементами. В ходе экспериментов при реализации различных алгоритмов управления опорами подтверждена работоспособность предложенного метода планирования движения по программной траектории перемещения центра масс корпуса робота. Установлено отсутствие проскальзывания опорных элементов по поверхности перемещения робота. Полученные экспериментальные зависимости сопоставлены с аналитическими результатами и подтверждают адекватность предложенных математических моделей.

В заключении обобщены результаты, подведены общие итоги исследования и сделаны выводы, имеющие научное и практическое значение.

Научная новизна исследования:

1. Разработаны и теоретически обоснованы алгоритмы управления конфигурацией голономных связей мобильных роботов с дискретно взаимодействующими с поверхностью опорными элементами и подвижными внутренними телами при заданном программном движении робота.

2. Предложен и реализован метод планирования движения мобильного робота с опорными стойками и вращающимся внутренним телом по плоским поверхностям, отличающийся возможностью достижения оптимальности по скорости перемещения и по точности отклонения центра масс корпуса от программной траектории.

3. Получены аналитические зависимости усилий, развиваемых линейным приводом, обеспечивающие реализацию заданного перемещения мобильного робота с опорными втулками вдоль направляющих, ориентированных в пространстве под различными углами.

4. Представлены экспериментальные исследования, подтверждающие адекватность разработанных математических моделей мобильных роботов и предложенных алгоритмов управления их опорными элементами.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов исследования

Все выносимые на защиту научные результаты являются новыми и принадлежат диссертанту. Новизна подтверждается анализом научной литературы и сравнением публикаций диссертанта с предшествующими публикациями других авторов. Все положения и выводы диссертации в достаточной мере обоснованы. Обоснованность обеспечивается выбором и грамотным использованием методик исследования, адекватностью поставленных задач и экспериментальной проверкой теоретических выводов и расчетов. Все результаты диссертации представляются вполне достоверными.

Научная и практическая значимость исследования:

Научная значимость работы заключается в развитии теоретических основ движения мобильных роботов, оснащённых управляемыми опорными элементами (стойками, втулками), дискретно взаимодействующими с поверхностью перемещения робота. В диссертации предложен подход к описанию и управлению процессом перемещения мобильных роботов как механических систем с голономными связями, учитывающими накладываемые на движение отдельных точек робота ограничения. Разработанные математические модели и алгоритмы управления опорными элементами позволяют анализировать влияние конструктивных параметров и условий контакта опорных элементов с поверхностью перемещения робота на

динамику его движения и служат основой для дальнейшего совершенствования методов управления мобильными роботами данного класса.

Практическая значимость результатов исследования состоит в возможности их применения при проектировании и разработке мобильных роботов, предназначенных для перемещения по плоским и цилиндрическим поверхностям, в том числе в условиях ограниченного пространства или сложной конфигурации контактной зоны. Полученные теоретические результаты подтверждены экспериментально на специально созданных лабораторных стендах.

Полученные результаты исследований **доклаживались и обсуждались** на различных российских и международных научных конференциях.

По теме выполненного исследования **опубликовано** 21 научных работ, в том числе 7 в ведущих научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 4 – в иностранных научных изданиях, 9 – в других изданиях, получен патент РФ на полезную модель.

Замечания по работе:

1. Общее замечание состоит в том, что материал диссертации изложен недостаточно аккуратно, имеются грамматические и пунктуационные ошибки, а также опечатки в формулах что является, конечно, досадным обстоятельством. Например, во второй главе в формулах 2.8, 2.17 присутствует опечатка должно быть $T = \frac{1}{2}J_{1z}\dot{\varphi}^2 + \dots$, а не $T = \frac{1}{2}J_{1z}\dot{\varphi} + \dots$, на стр. 118 автор пишет «разработаны математические модели движения мобильных роботов ..., как механические системы» вместо «как механических систем».

2. Важным фактором для работоспособности предложенных механизмов является «жесткая фиксация» опорных элементов с поверхностью, однако не раскрывается смысл это словосочетания и не приводится подтверждающий ее расчет, например, сил трения, обеспечивающих неподвижность опорных элементов.

3. Во второй главе недостаточно подробно раскрыт подход к решению многокритериальной задачи оптимизации движения мобильного робота. Не указано, какие именно критерии оптимальности рассматривались в расчётах и как осуществлялся выбор приоритетных показателей для минимизации или максимизации.

4. В третьей главе рассматривается установившийся режим движения линейного привода, однако в начальной фазе его работы имеет место ускоренное перемещение штока, которое не учтено в уравнениях движения, что может повлиять на полученные результаты.

5. При решении задачи определения сил, развиваемых линейным приводом для перемещения робота с опорными втулками, отсутствует обоснования принятого в диссертации значений коэффициента трения в периферийной зоне втулки.

6. В четвёртой главе сравнение энергозатрат при движении капсульного мобильного робота и робота с опорными стойками и вращающимся внутренним телом проведено не корректно, поскольку не учтён момент инерции вращающегося тела, а также дополнительные энергетические затраты, связанные с обеспечением неподвижности опорных стоек, находящихся в контакте с поверхностью движения робота.

7. При представлении результатов экспериментальных исследований приведены неполные сведения об используемых датчиках и их характеристиках, в частности, о точности регистрации положений опорных элементов и центра масс корпуса робота, а также параметров его движения, что затрудняет оценку достоверности полученных экспериментальных данных.

Приведенные замечания не снижают актуальности и ценности выполненного исследования и полученных результатов. Замечания также не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа и отзыв ведущей организации обсуждены на заседании Ученого совета Института машиностроения, материалов и транспорта ФГАОУ ВО «СПбПУ» «17» ноября 2025 г., протокол № 4. По результатам обсуждения следует отметить, что полученные автором диссертации методы управления взаимодействием с поверхностью опорных элементов мобильного робота с подвижными внутренними телами экспериментально апробированы и применимы при проектировании мобильных роботов, перемещающихся по плоским и цилиндрическим поверхностям. Сказанное подчеркивает важное значение поставленных и решенных задач диссертации в развитии научных методов и подходов реализации алгоритмов управления мобильных роботов.

Диссертация «Управление движением опорных элементов мобильных роботов с изменяемой внутренней конфигурацией» соответствует требованиям пунктов 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор, Бордюгов Денис Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.4 Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

Отзыв составили:

Профессор Высшей школы автоматизации и робототехники, доктор технических наук по специальности 05.02.05 «Роботы, мехатроника и робототехнические системы», доцент

« 08 » ЛИСТОВ	Вх.№ 05-65-189 « 28 » 11 2025г. ВолгГТУ
------------------	---

Волков Андрей Николаевич

Директор Института машиностроения, материалов и транспорта, доктор технических наук по специальности 05.16.06 «Порошковая металлургия и композиционные материалы», профессор

Попович Анатолий Анатольевич

Информация об организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, вн.тер.г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б

E-mail, телефон, сайт: office@spbstu.ru, +7 (812) 297-20-95, <https://www.spbstu.ru>

С отзывом ознакомлен
28.11.2025

