



Бордюгов Денис Владимирович

**УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ОПОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МОБИЛЬНЫХ
РОБОТОВ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ВНУТРЕННЕЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ**

2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Динамика и прочность машин» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

Научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор,
Брискин Евгений Самуилович.

Официальные оппоненты: **Караваев Юрий Леонидович,**
доктор технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ижевский государственный
технический университет имени
М.Т. Калашникова, кафедра «Мехатронные
системы», профессор;

Марчук Евгений Александрович,
кандидат технических наук,
Автономная некоммерческая организация
высшего образования «Университет Иннополис»,
Факультет компьютерных и инженерных наук,
Институт анализа данных и искусственного
интеллекта, старший преподаватель.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»,
г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «25» декабря 2025г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.282.07, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» по адресу: 400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 28, ауд. 227.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» и на сайте www.vstu.ru по ссылке <https://www.vstu.ru/upload/iblock/518/518bb8f574970815c97ab7694ac95596.pdf>

Автореферат разослан «27» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Попов Андрей Васильевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Разработка мобильных роботов различных классов и видов является актуальной задачей. Они имеют широкий спектр применения, например, могут быть использованы для выполнения инспекционных работ под водой, перемещения по специальным поверхностям, преодоления пересеченной местности и т. д.

Среди мобильных роботов можно выделить шагающие и «шагающеподобные». Отличительной особенностью шагающих движителей является дискретное взаимодействие с опорной поверхностью в тяговом режиме работы. Это позволяет рассматривать их как механические системы с изменяемой конфигурацией голономных связей (накладываются при взаимодействии с опорной поверхностью; снимаются при переносе в новое положение). Большой вклад в развитие теории и методов анализа движения этого типа роботов внесен такими учеными как И.И. Артоболевский, Н.В. Умнов, Д.Е. Охоцимский, В.В. Лапшин, Ю.Ф. Голубев и др., в том числе учеными Волгоградского государственного технического университета. Отдельный тип – лазающие роботы, предназначенные для перемещения по вертикальным поверхностям стен, столбам, балкам.

В то же время дискретность взаимодействия может быть реализована различным способом. Например, мобильный робот может перемещаться по поверхности за счет дискретного взаимодействия опорных элементов с ней и стационарного движения подвижных частей (внутренних масс) в корпусе. В этом случае робота можно отнести к классу капсульных. Это локомоционные (мобильные) системы с вибрационным возбуждением, представляющие систему твердых тел, взаимодействующих в общем случае между собой и с внешней средой и совершающих колебательные движения друг относительно друга. Большой вклад в развитие теории и методов анализа вибрационного перемещения внесен И.И. Блехманом, Р.Ф. Нагаевым и др. С точки зрения конструктивных особенностей капсульные роботы могут быть лишены внешних частей (двигателей), в таком случае перемещение робота осуществляется за счет движения внутренних тел, вспомогательных подвижных масс, под действием приводов при наличии силового взаимодействия корпуса робота с внешней средой, что позволяет их использовать в условиях ограниченного пространства, например, для обследования внутренних органов человека, трубопроводов или замкнутых технических каналов. Приложение силы, генерируемой приводом, к внутреннему телу вызывает приложенную к корпусу силу реакции, вследствие чего изменяется скорость движения корпуса относительно среды, что приводит к изменению силы сопротивления, действующей на корпус со стороны окружающей среды. Таким образом, важными этапами создания капсульного робота являются: исследование динамики и процессов управления, а также организация алгоритмов движения; учет массово-геометрических параметров локомоционной системы; параметры окружающей среды или поверхности, по которой осуществляется перемещение; конструктивные особенности робота и усилия, создаваемые приводами. Наиболее значимые результаты в области создания и управления капсульными роботами получены в работах Ф.Л. Черноусько, Н.Н. Болотника, Ю.Г. Мартыненко, В.Г. Градецкого, Ю.Л. Караваева и их коллег.

Недостатками рассмотренных ранее капсульных мобильных роботов является скольжение корпуса по поверхности, что в свою очередь влияет на точность позиционирования и приводит к увеличению энергозатрат и износу корпуса в процессе перемещения робота, а также необходимость предусматривать специальную систему реализации алгоритма управления движением внутреннего тела для заданного перемещения корпуса робота, что является достаточно сложной на практике задачей в сравнении с дискретным управлением взаимодействия опорных элементов с поверхностью. В этом случае организация движения заключается в алгоритме управления опорными элементами, поочередно взаимодействующими с поверхностью, при этом внутренняя масса не взаимодействует с поверхностью, опорами и может двигаться с постоянной угловой скоростью. Поэтому перспективными с точки зрения методов организации движения могут быть мобильные роботы, движителями которых являются опоры, расположенные на корпусе робота и дискретно взаимодействующие с поверхностью, а силы реакции, приложенные к корпусу, создаются за счет генерируемой приводом силы, приложенной к внутренней массе. Особенность движения, в отличие от известных капсульных роботов, состоит в отсутствии проскальзывания, поскольку в момент контакта с поверхностью происходит жесткая фиксация опор.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка методов управления взаимодействием с поверхностью опорных элементов мобильного робота с изменяемой конфигурацией за счет движения внутренних тел и наложения или снятия голономных связей.

Для достижения цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработка математических моделей движения мобильных роботов с изменяемой конфигурацией голономных связей:

- с учетом управляемого перемещения опорных стоек мобильного робота при стационарном вращательном движении внутренних тел, что в совокупности обеспечивает заданное программное движение на плоскости в определенном коридоре;

- с учетом управляемого перемещения опорных втулок мобильного робота при поступательном движении штока внутреннего актуатора, что обеспечивает заданное программное движение по различно ориентированной в пространстве направляющей.

2. Определение алгоритмов управления опорными стойками мобильного робота с вращающимся внутренним телом, обеспечивающих перемещение из начальной точки в конечную по задаваемой траектории.

3. Установление методов определения усилий, создаваемых линейным приводом, для осуществления заданного перемещения мобильным роботом с опорными втулками, работающими на эффекте периодического заклинивания, по различно ориентированной в пространстве направляющей.

4. Проведение экспериментальных исследований, подтверждающих разработанные математические модели.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке и обосновании временной последовательности смены взаимодействующих с поверхностью опорных элементов мобильного робота при стационарном движении внутренних тел и заданном программном перемещении робота. В диссертации:

1. Обоснованы алгоритмы управления конфигурацией голономных связей на основе разработанных математических моделей движения мобильных роботов с опорными стойками, втулками и стационарно перемещающимися внутренними телами.

2. Предложен и апробирован метод планирования движения мобильного робота с опорными стойками и вращающимся внутренним телом по плоским поверхностям, отличающийся оптимальностью по показателям скорости перемещения и отклонения центра масс корпуса от программной траектории.

3. Установлены аналитические зависимости развиваемых линейным приводом усилий, позволяющие осуществлять заданное перемещение мобильного робота с опорными втулками по различно ориентированной в пространстве направляющей.

4. Представлены экспериментальные исследования, подтверждающие разработанные математические модели и отсутствие проскальзывания опорных элементов мобильных роботов в процессе движения по плоским, цилиндрическим поверхностям в любых направлениях.

Методология и методы исследования. Основой исследований служат положения из теории машин и механизмов, теоретической механики, теории оптимального управления.

Для экспериментального исследования применялись методы математического и компьютерного моделирования, аддитивные технологии.

Разработка прототипов мобильных роботов с изменяемой конфигурацией голономных связей осуществлялась на основе инженерных методов, применяемых при изготовлении робототехнических систем.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость состоит в развитии теории движения мобильных роботов капсульного типа, дополненных управляемыми опорными элементами (стойками, втулками), дискретно взаимодействующими с опорной поверхностью. Полученные на основании теоретических исследований результаты верифицированы на практике на специально созданных лабораторных стендах и прототипах мобильных роботов.

Практическая значимость состоит в применении полученных результатов при проектировании мобильных роботов, используемых для перемещения по плоским и цилиндрическим поверхностям.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели движения мобильных роботов с управляемым перемещением опорных элементов, как механических систем с изменяемой конфигурацией голономных связей:

- учитывающие стационарное вращательное движение внутренних тел, при перемещении робота на плоскости в определенном коридоре;

- учитывающие поступательное движение штока внутреннего актуатора, при перемещении робота по различно ориентированной в пространстве направляющей.

2. Алгоритмы управления опорными стойками мобильного робота с вращающимся внутренним телом, обеспечивающие перемещение из начальной точки в конечную по задаваемой траектории.

3. Аналитические зависимости развиваемых линейным приводом усилий для осуществления перемещения мобильного робота с опорными втулками, работающими на эффекте периодического заклинивания, по различно ориентированной в пространстве направляющей.

4. Экспериментальные исследования, подтверждающие разработанные математические модели.

Достоверность и обоснованность результатов. Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечиваются согласованностью с ранее опубликованными результатами научных работ других авторов и отсутствием противоречий, а также подтверждаются результатами натурных экспериментов. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях и семинарах: Международная конференция «Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines», CLAWAR, 2021 г., г. Такарадзука, Япония; XIV, XVI Всероссийские мультikonференции по проблемам управления «МКПУ», 2021 г., 2023 г., Россия; XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, 2023 г., г. Санкт-Петербург, Россия; XXXV Международная инновационная конференция «МИКМУС», 2020, 2021, 2023 г., г. Москва, Россия; XIV Всероссийское совещание по проблемам управления «ВСПУ», 2024 г., г. Москва, Россия; XII Международная научно-практическая конференция «Современное машиностроение: Наука и образование MMESSE», 2024 г., г. Санкт-Петербург, Россия; Международная конференция по интерактивной коллаборативной робототехнике (ICR 2024), 2024 г., г. Мехико, Мексика; XXXII, XXXIII, XXXV Международные научно-технические конференции «Экстремальная робототехника», 2021 г., 2022 г., 2024 г., г. Санкт-Петербург, Россия.

Результаты диссертационной работы использовались в рамках научно-исследовательских работ:

– РФФИ (18-41-340014 «Исследование управляемого движения модульного мобильного робота с ортогонально-поворотными шагающими движителями», 2018-2019 гг. (исп.); 19-41-340013 «Развитие методов многокритериальной оптимизации структуры и законов управления движением мобильных роботов с шагающими движителями», 2019-2020 гг. (исп.); 19-48-340018 «Мобильные роботы», 2019-2020 гг. (исп.)).

– РНФ (18-71-10069 «Развитие методов управления многоприводным многоногим шагающим роботом с учётом геометрических параметров среды передвижения», 2018-2021 гг. (исп.); 22-29-01589 «Разработка научных основ проектирования и оптимального управления мобильными роботами с шагающими движителями с гибкими звеньями», 2022-2023 гг. (исп.); 24-21-00477 «Мобильные роботы с движителями и опорными стойками, дискретно взаимодействующими с поверхностью», 2024-2025 гг. (исп.).)

Публикации. Основные положения диссертации представлены в 21 публикациях, в том числе: 7 в ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов работ по диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, 4 в научных изданиях, индексируемых международными базами данных, 1 патент на полезную модель, 9 в других изданиях.

Личный вклад автора. Постановка задачи, все результаты и сформулированные положения диссертации получены лично автором под руководством научного руководителя.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 4 глав, включающих 16 параграфов и заключения. Список использованной литературы включает 112 наименований. Общий объем 134 страницы.

Содержание работы

В первой главе определены тенденции применения наиболее простых по конструкции движителей, но обеспечивающих близкую к «идеальной» маневренность на гладких, шероховатых поверхностях без проскальзывания по ним, выявлены их недостатки. Проанализированы существующие варианты мобильных роботов с подвижными внутренними телами (капсульные роботы), роботы, использующие шагающеподобные типы движителей (лазающие роботы), а также математические модели, описывающие принципы их перемещения. Проведенный обзор современного состояния мобильных роботов позволил внести дополнения в их конструктивные особенности: совместное использование подвижного тела, находящегося внутри корпуса, и опорных стоек, накладывающих ограничение на перемещение робота при его движении по плоским и цилиндрическим поверхностям. Необходимость разработки как алгоритмов управления, так и в целом теории движения мобильных роботов с подвижными внутренними телами и опорными элементами является актуальной задачей, так как такие робототехнические системы могут найти свое применение в выполнении технологических операций на плоской горизонтальной поверхности или цилиндрических направляющих, например, при перевозке грузов на территориях складских помещений, очистке, инспекции высоковольтных линий электропередач и т.д. Поэтому перспективными с точки зрения методов организации движения могут быть мобильные роботы, движителями которых являются опоры, расположенные на корпусе робота и дискретно взаимодействующие с поверхностью, а силы реакции, приложенные к корпусу, создаются за счет генерируемой приводом силы, приложенной к внутренней массе.

Во второй главе разработаны расчетные схемы мобильных роботов с опорными стойками и одним или несколькими внутренними телами, совершающими вращательное движение, на основе которых представлены математические модели динамики движения роботов, учитывающие их массово-геометрические параметры и позволяющие устанавливать их законы перемещения.

Рассматривается мобильный робот (рисунок 1), содержащий корпус 1, в котором расположено внутреннее тело (одно или несколько) 3, совершающее вращательное движение вокруг неподвижной оси, перпендикулярной плоскости движения корпуса. Робот опирается на горизонтально расположенную поверхность N -опорами 2. Конструкция также включает стойки 4, закрепленные на корпусе 1 робота и дискретно взаимодействующие с опорной поверхностью 5. В процессе перемещения робота внутреннее тело (одно или несколько) совершает вращательное движение вокруг вертикальной оси, а стойки поочередно вступают в контакт с поверхностью, вследствие

чего, на корпус робота накладываются или снимаются голономные связи, что приводит к изменению конфигурации мобильного робота.

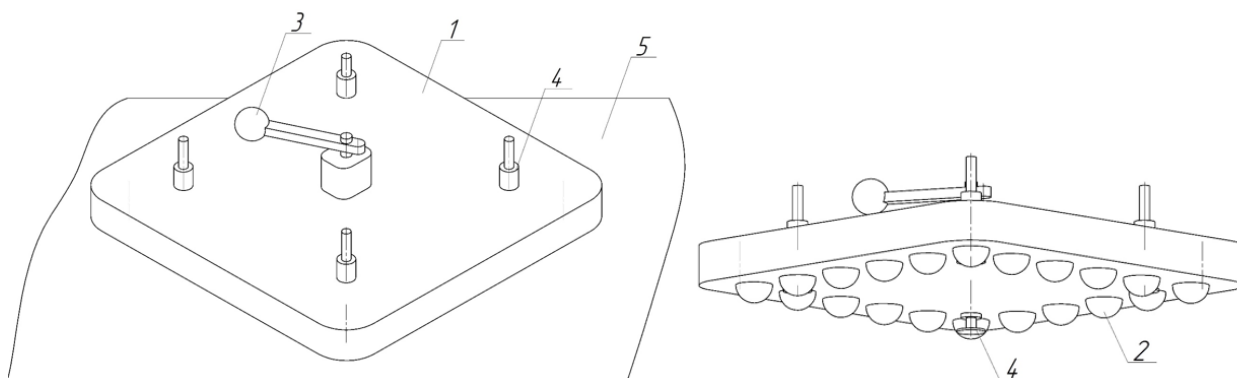


Рисунок 1 – Схема мобильного робота с опорными стойками и вращающимся внутренним телом

Рассматривается движение робота в одной из фаз. Расчетная схема представлена на рисунке 2, где: b – расстояние от центра корпуса мобильного робота до опоры O_1 , находящейся во взаимодействии с поверхностью; x_a, y_a – координаты центра корпуса мобильного робота 1 в проекции на оси O_1X_1 и O_1Y_1 соответственно; x, y – координаты внутреннего тела 2 в проекции на оси O_1X_1 и O_1Y_1 соответственно; φ – угол поворота корпуса робота относительно горизонтальной оси X_1 ; α – угол поворота тела внутри корпуса относительно горизонтальной оси X ; m – масса груза; r – длина стержня, на котором закреплен груз; ω – угловая скорость стержня с закрепленным на нем грузом.

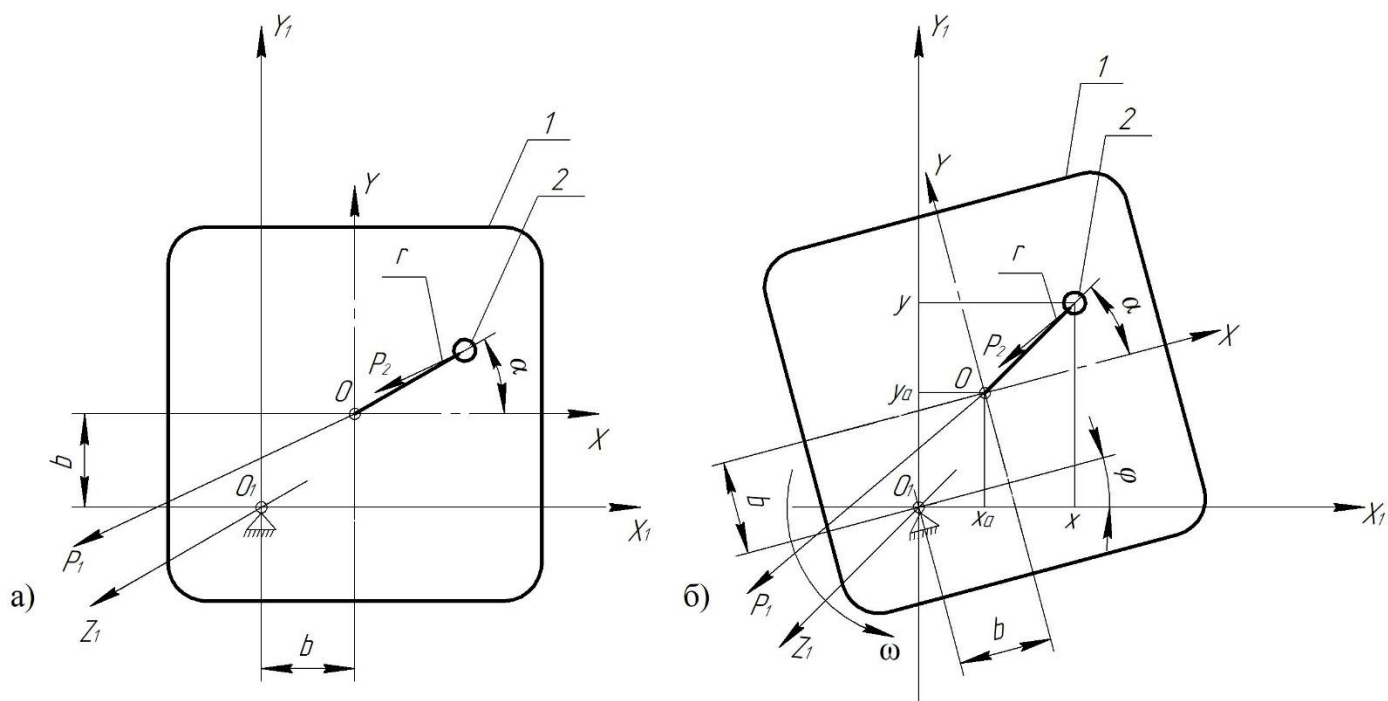


Рисунок 2 – Расчетная схема робота с вращающимся внутренним телом при движении по плоскости: а) начальное положение; б) поворот корпуса вокруг стойки

Уравнение динамики движения мобильного робота с вращающимся внутренним телом и опорными стойками в форме уравнений Лагранжа:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \phi} = Q_{\phi}, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = Q_{\alpha}. \end{cases} \quad (1)$$

где: α (угол поворота тела внутри корпуса относительно горизонтальной оси X) и ϕ (угол поворота корпуса робота) – обобщенные координаты.

Кинетическая энергия системы:

$$\begin{aligned} T = & \frac{1}{2} J_{1z} \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} m_2 \left(2b^2 \dot{\phi}^2 + r^2 \dot{\phi}^2 + r^2 \dot{\alpha}^2 + 2r^2 \dot{\phi} \dot{\alpha} + 2br \dot{\phi}^2 \cdot \cos(\alpha) \right) + \\ & + \frac{1}{2} m_2 \left(2br \dot{\phi}^2 \cdot \sin(\alpha) + 2br \dot{\phi} \dot{\alpha} \cdot \cos(\alpha) + 2br \dot{\phi} \dot{\alpha} \cdot \sin(\alpha) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Учитывается установившийся режим движения внутреннего тела: $\dot{\alpha} = \text{const}$; $\ddot{\alpha} = 0$; и из-за малых ускорений корпуса робота пренебрегаем действием сил инерции на внутреннее тело.

Активные силы, совершающие работу при движении системы по горизонтальной поверхности, отсутствуют, соответственно $Q_{\phi} = 0$, $Q_{\alpha} = 0$, тогда решения системы (1):

$$\ddot{\phi} \left(J_{1z} + m_2 \left(2b^2 + r^2 + 2br \cdot (\cos(\alpha) + \sin(\alpha)) \right) \right) = m_2 \left(\dot{\alpha}^2 br \cdot (\cos(\alpha) - \sin(\alpha)) \right) \quad (3)$$

Решение системы (1) при движении по наклонной плоскости:

$$\begin{aligned} \ddot{\phi} \left[J_{1z} + m_2 \left(2b^2 + r^2 + 2br (\cos(\alpha) + \sin(\alpha)) \right) \right] = & -m_2 \left(\dot{\alpha}^2 br (\cos(\alpha) - \sin(\alpha)) \right) + \\ & + P_1 \cdot \sin(\beta) \cdot b \cdot \cos(\phi) + P_1 \cdot \sin(\beta) \cdot b \cdot \sin(\phi) + \\ & + P_2 \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\phi) \cdot (b + r \cdot \sin(\alpha)) + P_2 \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\phi) \cdot (b - r \cdot \cos(\alpha)) \end{aligned} \quad (4)$$

Основным условием задаваемого программного движения является отсутствие удара в момент смены стоек, что приводит к периодической остановке корпуса робота в процессе перемещения, при этом подвижная масса прекращает своего движения. Для предотвращения удара смена стоек происходит в момент нулевого значения угловой скорости корпуса мобильного робота.

Проведено исследование динамики движения мобильных роботов с одной вращающейся с постоянной скоростью внутренней массой. Установлены характерные закономерности движения:

– зависимости изменения угла поворота и угловой скорости корпуса мобильного робота от времени его движения;

– зависимости изменения угла поворота и угловой скорости корпуса мобильного робота от безразмерного момента инерции $k = J_a / (mrb)$ (J_a – момент инерции корпуса робота относительно неподвижной опоры), учитывающего массово-геометрические параметры системы;

– зависимость времени движения центра масс корпуса мобильного робота при перемещении из начального положения в конечное от угловой скорости вращения внутренней массы.

Полученные закономерности установлены на основе математического моделирования динамики движения роботов с различными массово-геометрическими характеристиками и алгоритмами смены опорных стоек.

На графиках и рисунках 3-5 представлены характерные особенности динамики движения мобильных роботов как механических систем с различными массово-геометрическими и кинематическими параметрами.

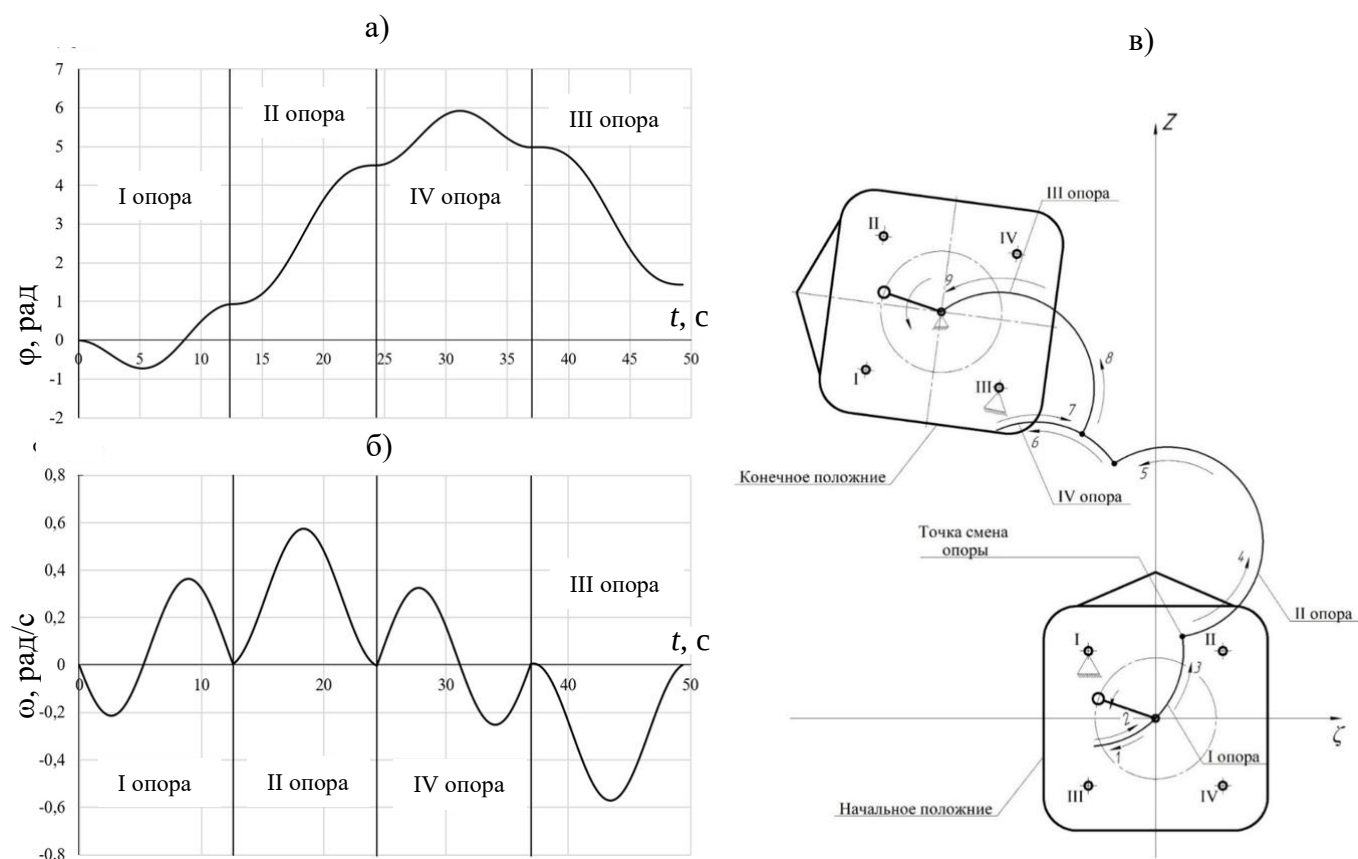


Рисунок 3 – Зависимости изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ (а) и угловой скорости корпуса мобильного робота $\dot{\varphi}$ (б) от времени t и траектория движения центра масс корпуса (в) робота с параметрами: $\alpha_0 = 1,0472$ рад; $\omega = 0,5$ рад/с; $b = 0,5$ м; $r = 0,3$ м; $J_a = 0,735$ кг·м³; $m = 2$ кг; максимальный габаритный размер робота 0,71 м.

В таблице 1 указан алгоритм управления опорными стойками, соответствующий результатам, представленным на рисунке 3.

Таблица 1 – Алгоритм управления стойками мобильного робота при движении по горизонтально расположенной поверхности

Промежуток времени движения t , с	Угол поворота корпуса мобильного робота φ , град	Стойка, взаимодействующая с поверхностью
0 ... 12,53	0...418,94	I опора
12,53 ... 24,35	418,94...757,50	II опора
24,35 ... 36,95	757,50...1118,54	IV опора
36,95 ... 49,33	1118,54...757,50	III опора

Определены зависимости угла поворота и угловой скорости корпуса мобильного робота с вращающимся внутренним телом и опорными стойками от массово-геометрических характеристик рассматриваемой механической системы (рисунок 4). В начальный момент времени $\alpha_0 = 0$ рад; $\omega = 1$ рад/с. Рассматривается цикл поворота корпуса робота вокруг I опорной стойки.

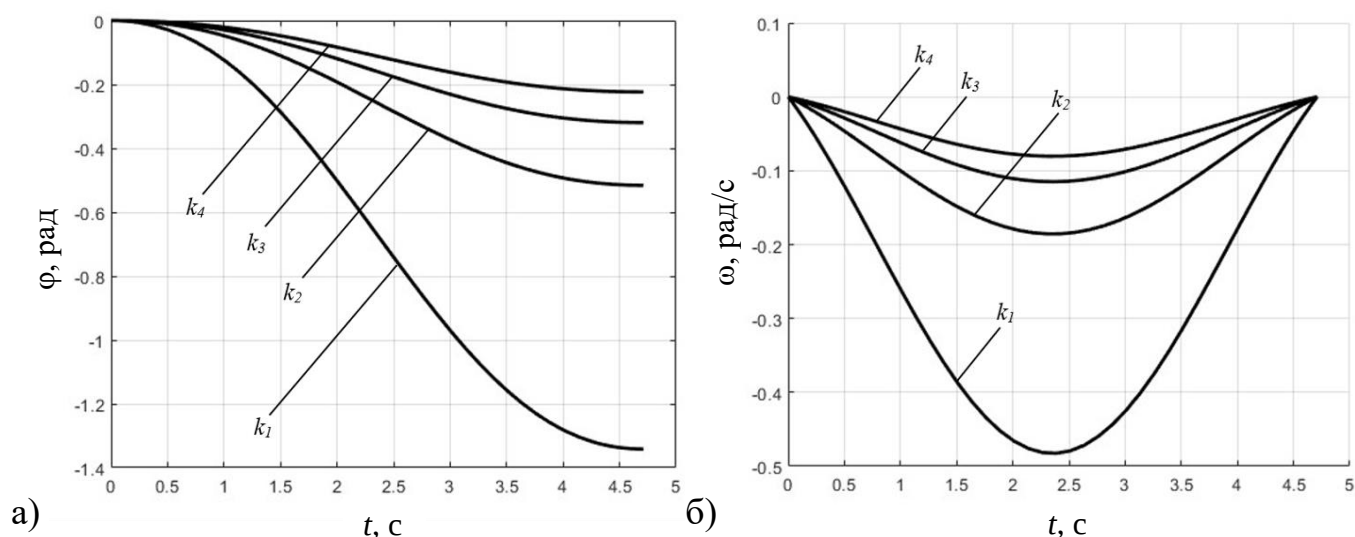


Рисунок 4 – Зависимость изменений угла поворота φ (а) и угловой скорости ω (б) корпуса робота при различных значениях коэффициента k ($k_1 = 5$, $k_2 = 13$, $k_3 = 21$, $k_4 = 30$) в цикле взаимодействия опоры с поверхностью

Представлены алгоритмы управления опорными стойками, реализующие некоторые базовые траектории движения центра масс корпуса мобильного робота (движение в прямом направлении, боковое движение, движение по дуге окружности, движение по диагонали и разворот корпуса робота), а также зависимости времени движения центра масс корпуса мобильного робота от угловой скорости вращения внутренней массы при движении по ним, рисунок 5.

Движение мобильного робота происходит с рысканием, которое зависит как от углов поворота корпуса вокруг неподвижных опор, предусмотренных алгоритмом, так и от габаритных размеров робота. Такое явление накладывает ограничение на перемещение мобильного робота в области допустимых размеров поперечных границ S . Введено понятие относительного коридора $H = S/l$, где l – максимальный габаритный размер робота. Установлена связь между относительным коридором H и безразмерным параметром $T = t\omega/2\pi$, характеризующем ориентацию робота в области движения. Это

позволяет решить оптимизационную задачу: движение робота по заданной траектории за меньшее время, но с большей областью допустимых размеров поперечных границ и наоборот. Для ее решения вводится показатель значимости λ , который определяет соотношения между H и T .

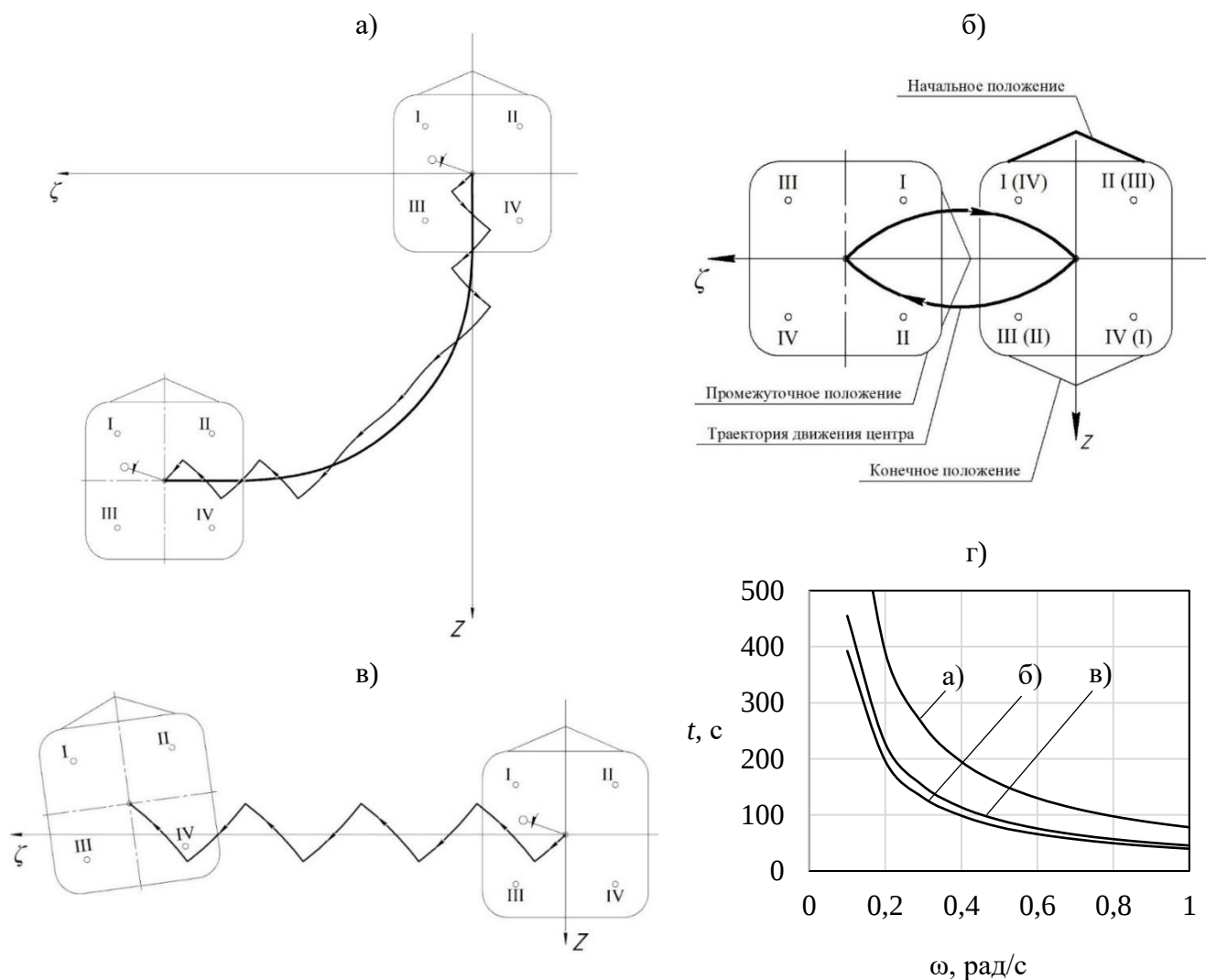


Рисунок 5 – Изменение положения центра корпуса мобильного робота с одним вращающимся внутренним телом при движении: по дуге окружности (а); при развороте корпуса (б), в скобках указаны номера опор в конечном положении робота; в боковом направлении (в); и зависимость времени движения мобильного робота t от угловой скорости вращения внутреннего тела ω при движении центра масс корпуса робота по некоторым базовым траекториям (г).

В третьей главе рассмотрен двухопорный мобильный робот, опоры которого связаны между собой линейным электроприводом, и перемещающийся по направляющей за счет периодического заклинивания опорных элементов (охватывание направляющей), выполненных в форме втулок. Движение робота осуществляется как по горизонтальной, так и по расположенной под углом направляющим.

Решена задача определения необходимых усилий, развиваемых линейным приводом мобильного робота, для обеспечения движения робота по различно ориентированной в пространстве направляющей.

Расчетная схема мобильного робота при движении по горизонтальной направляющей представлена на рисунке 6, где: G – вес груза на втулке; G_1 – вес втулки; G_2 – вес линейного привода; N_1 – сила реакции опоры в точке 1; N_2 – сила реакции опоры в точке 2; N_3 – сила реакции опоры в точке 3; N_4 – сила реакции опоры в точке 4; P – горизонтальная составляющая реакции шарнира крепления привода, равная действующей со стороны привода силе; F – сила сопротивления, действующая со стороны препятствия на втулку или со стороны инструмента, который может быть установлен на втулке для совершения определённой технологической операции; f – коэффициент трения в периферийной зоне втулки; f_1 – коэффициент трения внутренней поверхности втулки; h – ширина втулки; l – расстояние от дополнительного груза до втулки; a – расстояние от места крепления привода до центра направляющей; d – диаметр направляющей; m – расстояние от силы, действующей со стороны препятствия до направляющей; b – расстояние от центра втулки до точки действия силы реакции опоры N ; угол $\gamma \approx 0$ град.

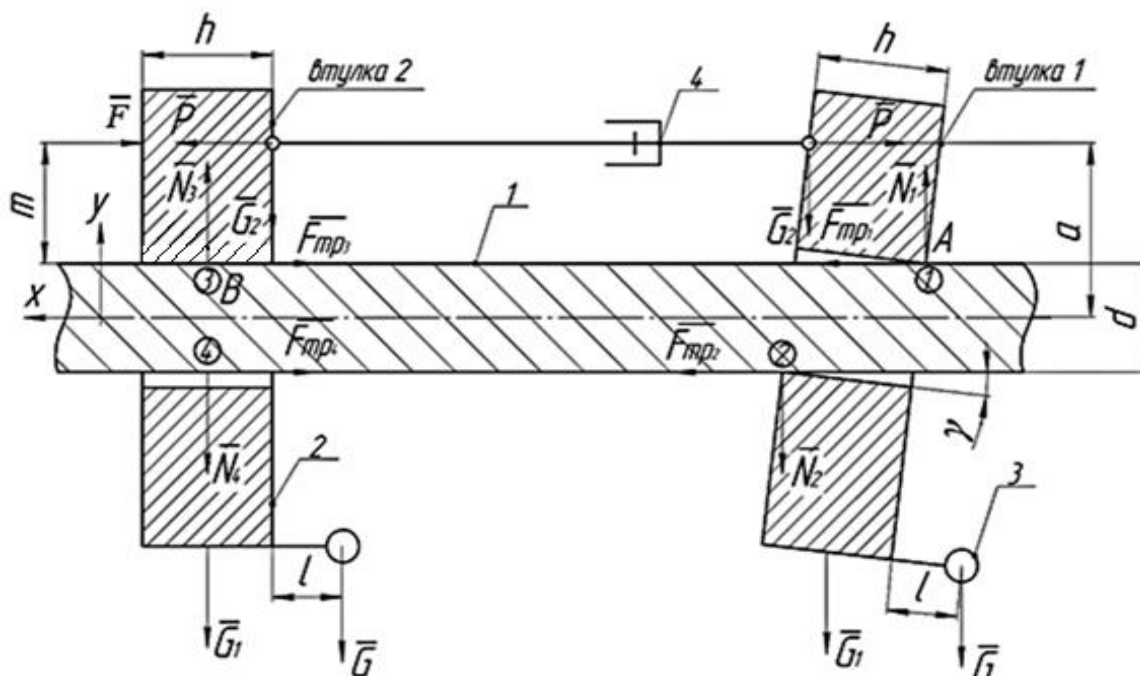


Рисунок 6 – Расчетная схема мобильного робота при движении по горизонтальной направляющей: 1 – направляющая; 2 – втулка; 3 – груз; 4 – линейный привод

Одна из втулок находится в зацеплении с поверхностью (втулка 1), в то время как другая – свободно перемещается по стержню (втулка 2), затем происходит их смена, что соответствует изменению конфигурации голономных связей, накладываемых на движение рассмотренного робота. Допускается свободное скольжение незакрепленной втулки.

Для определения необходимых со стороны привода усилий при перемещении мобильного робота по различно ориентированной в пространстве направляющей используются уравнения квазистатического движения, учитывается малость угла γ наклона втулки.

Представлены методы определения усилий, действующих на опорные втулки со стороны привода, для перемещения робота по горизонтальной направляющей (5):

$$P_{I \min} \geq -\frac{Gf(df - 2l - h) + G_1 df^2 + G_2 f(df + h)}{h - 2af};$$

$$P_{II \min} > \frac{G(h + 2l + df_1) + G_1 df_1 + G_2(h + df_1) + 2Fm}{2a}$$
(5)

где: $P_{I \min}$ – минимальное необходимое значение силы, действующей со стороны привода для заклинивания одной из втулок; $P_{II \min}$ – минимальное необходимое значение силы, действующей со стороны привода, для начала движения другой втулки.

Определены зависимости силы, действующей со стороны привода, от конструктивных особенностей втулки и габаритов направляющей при наличии сил сопротивления, действующих на свободную движущуюся втулку (6):

$$F = -\frac{G(h + 2l + df_1) + G_1 df_1 + G_2(h + df_1) - 2Pa}{d + 2m}$$
(6)

В четвертой главе представлена методика проведения лабораторных испытаний мобильных роботов с изменяемой конфигурацией голономных связей, а также прототипы мобильных роботов:

- робота с опорными стойками, управляемыми согласованно, и одним внутренним телом, совершающим стационарное вращательное движение вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью;
- робота, перемещающегося по направляющей за счет управления линейным приводом и периодического заклинивания опорных втулок.

На рисунке 7 представлены прототипы мобильных роботов с опорными элементами, дискретно взаимодействующими с поверхностью, и подвижными внутренними телами.

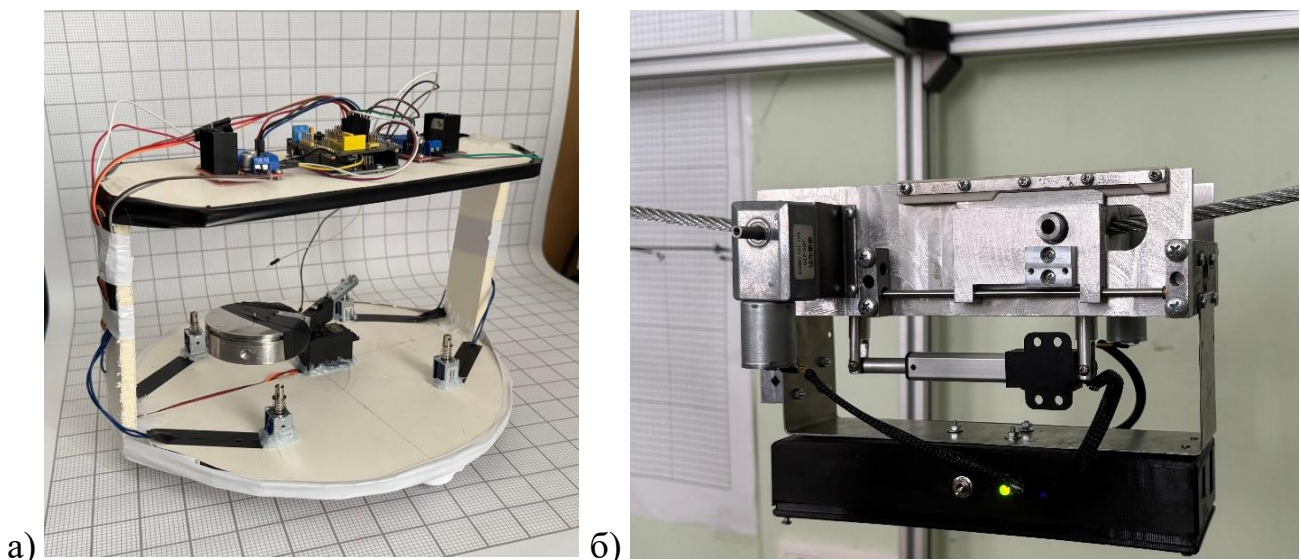


Рисунок 7 – Прототипы роботов:

- а) мобильный робот с периодически заклиниваемыми опорными стойками и вращающимся внутренним телом; б) робот, перемещающийся за счет периодического заклинивания опорных элементов

Получены траектории перемещения геометрического центра мобильного робота при различных алгоритмах смены опорных стоек, например, в правый нижний угол области движения, рисунок 8: $I \rightarrow III \rightarrow I \rightarrow III \rightarrow II \rightarrow III \rightarrow IV$.

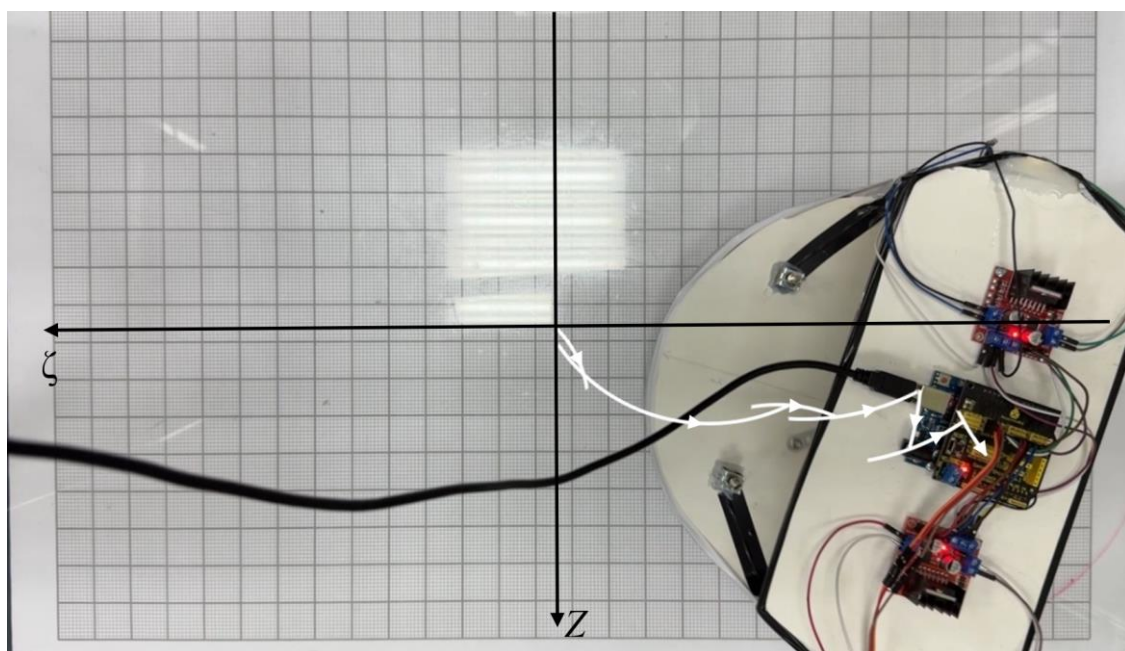


Рисунок 8 – Траектория перемещения геометрического центра мобильного робота в правый нижний угол области движения

Выполнено сравнение теоретических и экспериментальных результатов перемещения мобильного робота с опорными стойками и вращающимся внутренним телом при боковом движении корпуса, рисунок 9. В ходе эксперимента установлено, что смена опор, взаимодействующих с поверхностью, сопровождалась незначительным ударным воздействием, что приводило к смещению геометрического центра корпуса робота. Тем не менее, зафиксированная погрешность остаётся в пределах допустимой нормы, что подтверждает предлагаемый метод планирования движения.

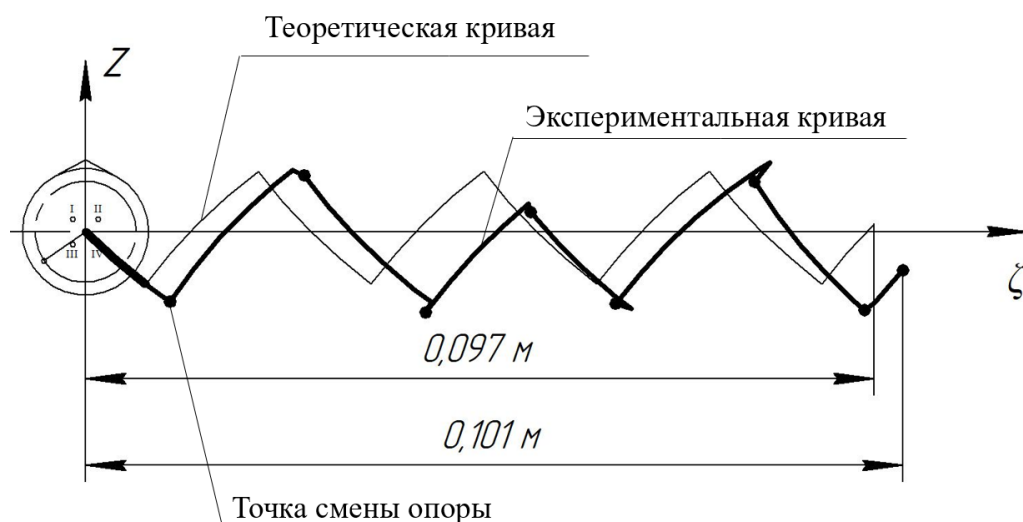


Рисунок 9 – Теоретическая и экспериментальная траектории перемещения геометрического центра мобильного робота при его боковом движении

Проведен сравнительный анализ энергоэффективности капсульного мобильного робота и робота с опорными стойками и вращающимся внутренним телом, который показывает, что робот с опорными стойками и вращающимся внутренним телом характеризуется меньшими энергозатратами при перемещении. Это преимущество обусловлено отсутствием проскальзывания опорных стоек по поверхности в связи с их жесткой фиксацией в момент контакта.

Для подтверждения отсутствия проскальзывания опорных элементов при движении робота, работающего на эффекте периодического заклинивания втулок, проведена серия экспериментов для случаев когда:

- коэффициенты трения во внутренней f_1 и периферийной f зонах втулки постоянны, движение робота осуществляется по горизонтальной и расположенными под углами 5° и 10° направляющим;
- робот движется по горизонтальной направляющей, коэффициент трения во внутренней зоне втулки f_1 постоянен, коэффициент трения в периферийной зоне f имеет различные значения.

В ходе каждого из экспериментов реализовано 10 циклов работы линейного привода. Один цикл состоит из выдвижения штока на длину равную 0,01 м, а затем его втягивания на такую же длину, таким образом робот должен продвинуться на расстояние 0,1 м.

Анализ экспериментальных данных показывает, что за 10 циклов работы линейного привода робот перемещается на расстояние близкое к 0,1 м, погрешность не превышает 7%. Эксперименты проводились на испытательном стенде, представленном на рисунке 10.



Рисунок 10 – Испытательный стенд робота, перемещающегося по направляющей за счет управления линейным приводом и периодического заклинивания опорных втулок.

Заключение

1. Разработаны математические модели движения мобильных роботов с управляемым перемещением опорных элементов, как механических систем с изменяемой конфигурацией голономных связей:

- учитывающие стационарное вращательное движение внутренних тел, при перемещении робота по плоскости в определенном коридоре;
- учитывающие поступательное движение штока внутреннего актуатора, при перемещении робота по различно ориентированной в пространстве направляющей.

Представлены уравнения программного движения робота с внутренними массами, совершающими вращательное движение, с произвольным последовательным

изменением взаимодействующих с опорной поверхностью стоек, и уравнения квазистатического движения мобильного робота, перемещающегося за счет периодического заклинивания опорных втулок, по различно ориентированным поверхностям.

Решена многокритериальная задача оптимизации движения мобильного робота с опорными стойками и вращающимся внутренним телом по показателям скорости перемещения и отклонения центра масс корпуса от программной траектории, определены энергозатраты в процессе его перемещения.

2. Разработаны алгоритмы управления опорными стойками мобильного робота с вращающимся внутренним телом, позволяющие реализовывать различные траектории движения геометрического центра корпуса робота, в том числе движение в прямом направлении, боковое движение, движение по дуге окружности, движение по диагонали и разворот корпуса робота, а также определены временные промежутки контакта каждой из стоек с опорной поверхностью, значения угла поворота и угловой скорости корпуса робота в процессе движения для обеспечения отсутствия удара в момент смены стоек.

За счёт согласованного управления опорными стойками робот способен перемещаться в любом направлении и имеет близкую к «идеальной» маневренность. Особенность движения состоит в отсутствии проскальзывания опор по поверхности в связи с их жесткой фиксацией.

3. Получены аналитические зависимости развиваемых линейным приводом усилий позволяющие осуществлять заданное перемещение мобильного робота с опорными втулками, работающими на эффекте периодического заклинивания, по различно ориентированным направляющим.

4. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие адекватность разработанных математических моделей.

В результате экспериментальных исследований мобильного робота с опорными стойками и вращающимся внутренним телом и мобильного робота, перемещающегося по направляющей за счет управления линейным приводом и периодического заклинивания одной из опорных втулок, установлено:

- движение мобильных роботов с изменяемой конфигурацией голономных связей по плоским и цилиндрическим поверхностям происходит с отсутствием проскальзывания опорных элементов;

- в связи с отсутствием проскальзывания опорных элементов по поверхности мобильный робот с опорными стойками и вращающимся внутренним телом характеризуется меньшими энергозатратами при перемещении по сравнению с известными капсульными роботами;

- за счет различных алгоритмов управления опорными элементами мобильный робот с опорными стойками и вращающимся внутренним телом способен перемещаться в различных направлениях, что подтверждает его близкую к «идеальной» маневренность.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в периодических рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ:

1. Об управлении перемещением мобильного робота за счет стационарного движения внутренних масс и нестационарных голономных связей / Д.В. Бордюгов // Известия ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – № 4 (287). – С. 32-35.
2. Об управлении движением мобильного робота с периодически «заклинивающе-скользящими» опорами / Н.Г. Шаронов, Д.В. Бордюгов, Р.В. Крайнов // Известия ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – № 9 (292). – С. 70-74.
3. Исследование принципов движения мобильного робота с внутренней массой, совершающей движение по окружности / Д.В. Бордюгов, Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов // Известия ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – № 9 (280). – С. 21-26.
4. Об управлении движением мобильного робота с движителями, работающими на эффекте периодического заклинивания / Д.В. Бордюгов, Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов // Известия ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – № 4 (275). – С. 23-28.
5. Об управлении движением двухсекционного капсульноподобного мобильного робота / Д.В. Бордюгов, А.С. Прокопов // Известия ВолгГТУ. Сер. Роботы, мехатроника и робототехнические системы. - Волгоград, 2025. – № 4 (299). – С. 16-22.
6. Лабораторная модель мобильного робота с секционным движителем / Д.В. Бордюгов, С.С. Фоменко, А.В. Малолетов, Е.С. Брискин // Известия ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – № 8 (255). – С. 52-54.
7. Автоматизация методов преодоления препятствия мобильным роботом с секционным движителем / С.С. Фоменко, Д.В. Бордюгов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – Волгоград, 2019. – № 9 (232). – С. 72-75.

Статьи индексируемые наукометрическими базами Web of Science и Scopus:

8. Mathematical Model and Design of the Mobile Robot with Propellers Which Working on the Periodic Jamming Effect / D. V. Bordyugov, E. S. Briskin, N. G. Sharonov // Interactive Collaborative Robotics. 9th International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – Mexico, 2024. – P. 293-305.
9. The Shockless Motion Mode of the Mobile Robot with Rotating Internal Masses / D. V. Bordyugov, E. S. Briskin, N. G. Sharonov // Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, 2025.
10. The research of motion a mobile robot with variable structure of holonomic liaisons / D. V. Bordyugov, E. S. Briskin, N. G. Sharonov // AIP Conference Proceedings. Vol. 3205, Issue 1 (Moscow, Russia, 13-16 November 2023) / Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN). – AIP Publishing, 2025. – Article 080001. – 5 p.
11. The Motion Control Research of the Mobile Robot with Vibrating Propulsion Device Which Discretely Interacting with the Supporting Surface / D. V. Bordyugov, E. S. Briskin, N. G. Sharonov // Lecture Notes in Networks and Systems. – Japan, 2022. – Vol. 324. – P. 421-427.

Патенты РФ:

12. П. м. 230052 Российская Федерация, МПК В25J 9/10 [и др.] Мобильный робот / Д.В. Бордюгов, Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. - 2024.

В материалах международных и всероссийских научных конференций:

13. О безударном режиме движения мобильного робота с вращающимися внутренними массами / Д.В. Бордюгов, Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов // Современное машиностроение. Наука и образование. - 2024. - № 13. - С. 355-364.

14. О формировании траектории движения мобильного робота с вращающимися внутренними телами / Д.В. Бордюгов, Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов // Экстремальная робототехника (ЭР-2024). - Санкт-Петербург, 2024. - С. 53-55.

15. Динамика движения мобильного робота с вращающейся внутренней массой / Д.В. Бордюгов, Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ–2023) (г. Волгоград, 11-15 сентября 2023 г.). - Волгоград, 2023. - С. 47-49.

16. Исследование движения мобильного робота с изменяемой структурой голономных связей / Д.В. Бордюгов, Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов // XXXV Международная инновационная конференция (МИКМУС – 2023). - Москва, 2023. - С. 345-348.

17. Проблемы управления движением мобильных роботов с двигателями, дискретно взаимодействующими с опорной поверхностью / Е.С. Брискин, К.С. Артемьев, Д.В. Бордюгов, Л.Д. Смирная // XIII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. - Санкт-Петербург, 2023. - Т. 1. Общая и прикладная механика. - С. 482-483.

18. The research of a movement dynamics two-legged robot with spring-loaded weight / D. V. Bordyugov, E. S. Briskin, N. G. Sharonov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1129: International Conference of Young Scientists and Students «Topical Problems of Mechanical Engineering» (ToPME-2020). – Moscow, 2021, – 7 p.

19. Динамика движения двуопорного робота с подпружиненной массой / Д.В. Бордюгов, Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов // Экстремальная робототехника: тр. 32-й Междунар. науч.-техн. конф. - Санкт-Петербург, 2021. - С. 96-101.

20. Динамика движения двустопного робота с внутренней подвижной массой / Д.В. Бордюгов, Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов, Я.В. Калинин // XIV Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ–2021): - Ростов-на-Дону ; Таганрог, 2021. - С. 32-34.

21. Исследование динамики движения двуопорного робота с подпружиненной массой / Д.В. Бордюгов, Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов // XXXII Международная инновационная конференция (МИКМУС – 2020): - Москва, 2021. - С. 418-424.

Подписано в печать __.10.2025 Заказ № _____. Тираж 80 экз. Печ. л. 1,0

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Отпечатано в типографии Издательства

Волгоградского государственного технического университета

400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корпус 7.