Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

На правах рукописи

Бордюгов Денис Владимирович

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ОПОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ВНУТРЕННЕЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ

2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Волгоград – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5
ГЛАВА 1. Обзор и анализ мобильных роботов, их классификация по типу применяемых движителей 13
1.1 Показатели, характеризующие конструктивные и эксплуатационные свойства роботов, перемещающихся по плоским поверхностям..... 13
1.1.1 Мобильные роботы с колесными типами движителей 14
1.1.2 Мобильные роботы с шагающими типами движителей 20
1.1.3 Капсульные мобильные роботы 26
1.1.4 Сравнительная таблица рассмотренных типов движителей 30
1.2 Шагающеподобные мобильные роботы, предназначенные для перемещения по специализированным поверхностям 33
1.3 Выводы по первой главе 40
ГЛАВА 2. Математическая модель и алгоритм управления опорными элементами мобильного робота с вращающимся внутренним телом. 42
2.1 Описание элементов конструкции и принципа перемещения мобильного робота с управляемыми опорными стойками и вращающимся с постоянной угловой скоростью вокруг неподвижной перпендикулярной опорной поверхности оси внутренним телом 42
2.2 Расчетная схема мобильного робота с опорными элементами и вращающимся внутренним телом 46
2.2.1 Математическая модель движения мобильного робота по горизонтально расположенной плоской поверхности с вращающимся внутренним телом и опорными стойками, периодически взаимодействующими с опорной поверхностью 47
2.2.2 Движение мобильного робота с вращающимся внутренним телом и опорными элементами по плоскости, расположенной под углом..... 52
2.3 Исследование модельной задачи движения мобильного робота с вращающимся внутренним телом и опорными стойками. 55

2.3.1 Движение мобильного робота с одним вращающимся внутренним телом и опорными стойками по горизонтально расположенной поверхности 55
2.3.2 Движение мобильного робота с одним вращающимся внутренним телом и опорными стойками по горизонтально расположенной поверхности по определенным заданным траекториям 62
2.3.2 Движение мобильного робота с одним вращающимся внутренним телом и опорными стойками по наклонно расположенной поверхности 77
2.3.3 Движение мобильного робота с несколькими вращающимся внутренними телами и опорными стойками по горизонтальной поверхности 79
2.4 Выводы по второй главе 82
ГЛАВА 3. Расчетная схема и определение тяговых усилий привода мобильного робота, перемещающегося за счет периодического заклинивания опорных элементов 84
3.1 Описание конструкции и принципа перемещения мобильного робота, перемещающегося за счет периодического заклинивания опорных элементов 84
3.2 Расчетная схема мобильного робота, перемещающего за счет периодического заклинивания опорных элементов, при движении по горизонтально расположенной направляющей 87
3.3 Расчетная схема мобильного робота, перемещающего за счет периодического заклинивания опорных элементов, при движении по направляющей, расположенной под углом 90
3.3.1 Движение мобильного робота вверх по наклонной направляющей 90
3.3.2 Движение мобильного робота вниз по наклонной направляющей.. 91
3.4 Исследование модельной задачи движения мобильного робота, определения усилий, создаваемых линейным приводом 93
3.4.1 Усилия, создаваемые линейным приводом для движения мобильного робота по горизонтально расположенной направляющей. 93

3.4.2 Усилия, создаваемые линейным приводом для движения мобильного робота вверх по направляющей, расположенной под наклоном. 97
3.4.3 Усилия, создаваемые линейным приводом для движения мобильного робота вниз по направляющей, расположенной под наклоном..... 98
3.5 Выводы по третьей главе 99
ГЛАВА 4. Экспериментальные исследования «капсульноподобных» мобильных роботов на плоских и цилиндрических поверхностях 101
4.1 Методика экспериментальных испытаний мобильных роботов..... 101
4.2. Лабораторная модель и экспериментальные исследования мобильного робота с опорными стойками и внутренним телом, совершающим стационарное вращательное движение вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью..... 102
4.3. Лабораторная модель и экспериментальные исследования мобильного робота перемещающегося за счет периодического заклинивания опорных элементов..... 109
4.4 Выводы по четвертой главе 116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... 118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... 120
ПРИЛОЖЕНИЕ А Справка о внедрении результатов диссертационной работы 134

ВВЕДЕНИЕ

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.

Способы перемещения мобильных роботов во многом зависят от типа используемых двигателей и движителей, которые определяют такие показатели как маневренность, скорость, устойчивость движения, а также возможность перемещения по различным поверхностям. В зависимости от типа используемых движителей их можно разделить на колесные, гусеничные, шагающие и роботы, использующие нестандартные типы движителей.

Среди мобильных роботов можно выделить шагающие и «шагающеподобные». 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 и др., в том числе учеными Волгоградского государственного технического университета [1-9]. 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). Шагающие мобильные роботы в условиях неорганизованной среды имеют существенные преимущества по сравнению с другими типами роботов, использующими традиционные типы движителей [10], так как они обладают высокой устойчивостью движения и возможностью адаптации к различным неровным и наклонным поверхностям. Среди них можно выделить отдельный тип – лазающие роботы. Они предназначенные для перемещения по вертикальным поверхностям стен, столбам, балкам. Их конструкция

использует различные типы движителей, обеспечивающие дискретное взаимодействие с опорной поверхностью в тяговом режиме работы. В качестве наиболее часто применяемых можно выделить: механические захваты, механизмы на основе использования сил трения, магнитного поля, вакуумные присоски и др. [11-17].

В то же время дискретность взаимодействия (периодическая остановка одной из точек движителя) 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, которые являются относительно новыми с точки зрения конструктивных особенностей и алгоритмов управления приводами движителей. Они относятся к локомоционным (мобильным) системам с вибрационным возбуждением и представляют систему твердых тел, взаимодействующих в общем случае между собой и с внешней средой и совершающих колебательные движения друг относительно друга [18]. Большой вклад в развитие теории и методов анализа вибрационного перемещения внесен И.И. Блехманом, Р.Ф. Нагаевым и др [19-22]. С точки зрение конструктивных особенностей капсульные роботы могут быть лишены внешних частей (движителей), 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 [23]. 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 и их коллег [24-36].

В научных работах перемещение корпуса робота объясняется ассиметричным движением внутреннего тела в различные стороны. Рассматриваются режимы управления по скорости и ускорению внутреннего тела: в одном случае варьируемыми параметрами являются величины скоростей внутреннего тела при движении между фиксированными крайними положениями с постоянной скоростью относительно корпуса, различной в направлении желаемого перемещения корпуса робота и в противоположном направлении; в другом случае – варьируемыми параметрами служат длины интервалов перемещения внутреннего тела и абсолютная величина ускорения при движении внутреннего тела по ним [23]. При этом для движения корпуса мобильного робота силы инерции, приложенные к нему, должны превосходить по величине силы сопротивления, действующие на корпус со стороны окружающей среды при движении в одном направлении и отсутствующие при движении в другом, например, анизотропное трение.

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 инерции, приложенные к корпусу, создаются за счет стационарного движения внутренних масс. Особенность движения состоит в отсутствии проскальзывания, поскольку в момент контакта с поверхностью происходит жесткая фиксация опор.

Таким образом разработка мобильных роботов с опорными элементами и подвижными внутренними телами и методов их управления являются актуальными задачами поискового исследования.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка методов управления взаимодействием 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 перемещение 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 перемещения 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 механические системы 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 мультиконференции по проблемам управления «МКПУ», 2021, 2023 г., Россия.

– XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, 2023 г., г. Санкт-Петербург, Россия.

– XXXV Международная инновационная конференция «МИКМУС», 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 MMESE», 2024 г., г. Санкт-Петербург, Россия.

– XXXII, XXXIII, XXXV Международные научно-технические конференции «Экстремальная робототехника», 2021, 2022, 2024 г., г. Санкт-Петербург, Россия.

– Международная конференция по интерактивной коллаборативной робототехнике (ICR 2024), 2024 г. г. Мехико, Мексика.

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. Обсуждение полученных результатов в совместных работах проводились с соавторами.

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.

ГЛАВА 1. Обзор и анализ мобильных роботов, их классификация по типу применяемых движителей

Цель обзора и анализа состоит в определении тенденций применения наиболее простых по конструкции движителей, но обеспечивающих близкую к «идеальной» маневренность на гладких, шероховатых поверхностях без проскальзывания по ним.

Под «идеальной» маневренностью понимается возможность твердого тела совершать любое наперед заданное движение.

Подробно рассматриваются мобильные роботы с подвижными внутренними массами (капсульные роботы); роботы, использующие шагающеподобные типы движителей (лазающие роботы); их математические модели, позволяющие устанавливать закономерности движения.

Также рассматриваются и алгоритмы управления целенаправленным движением капсульных мобильных роботов, как наиболее близких по конструктивным особенностям к мобильным роботам с опорными элементами и подвижным внутренним телом.

1.1 Показатели, характеризующие конструктивные и эксплуатационные свойства роботов, перемещающихся по плоским поверхностям

Классификация мобильных роботов по типу движителей позволяет систематизировать подходы к проектированию и применению робототехнических систем. Движители определяют способ взаимодействия робота с окружающей средой, его маневренность, энергоэффективность и возможности адаптации к разным условиям, их выбор может основываться на опыте и предпочтениях разработчика или зависеть от условий эксплуатации робота [10]. Известна диаграмма В.В. Лапшина [37], в которой проанализированы энергозатраты транспортных средств на передвижение в зависимости от типа движителя и скорости движения. Она позволяет оценить

целесообразность использования того или иного движителя. Помимо этого, существуют и другие критерии оценки, определяющие эффективность перемещения робота.

Сложность конструкции является одним из ключевых параметров, определяющих область применения мобильного робота, его надежность, энергоэффективность и стоимость производства.

Маневренность – способность изменять направление движения, осуществлять повороты в ограниченном пространстве и адаптироваться к различным условиям окружающей среды. А также вводится понятие «идеальной» маневренности, под которым понимается возможность робота совершать любое наперед заданное движение без скольжения и буксования опор [38].

Комфортабельность движения определяется плавностью перемещения, уровнем вибраций и ударных нагрузок, передаваемых на конструкцию робота, а также стабильностью контакта с опорной поверхностью.

Профильная проходимость – способность мобильного робота преодолевать препятствия, изменять траекторию движения в условиях сложного рельефа и адаптироваться к различным характеристикам опорной поверхности.

Скорость движения является важным параметром, определяющим эффективность при выполнении различных задач. Она зависит от типа движителей, механической конструкции, условий эксплуатации и алгоритмов управления.

1.1.1 Мобильные роботы с колесными типами движителей

Мобильные роботы с колесными движителями занимают одно из ведущих мест в современной робототехнике. Они широко используются в промышленности, логистике, медицинских учреждениях, а также в быту [39]. Основная особенность колесных роботов заключается в их способности быстро и с минимальными энергозатратами перемещаться по ровным и

твёрдым поверхностям, что делает такие системы предпочтительными для эксплуатации на складах (рисунок 1.1) или в офисах [40]. Кроме того, колесные роботы часто используются для выполнения задач, требующих высокой точности позиционирования, таких как доставка грузов (рисунок 1.2, а), патрулирование или уборка помещений (рисунок 1.2, б).

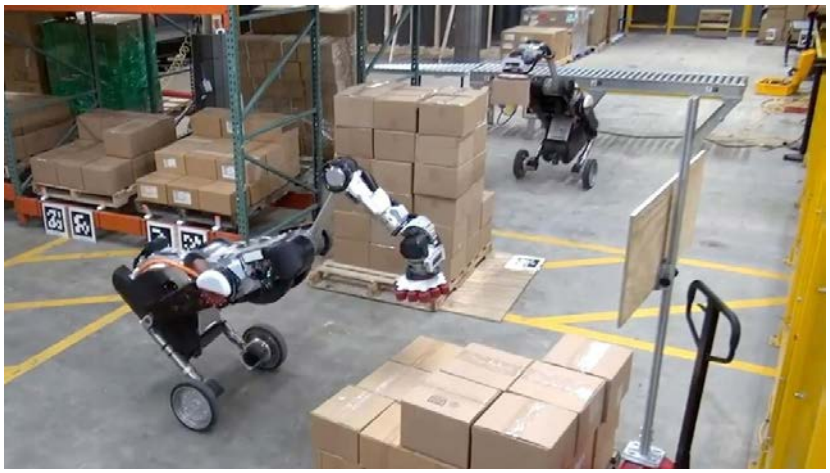


Рисунок 1.1 – Колесный мобильный робот с установленным манипулятором

а)

б)

Рисунок 1.2 – Колесные мобильные роботы: а) робот для складских помещений «Seat Factory 4.0»; б) робот для уборки помещений «Pudu Robotics CC1»

Колесные движители являются наиболее простыми с точки зрения конструкции. Они характеризуются минимальным числом подвижных элементов, несложными кинематическими схемами и относительно низкими требованиями к системам управления.

Наиболее распространёнными являются платформы с дифференциальным приводом, которые позволяют управлять направлением движения путём изменения скорости вращения расположенных на левом и правом бортах колёс, рисунок 1.3, а. Мобильный робот имеет шесть степеней свободы (DOF). Три степени свободы: *x, y* и z – связаны с тремя координатными осями, позволяющими определить положение центра масс объекта в трехмерном пространстве, остальные три относятся к ориентации робота в пространстве. Это такие значения, как крен (боковой наклон, или раскачивание корпуса робота относительно оси движения), тангаж (наклон аппарата относительно горизонтальной поперечной оси, т. е. наклон вниз или подъем вверх передка робота) и рыскание (небольшие изменения направления движения аппарата вправо или влево относительно его курса). Робот с дифференциальным приводом перемещается в двухмерной плоскости, и его положение в любой момент можно описать двумя глобальными координатами *X* и *Y*, лежащими в горизонтальной плоскости. При этом курс робота обозначается как θ, рисунок 1.3, б.

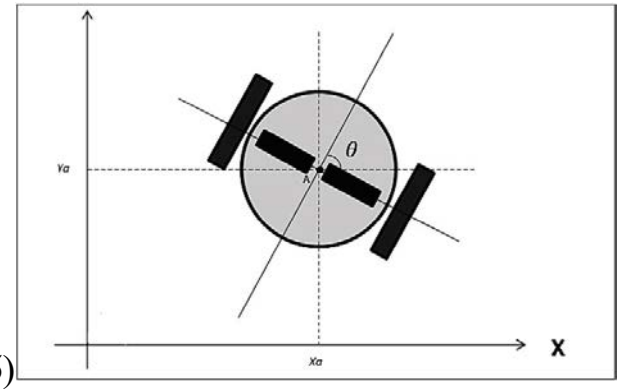
а) б) 

Рисунок 1.3 – Мобильный робот с дифференциальным приводом
а) робот «iRobot Roomba»; б) положение робота в системе координат *X, Y* и θ

Колесные мобильные роботы обладают высокой комфортабельностью движения, наибольшей скоростью среди всех рассматриваемых типов и высокой профильной проходимостью на твердых и ровных покрытиях. Их минимальное сопротивление качению обеспечивает плавное перемещение с

низким уровнем вибраций и ударных нагрузок, а также позволяет достигать высоких значений линейной скорости и делает их идеальными для применения в условиях с низкими требованиями к профильной проходимости [41], а достаточная, но ограниченная маневренность может быть обеспечена использованием рулевого управления дифференциального привода всенаправленных (омни) колес, которые позволяют роботу перемещаться в любом направлении без необходимости изменения ориентации корпуса, рисунок 1.4 [42], однако, такое движение осуществляется с проскальзыванием по поверхности.

Рисунок 1.4 – Всенаправленное колесо (омни-колесо)

Омни-колеса представляют собой конструкцию, состоящую из основного колеса и ряда роликов, расположенных по его окружности под углом 45° или 90° к оси вращения. Это позволяет распределять силы между продольным и поперечным направлениями, обеспечивая свободу движения в любой плоскости. В работе [43] подчеркивается, что использование омни-колёс позволяет значительно улучшить маневренность и сократить время выполнения задач в замкнутых пространствах. Также в [44] описывается использование омнинаправленных платформ для задач, требующих высокой точности, таких как сборка товаров на складах или инспекция помещений. Омни-колёса позволяют осуществлять микродвижения без необходимости

поворота всей платформы, что упрощает задачи позиционирования. В [45] рассматривается простейшая неголономная модель омни-колеса, рисунок 1.5.

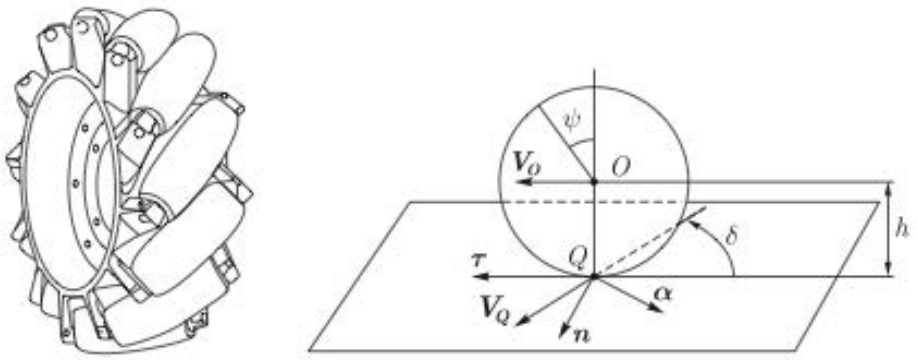


Рисунок 1.5 – Неголономная модель омни-колеса

Где τ, n – касательный и нормальный векторы к плоскости колеса в точке контакта, такие, что вектор $\tau \times n$ направлен вертикально вверх, α – единичный вектор вдоль оси закрепления роликов, V_Q – скорость точки контакта, ψ – угол поворота колеса, h – радиус колеса.

Также получены уравнения движения катящейся по горизонтальной плоскости тележки с произвольным числом омни-колес, схема которой представлена на рисунке 1.6.

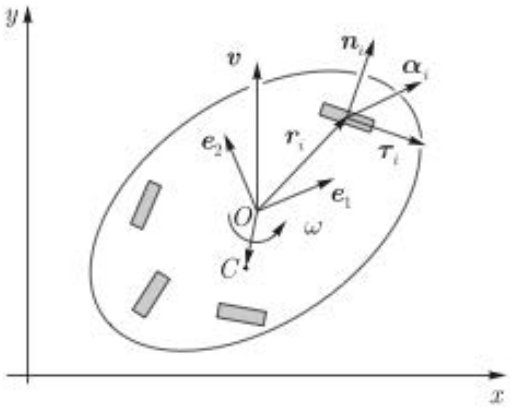


Рисунок 1.6 – Схема платформы с омни-колесами

Где: Oe_1e_2 – подвижная система координат, которая жестко связана с платформой; координаты начала отсчета O и угол поворота осей e_1, e_2

относительно неподвижной системы координат – x, y и φ соответственно; r_i, τ_i, α_i, $i = 1, \ldots, n$, векторы, характеризующее положение, плоскость и направление оси роликов каждого колеса, являются постоянными в подвижных осях; $v = (v_1, v_2)$ – скорость начала подвижной системы координат O, спроецированная на подвижные оси; ω – угловая скорость платформы;

Известны работы, в которых рассматривается модель сфероробота, состоящего из сферической оболочки, внутри которой расположена платформа с тремя одинаковыми омни-колесами, под которыми подразумеваются меканум-колеса, рисунок 1.7 [46].

Рисунок 1.7 – Сферический мобильный робот с внутренней омни-колесной платформой

Эти решения особенно востребованы в условиях ограниченного пространства, где требуется высокая маневренность [44, 47].

Несмотря на множество преимуществ, колесные роботы имеют ряд ограничений. Одним из главных недостатков является плохая адаптацию к сложным неровным поверхностям, мягким или рыхлым грунтам, на которых комфортабельность и скорость движения робота значительно снижается из-за жесткости колесной подвески, ухудшения сцепления и возможного пробуксовывания, увеличенного сопротивления движению, из-за чего

необходимо применение амортизационных систем, адаптивных подвесок и использование колес с изменяемым профилем, однако такие решения лишь частично компенсируют ограничения данного типа движителей. При встрече с препятствиями (ступени, неровности, рыхлый грунт) проходимость колесных роботов значительно снижается, а максимальная высота преодолеваемого колесом препятствия равна 2/3 его диаметра [48].

Научные исследования в области колесных роботов сосредоточены на решении ключевых проблем, связанных с увеличением их проходимости, энергоэффективности и адаптивности. Например, ведутся разработки гибридных систем, которые сочетают колесные движители с другими типами движителей, например, гусеничными или шагающими [49-52]. Также особое внимание уделяется оптимизации алгоритмов управления и навигации, что позволяет повысить точность и устойчивость движения [53, 54].

1.1.2 Мобильные роботы с шагающими типами движителей

Шагающие роботы представляют собой одну из наиболее сложных и перспективных категорий мобильных робототехнических систем. Использование ног в качестве движителей обеспечивает уникальные возможности адаптации к различным неровным и наклонным поверхностям, таким как каменистая почва, лестницы или природные ландшафты [9, 55, 56]. Дискретный характер взаимодействия шагающих движителей с опорной поверхностью позволяет минимизировать зависимость от сцепных свойств покрытия и добиться высокой комфортабельности движения.

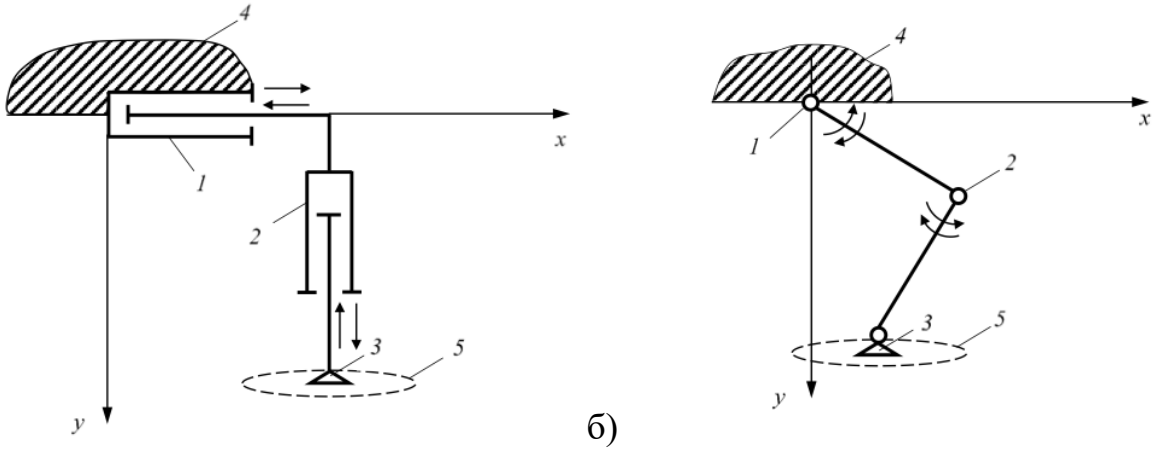
Благодаря независимому управлению движением каждой ноги они могут разворачиваться на месте и двигаться боком, поэтому обладают маневренностью близкой к «идеальной».

Шагающие движители способны преодолевать препятствия, недоступные для колесных или гусеничных роботов [57].

Шагающие роботы являются наиболее сложными в конструктивном плане, поскольку их движение основано на многозвенных механизмах,

требующих точного управления. Чем больше степеней свободы у робота, тем сложнее его конструкция и алгоритмы управления [58, 59].

Основным элементом шагающего движителя является стопа, которая контактирует с опорной поверхностью и в фазе переноса может перемещаться относительно нее в новое положение. Это осуществляется с помощью механизмов шагания, оснащенных приводами двух типов: обеспечивающими поступательное перемещение одного звена относительно другого и выполняющими вращательное движение звеньев вокруг общей оси. Конструкция механизмов шагания может включать последовательную цепь звеньев, параллельное соединение звеньев с рабочим телом (стопой) или комбинированную параллельно-последовательную структуру [60]. Примеры кинематических схем подобных движителей представлены на рисунках 1.8-1.10 [61].



а) б)

Рисунок 1.8 – а) Ортогональный движитель с последовательной цепью приводов поступательного перемещения: 1, 2 – привода, 3 – стопа, 4 – корпус робота, 5 – траектория программного движения;

б) Зооморфный движитель с последовательной цепью приводов вращательного перемещения: 1, 2 – привода, 3 – стопа, 4 – корпус робота, 5 – траектория программного движения

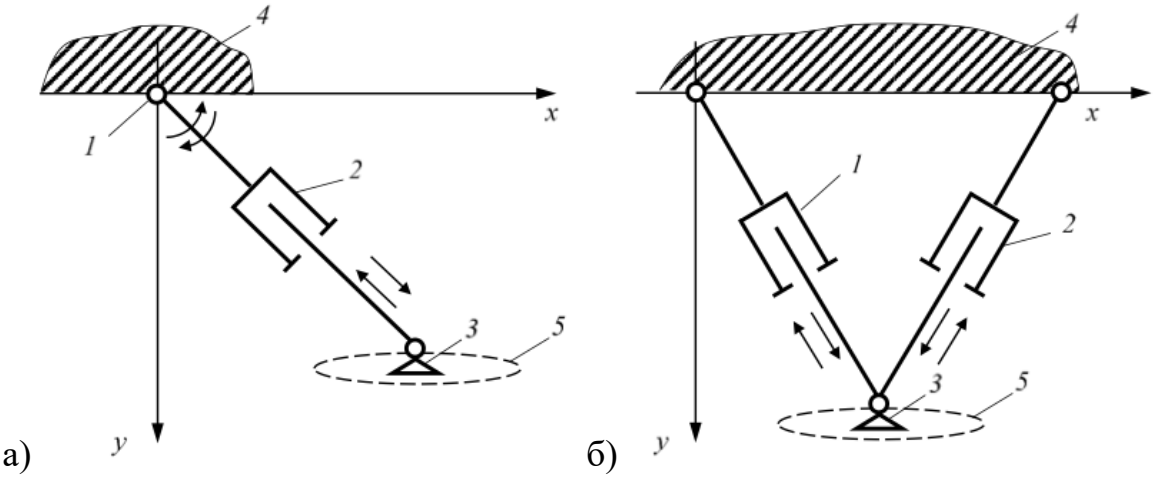


Рисунок 1.9 – а) Телескопический движитель с последовательной цепью приводов вращательного и поступательного движения: 1, 2 – привода, 3 – стопа, 4 – корпус робота, 5 – траектория программного движения;

б) Движитель с параллельной цепью приводов поступательного движения: 1, 2 – привода, 3 – стопа, 4 – корпус робота, 5 – траектория программного движения

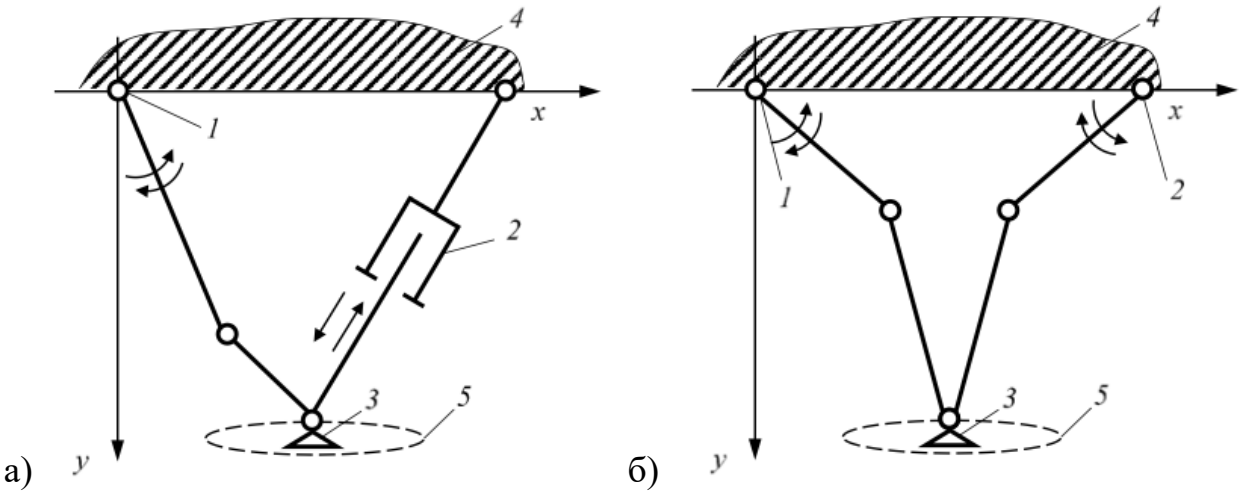


Рисунок 1.10 – а) Движитель с параллельной цепью приводов вращательного и поступательного движения: 1, 2 – привода, 3 – стопа, 4 – корпус робота, 5 – траектория программного движения;

б) Движитель с параллельной цепью приводов вращательного движения: 1, 2 – привода, 3 – стопа, 4 – корпус робота, 5 – траектория программного движения

Шагающие мобильные роботы могут быть классифицированы как двуногие, четвероногие и многоногие. Количество ног определяет их устойчивость и маневренность.

Двуногие роботы (антропоморфные) наиболее сложны в управлении, так как требуют постоянного удержания равновесия. Примером является Atlas от компании Boston Dynamics, который демонстрирует не только способность ходить, но и выполнять прыжки, перевороты и сложные манипуляции, рисунок 1.11. В работе [62] рассматриваются алгоритмы стабилизации двуногих роботов, которые позволяют им адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды в реальном времени.

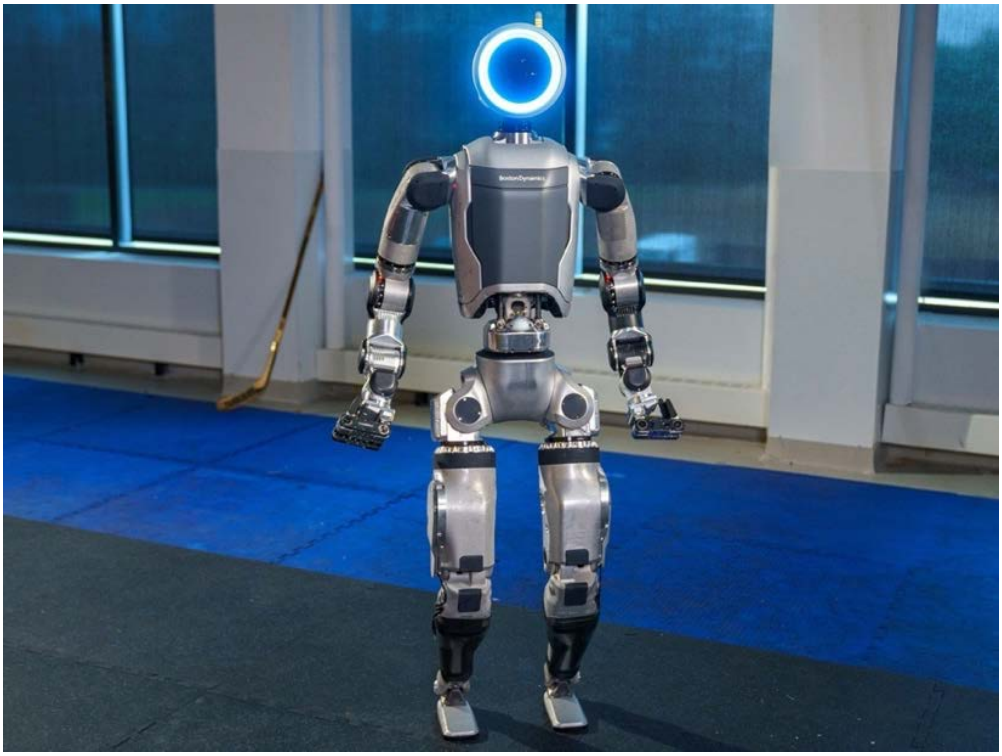


Рисунок 1.11 – Антропоморфный робот Atlas (Boston Dynamics)

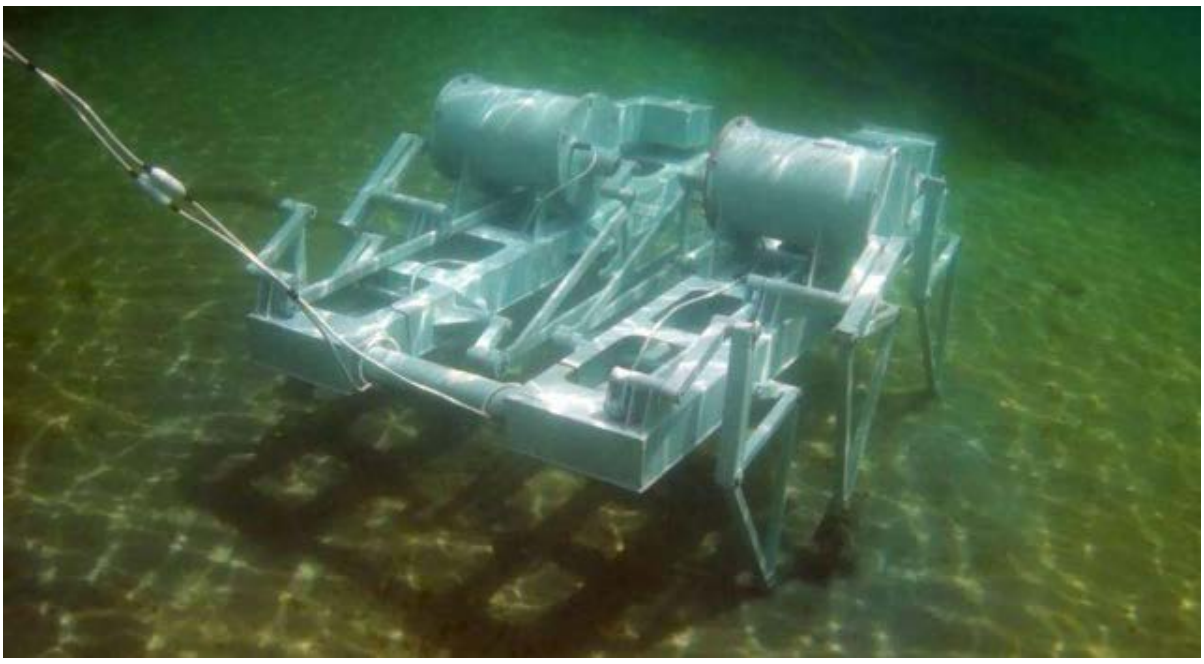
Четвероногие роботы обеспечивают высокую устойчивость и широко применяются в условиях пересечённой местности, рисунок 1.12. В работе [63] представлено описание конструкции, а также методы управления. Данный робот используется в военных миссиях для транспортировки тяжёлых грузов

в труднодоступные зоны, вследствие его высокой проходимости и автономности [64].

Рисунок 1.12 – Четвероногий робот BigDog (Boston Dynamics)

Многоногие роботы обладают ещё большей устойчивостью и способны продолжать движение, даже если одна или несколько ног теряет сцепление с поверхностью. Это делает их идеальными для задач в сложных условиях, таких как исследование пещер или глубоководных зон [65]. Энергоэффективность шагающего способа перемещения зависит от таких параметров как работа по уплотнению грунта, а также работа, затрачиваемая на отрыв стопы от него. Для экстремальный условий, например, при движении по влагонасыщенным грунтам или под водой это является особенно важным [9, 66-71]. Известны примеры таких роботов, рисунок 1.13.

а)



б)

в)

Рисунок 1.13 – Роботы, используемые в экстремальных условиях:
а) Шагающий подводный робот «МАК-1» (ВолгГТУ, Россия);
б) Шагающий робот «Ортоног» (ВолгГТУ, Россия);
в) Шагающая машина «Восьминог» (ВолгГТУ, Россия).

Основными недостатками шагающих мобильных роботов являются наличие большого количества степеней свободы в механизмах ног, что может вызывать колебания и неравномерность перемещения и требует сложных алгоритмов управления для координации движений ног, механизмов стабилизации и систем амортизации, а также относительно низкая скорость движения по сравнению с колесными и гусеничными роботами. Исключения составляют специализированные двуногие и четвероногие роботы,

использующие динамическое равновесие и продвинутые алгоритмы управления, позволяющие достичь сравнительно высоких скоростей.

1.1.3 Капсульные мобильные роботы

Капсульные роботы представляют собой особый класс мобильных робототехнических систем. Локомоционная система капсульного робота представляет собой механизм, обеспечивающий его передвижение в ограниченных пространствах, таких как внутренние органы человека, трубопроводы или замкнутые технические каналы. В отличие от традиционных мобильных платформ, капсульные роботы используют принципы перемещения, основанные на изменении внутренней структуры, распределении масс и взаимодействии с окружающей средой, что позволяет отказаться от традиционных внешних движителей. Это позволяет данным типам роботов быть компактными, энергоэффективными и пригодными для работы в ограниченных пространствах. Их конструкция чаще всего состоит из жесткого корпуса, внутри которого расположены внутренние тела (одно или несколько), способные двигаться относительного корпуса под действием приводов. В процессе перемещения внутренние тела взаимодействуют только с корпусом, их взаимодействие с окружающей средой отсутствует. Корпус же взаимодействует как с внутренними телами, так и с внешней средой. Приложенные к внутреннему телу силы со стороны привода вызывают силу реакции, приложенную к корпусу, в результате чего изменяется скорость его движения относительно среды. Изменение скорости корпуса приводит к изменению силы сопротивления (силы трения), действующей на него со стороны среды. Силы, генерируемые приводами, для рассматриваемой механической системы (корпус плюс внутренние тела) являются внутренними силами, а сила сопротивления среды – внешней. При этом для движения корпуса мобильного робота силы инерции, приложенные к нему, должны превосходить по величине силы сопротивления, действующие на корпус со

стороны окружающей среды, например, анизотропное трение, а перемещение корпуса происходит с проскальзыванием.

Управляя движением внутренних тел за счет внутренних сил, можно управлять внешней силой, действующей на локомоционную систему, и тем самым – движением системы как целого [23]. В работах [72, 73] рассматриваются режимы управления по скорости и ускорению внутреннего тела, в одном случае варьируемыми параметрами являются величины скоростей внутреннего тела при движении между фиксированными крайними положениями с постоянной скоростью относительно корпуса, различной в направлении желаемого перемещения корпуса робота и в противоположном направлении, в другом случае – варьируемыми параметрами служат длины интервалов перемещения внутреннего тела и абсолютная величина ускорения при движении внутреннего тела по ним.

Их траектория движения определяется характеристиками окружающей среды и параметрами колебательного движения внутренних масс. Управляемое изменение направления движения возможно, но требует сложных алгоритмов управления и дополнительных конструктивных решений. Такой принцип перемещения эффективен в средах с высоким сопротивлением, включая жидкости и мягкие ткани организма. Например, в медицинских роботах, предназначенных для эндоскопических исследований, внутренняя масса может перемещаться циклически, создавая тяговый импульс, достаточный для продвижения капсулы.

В работах Ф. Л. Черноусько, А. А. Болотника и их коллег [23, 27, 74-77] представлена математическая модель движения тел с подвижными внутренними массами. Расчетная схема представлена на рисунке 1.14. Она состоит из двух тел: корпуса массой M, взаимодействующего с окружающей средой и внутреннего тела массой m, взаимодействующего только с корпусом. Корпус и внутреннее тело моделируются материальными точками. Между этими точками действует управляющая сила и на корпус действует сила

сопротивления, зависящая от скорости его движения относительно неподвижной среды (1.1, 1.2).

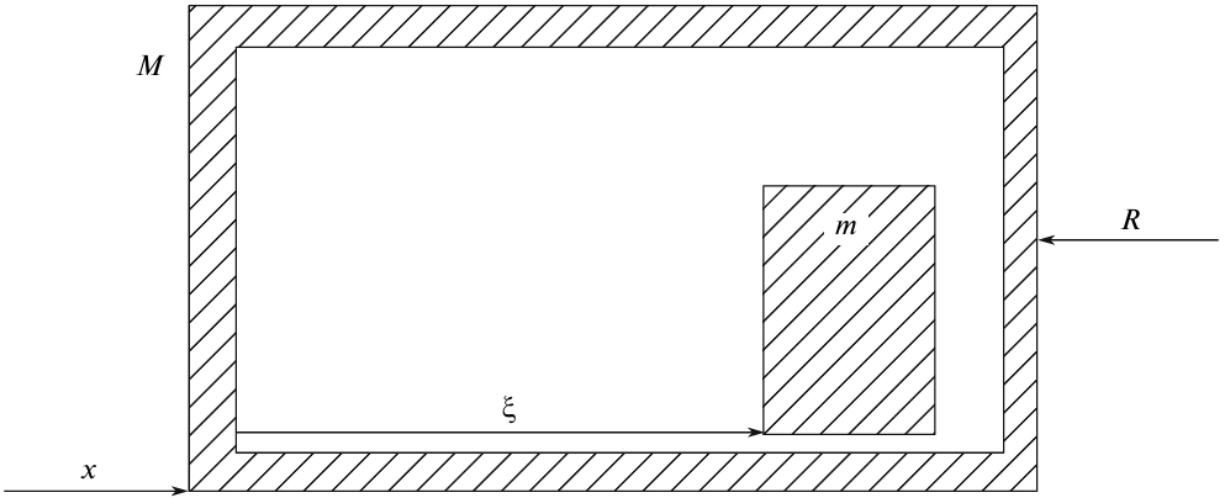


Рисунок 1.14 – Расчетная схема капсульного мобильного робота

Движение описанной механической системы описывается уравнениями:

$$M\ddot{x} = f + R\left(\dot{x}\right) \tag{1.1}$$

$$\left(M + m\right)\ddot{x} = -m\ddot{\xi} + R\left(\dot{x}\right) \tag{1.2}$$

где: x – координата корпуса вдоль линии движения в неподвижной системе отсчета (абсолютное смещение корпуса), ξ – координата, описывающая положение внутреннего тела относительно корпуса (относительное смещение внутреннего тела), f – сила, с которой внутреннее тело действует на корпус, $R\left(\dot{x}\right)$ – сила сопротивления внешней среды движению корпуса, удовлетворяющая неравенству $R\left(\dot{x}\right)\dot{x} \le 0$.

В [67, 68, 72] рассматривается задача оптимизации движения в сопротивляющейся среде (корпус движется по прямой в горизонтальной плоскости и на него действует сухое трение, подчиняющееся закону Кулона). Исследования показывают, что использование резонансных частот движения

внутренних масс позволяет повысить эффективность локомоции, а также, что изменение параметров смещения внутренней массы (амплитуды, частоты) позволяет добиться оптимального соотношения между энергозатратами и скоростью движения робота. Работы [78-80] посвящены динамике и управлению движением твердого тела с подвижными внутренними массами в жидкости.

Колебательное движение капсульного мобильного робота основано на изменении формы капсулы (корпуса), что приводит к возникновению импульсных колебаний, создающих движение. Вибрационные движения могут инициироваться за счёт изменения давления внутри капсулы или применения внутренних подвижных элементов, совершающих возвратно-поступательные движения. В медицинских роботах этот принцип может использоваться, например, для передвижения внутри ЖКТ, обеспечивая стабильное продвижение капсулы даже в условиях непредсказуемого изменения среды [81]. Исследования [82] показывают, что наилучшие результаты достигаются при сочетании колебательных движений с направленными смещениями центра массы. Это позволяет капсуле перемещаться не хаотично, а в заранее заданном направлении. При наличии упругих и диссипативных элементов капсульный робот становится колебательной системой, обладающей собственной частотой и характерным временем затухания собственных колебаний [31, 32, 83-86].

Еще одним способом приведения капсульного робота в движение является использование виброприводов. Большой вклад в развитие теории и методов анализа вибрационного перемещения внесен И.И. Блехманом [19, 21, 87]. Взаимодействие вибрирующей капсулы со стенками ограниченного пространства (например, кишечника человека или трубопровода) создаёт силы трения, которые способствуют продвижению устройства. В [23] представлены оптимальные параметры вибраций (амплитуда, частота), позволяющие минимизировать энергозатраты при максимальной эффективности движения. Для вибрационного движения характерна зависимость скорости перемещения от параметров частоты возбуждения. Оптимальная амплитуда и частота

позволяют добиться резонансных эффектов, способствующих наибольшей эффективности движения капсулы в ограниченном пространстве. Некоторые капсульные роботы используют активные приводы, такие как пьезоэлектрические [88] или электромагнитные [89], они вызывают контролируемые микроколебания корпуса, обеспечивая направленное движение.

Капсульные роботы характеризуются наименьшей комфортабельностью и скоростью движения, а также обладают ограниченной профильной проходимостью, поскольку их локомоция основана на вибрационных или инерционных принципах, а перемещение происходит в сопротивляющихся средах. Периодическое изменение силы сопротивления корпуса с опорной поверхностью и отсутствие плавности движения внутреннего тела могут приводить к скачкообразным перемещениям и высоким нагрузкам на корпус.

Маневренность капсульных роботов во многом зависит от количества внутренних тел и их системы управления. «Идеальная» маневренность возможна, но требует комплексного подхода к конструкции робота, организации алгоритма согласованного управления внутренними телами и учета характеристик окружающей среды или опорной поверхности, что на практике является довольно сложной многокритериальной задачей, при этом при движении по поверхности будет происходить с пересказыванием.

1.1.4 Сравнительная таблица рассмотренных типов движителей

В таблице 1.1 представлен сравнительный анализ четырех типов мобильных роботов – колесных, гусеничных, шагающих и капсульных – по пяти ключевым параметрам: сложность конструкции, маневренность, комфортабельность движения, профильная проходимость и скорость передвижения. Оценка проводилась по пятибалльной шкале, где «+++++» – наилучший показатель, а «+» – наихудший.

Таблица 1.1 – Сравнительный анализ колесных, гусеничных, шагающих и капсульных мобильных роботов

Показатель	**Тип движителей**			
	Колесные	**Гусеничные**	**Шагающие**	**Капсульные**
Сложность конструкции	++++	+++	+	++
Маневренность	+++	++	+++++	+++
Комфортабельность движения	+++	+++	++	+
Профильная проходимость	++	+++	+++++	+
Скорость движения	++++	+++	+	+

Колесные роботы обладают относительно простой конструкцией, поскольку их кинематическая схема включает минимальное количество подвижных элементов, а управление движением осуществляется путем регулирования скорости вращения колес. Гусеничные роботы несколько сложнее из-за необходимости поддержания натяжения гусениц и использования большего числа механических узлов. Шагающие роботы имеют самую сложную конструкцию, так как требуют многозвенных механизмов, точной координации движений и сложных систем управления для обеспечения стабильного передвижения. Капсульные роботы, несмотря на внешнюю простоту, имеют сложные внутренние механизмы и требуют высокоточных систем управления внутренними массами, что делает их технически сложными в реализации.

Наивысшей маневренностью близкой к «идеальной» обладают колесные роботы с омни-колесами, способные двигаться в любом направлении без изменения ориентации корпуса, шагающие и капсульные роботы, однако колесные омни-платформы и капсульные роботы осуществляют движение по поверхности с проскальзыванием, что приводит к повышению энергозатрат, за

счет трения. Гусеничные роботы менее маневренны, поскольку их поворот требует дифференциального привода и значительного трения с поверхностью.

Колесные роботы демонстрируют наилучшие показатели скорости, комфортабельности и профильной проходимости на твердых и ровных поверхностях благодаря низкому сопротивлению качению и отсутствию ударных нагрузок. Гусеничные платформы обеспечивают достаточно плавное движение за счет распределения нагрузки, но могут генерировать вибрации при движении по твердым покрытиям. Шагающие роботы, особенно многоногие, могут адаптироваться к неровностям, но из-за дискретного взаимодействия с опорной поверхностью создают периодические колебания корпуса. Капсульные роботы имеют наихудший показатель комфортабельности, так как их передвижение основано на силах инерции, вибрациях или резких изменениях положения, что приводит к нестабильности движения.

Шагающие роботы обладают наивысшей профильной проходимостью, так как способны преодолевать препятствия, подниматься по лестницам и адаптироваться к сложному рельефу. Гусеничные роботы также демонстрируют высокий уровень проходимости, особенно на пересеченной местности, но уступают шагающим по возможности преодоления вертикальных преград. Колесные роботы имеют низкую профильную проходимость, так как их движение ограничено характеристиками опорной поверхности. Капсульные роботы, предназначенные для движения в замкнутых пространствах, практически не способны преодолевать профильные препятствия.

По скорости движения гусеничные, шагающие и капсульные роботы уступают колесным. Шагающие и капсульные роботы демонстрируют самую низкую скорость в связи с конструктивными особенностями и сложностью реализации алгоритмов координации движений.

1.2 Шагающеподобные мобильные роботы, предназначенные для перемещения по специализированным поверхностям

Шагающеподобные роботы относятся к роботам, дискретно взаимодействующим с опорной поверхностью. Среди них можно выделить отдельный класс – лазающие роботы. Под дискретным, периодическим, взаимодействием с опорной поверхностью понимается «щагающеподобный» режим движения, который реализуется, например, посредством согласованной работы нескольких приводов [15-17, 90-92]. Подобный способ перемещения используется при движении роботов очистителей вертикальных поверхностей, рисунок 1.15, а, роботов с захватно-поворотными устройствами, рисунок 1.16 [91, 93] или, например, «Косморобот», представленный ЦНИИ РТК, рисунок 1.15, б [94].

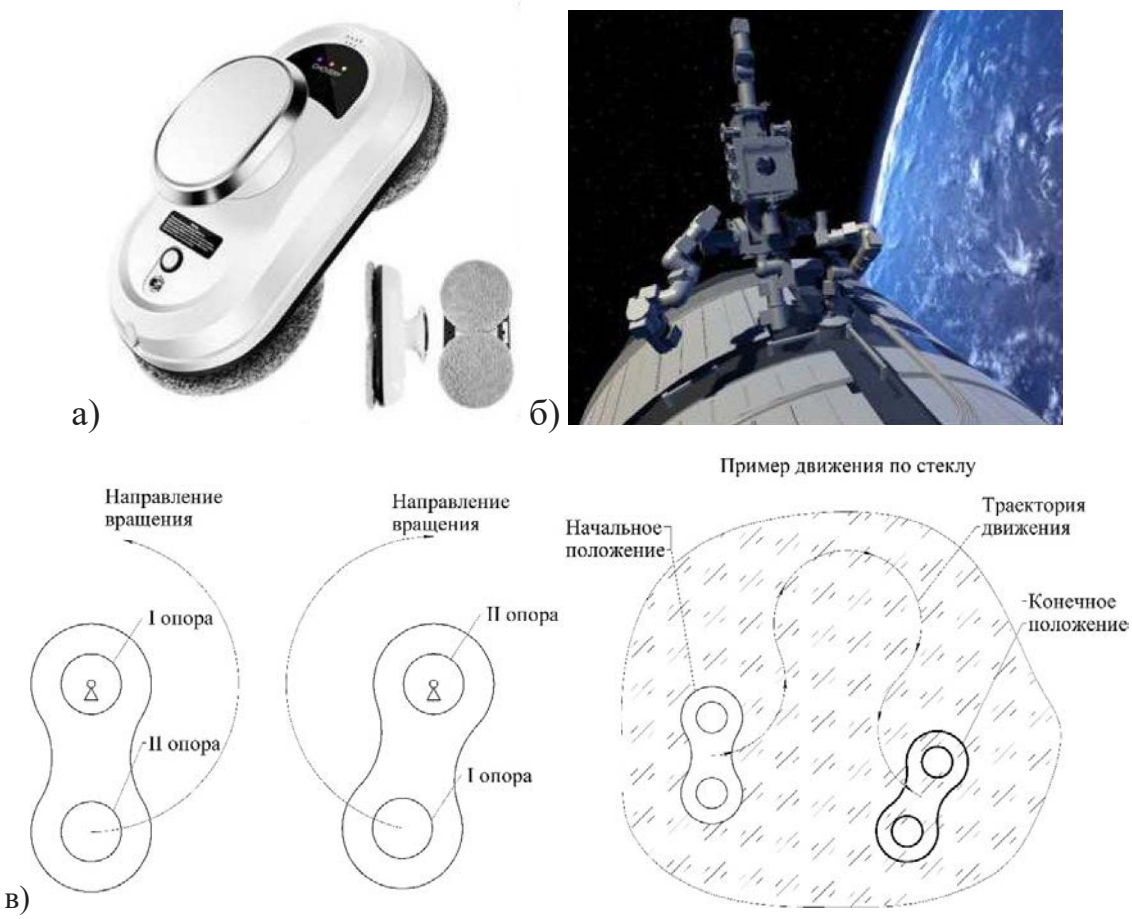


Рисунок 1.15 – Конструкции роботов: а) робот очиститель; б) «Косморобот»; в) схема движения робота очистителя

На рисунке 1.15, в, представлена схема движения робота мойщика [93], перемещение происходит следующим образом: одна из «опор» робота находится в постоянном зацеплении с поверхностью, в то время как другая – в свободном состоянии. Под действием одного из приводов вращательного движения, находящегося внутри каждой из «опор» робота, происходит проворачивание корпуса вокруг неподвижной «опоры».

Существующие конструкции подобных роботов для обеспечения произвольного движения в плоскости имеют несколько согласованно работающих приводов. Например, два привода вращательного движения, рисунок 1.15, а, или привод вращательного и поступательного движения, рисунок 1.16.

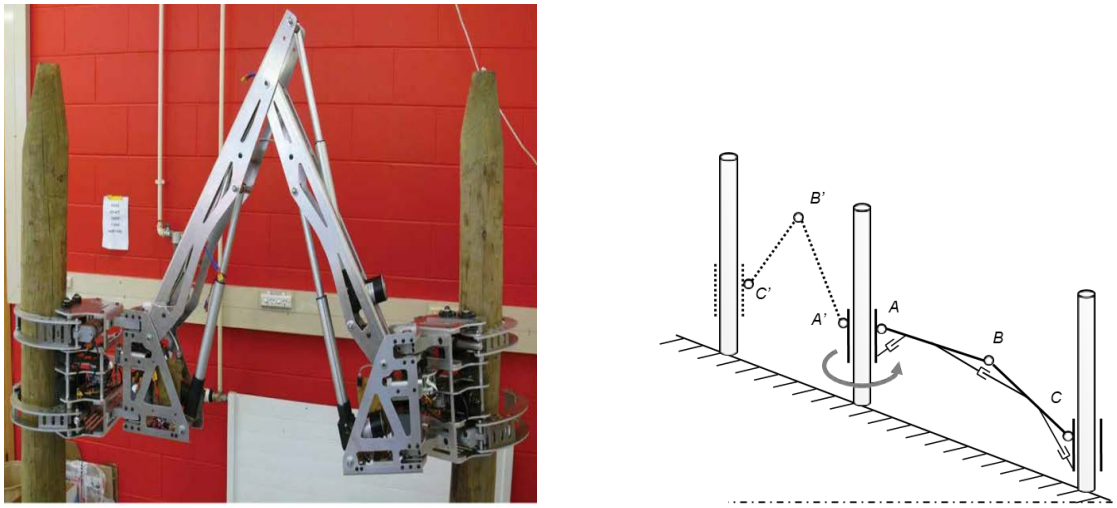


Рисунок 1.16 – Робот, перемещающийся по отдельно стоящим опорам, например, деревьям

Движение, основанное на магнитном взаимодействии, используется при перемещении по металлическим поверхностям, таким как трубы, резервуары или корпуса судов [95]. Преимущество заключается в энергонезависимости, поскольку для удержания на поверхности не требуется дополнительное питание.

Механические захваты [91, 96] применяются для удержания на неровных поверхностях, включая кирпичную кладку, камень и дерево. Они позволяют

надежно фиксироваться на точках опоры, выдерживать нагрузки, адаптироваться к неровностям и контролируемо освобождать захват для продолжения движения. В зависимости от принципа работы различают несколько типов механических захватов, включая когтеобразные, адгезионные, вакуумные, магнитные и гибридные. Когтеобразные механизмы используют подвижные пальцы или крюки, которые механически фиксируются на поверхности, зацепляясь за выступы или шероховатости. Адгезионные системы применяют материалы с высокой степенью прилипания, например, микроструктуры, имитирующие лапы гекконов. Вакуумные захваты создают разрежение воздуха, обеспечивая сцепление с гладкими поверхностями, а магнитные работают исключительно на ферромагнитных материалах.

Принцип работы механического захвата включает несколько этапов. Сначала робот приближается к точке захвата, используя сенсоры и алгоритмы управления для точного позиционирования. Затем происходит контакт с поверхностью, и привод активирует механизм фиксации, создавая необходимое усилие для надежного удержания. После фиксации система управления стабилизирует нагрузку, корректируя положение при необходимости. Освобождение захвата происходит контролируемо, после чего робот изменяет точку опоры и повторяет цикл.

Кинематические и динамические характеристики захватов зависят от свойств поверхности, типа используемого привода и требуемой нагрузки. Важно учитывать коэффициент трения, силу удержания и устойчивость к внешним воздействиям, таким как вибрации, порывы ветра, а также изменения угла наклона опорной поверхности. Для этого механизмы оснащаются сенсорными системами, которые анализируют состояние контакта и корректируют усилия.

Для эффективного передвижения лазающих роботов поверхность должна обладать рядом физических и механических свойств, обеспечивающих надежное сцепление, устойчивость к нагрузкам и предсказуемую реакцию на

воздействие захватных механизмов. Прежде всего, важна механическая прочность и стабильность материала, поскольку поверхность должна выдерживать вес робота, а также нагрузки, возникающие при его движении, включая динамические усилия, возникающие во время изменения точек опоры. Хрупкие, рыхлые или легко разрушаемые материалы могут не обеспечить надежной фиксации, что приведет к потере устойчивости и возможному падению робота. Шероховатость и геометрическая структура поверхности также играют ключевую роль. Для роботов, использующих когтеобразные или механические захваты, необходимо наличие выступов, трещин или иных структурных элементов, за которые можно зацепиться. Избыточная гладкость препятствует эффективному закреплению, а чрезмерная неровность может вызвать неравномерное распределение нагрузки, усложняя движение. В случае применения адгезионных захватов важно, чтобы поверхность обеспечивала достаточное молекулярное сцепление, поскольку загрязнения, влажность или наличие пыли могут существенно снизить эффективность прилипания. Для роботов, использующих вакуумные присоски, критически важны герметичность и низкая пористость материала, так как воздухопроницаемые или шероховатые поверхности затрудняют создание разрежения и снижают удерживающую силу. Если робот использует магнитные захваты, необходимо, чтобы поверхность была изготовлена из ферромагнитных материалов, таких как железо или сталь, поскольку немагнитные структуры, включая алюминий, медь и композиты, не способны обеспечить требуемое взаимодействие с магнитами. Контактная прочность и коэффициент трения также оказывают значительное влияние на передвижение. В случае использования фрикционных захватов поверхность не должна быть слишком скользкой, поскольку наличие масляных, влажных или ледяных покрытий снижает сцепление. Важно учитывать и устойчивость материала к нагрузке и деформациям, поскольку чрезмерная гибкость или упругость поверхности

могут ухудшить удержание и вызвать неконтролируемые изменения положения робота.

В [97] анализируются лазающие роботы с адаптивными механическими захватами. Вакуумные присоски [98, 99] являются одними из наиболее распространённых решений для удержания робота на гладких поверхностях, таких как стекло или металл. Принцип работы заключается в создании разреженного пространства между присоской и поверхностью, что создаёт необходимую силу сцепления.

Исследование [100, 101] демонстрирует, что вакуумные присоски обеспечивают высокую надёжность на ровных поверхностях, однако их эффективность снижается при наличии неровностей или загрязнений, рисунок 1.17.

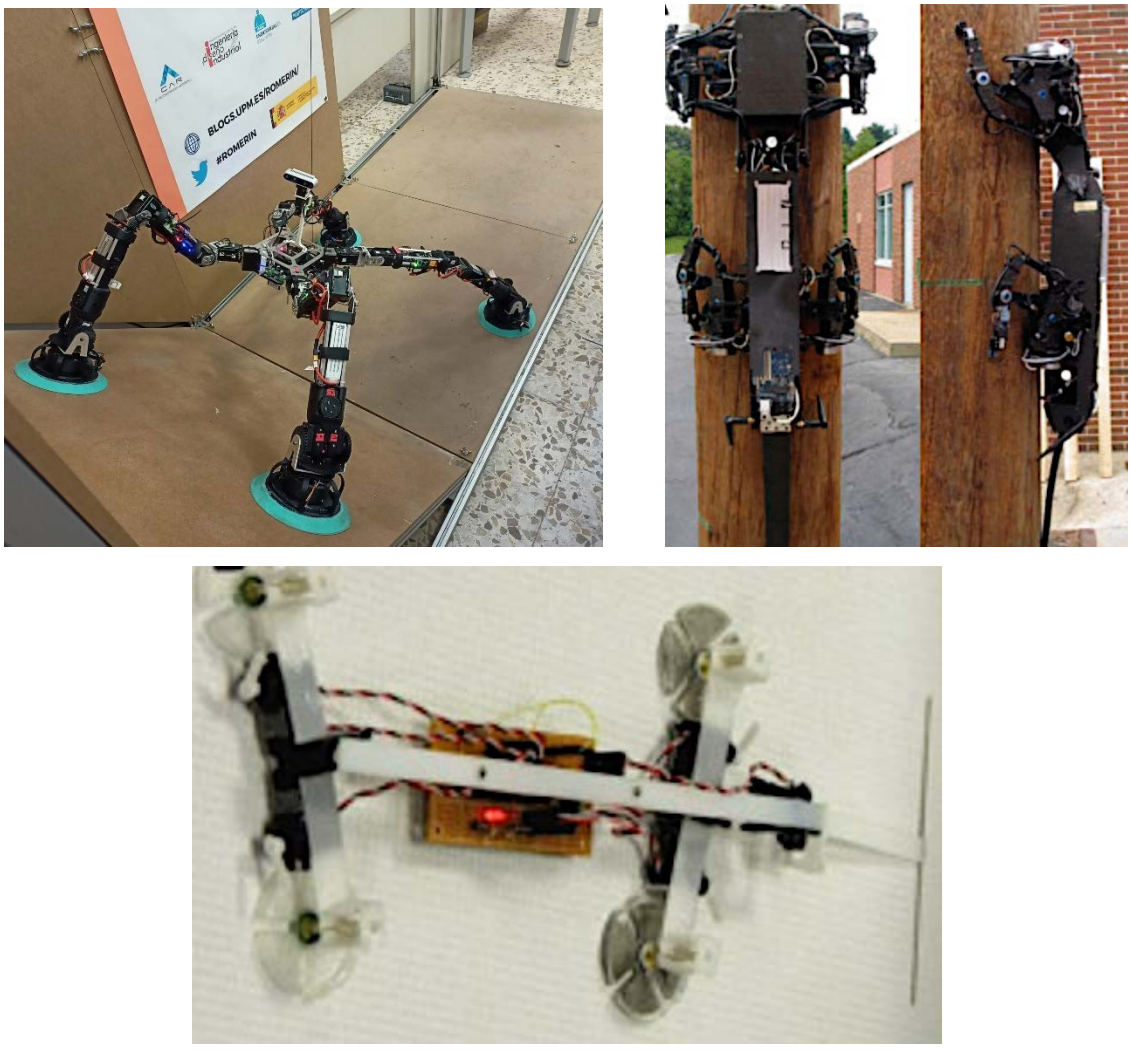


Рисунок 1.17 – Лазающие роботы, оснащенные вакуумными присосками

Работы [13, 14, 96, 102, 103] рассматривают перемещение с использованием механизмов на основе сил трения. Все они обеспечивают постоянное взаимодействие с опорной поверхностью. Основная функция представленных роботов — передвижение по балкам, вертикальным поверхностям стен, столбам и т.д. Среди мобильных роботов, способных выполнять аналогичные задачи, можно выделить канадский робот «LineRanger» [104], рисунок 1.18, способный исследовать высоковольтные линии электропередачи, по которым он передвигается с помощью роликов.

Рисунок 1.18 – Робот LineRanger

Недостатками этого мобильного робота являются необходимость привлечения людей с навыками работы на опорах линий электропередачи для его установки, а также для его перемещения требуются два провода, расположенные близко друг к другу. Другими примерами роботов, предназначенных для инспекции и очистки линий электропередачи, являются робот, созданный в Университете Джорджии, США [105] (рисунок 1.20, а), и канадский робот «LineScout» [106] (рисунок 1.20, б). Их движение вдоль линий электропередачи также осуществляется с использованием роликов.

а) б)

Рисунок 1.20 – Роботы для оценки высоковольтных линий электропередачи:
а) робот, созданный в Университете Джорджии, США;
б) робот «LineScout».

Шагающеподобные роботы также применяется в инспекция зданий и инфраструктуры. С их помощью осуществляется проверка состояния зданий, мостов, трубопроводов и т.д. Они позволяют быстро и безопасно выявлять повреждения или дефекты, которые могут быть недоступны для традиционных методов обследования. В исследовании [107] рассмотрены примеры использования лазающих роботов для мониторинга высотных зданий. Очистка окон небоскрёбов, солнечных панелей или фасадов зданий — ещё одна область применения таких роботов. Примером является робот Winbot, рисунок 1.21 который оснащён вакуумными присосками для удержания на стеклянных поверхностях.

Рисунок 1.21 - робот Winbot

В промышленности лазающие роботы применяются для инспекции резервуаров, трубопроводов и оборудования, работающего в экстремальных условиях. Например, магнитные роботы используются для проверки состояния резервуаров в нефтегазовой отрасли [108], а также могут быть задействованы в спасательных операциях, особенно в условиях, где человеку работать опасно или невозможно. Они способны доставлять оборудование или инструменты в труднодоступные места [109].

1.3 Выводы по 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 (капсульных роботов), роботов, использующих шагающеподобные типы движителей (лазающих роботов), 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.

Установлено, что алгоритмы управления целенаправленным движением капсульных мобильных роботов, как наиболее близких по конструктивным особенностям к мобильным роботам с опорными элементами и подвижным внутренним телом, без проскальзывания и учета сил сопротивления со стороны окружающей среды не изучались. Вместе с тем необходимость разработки как алгоритмов управления, так и в целом теории их движения достаточно важная задача, 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 инерции, приложенные к корпусу, создаются за счет стационарного движения внутренних масс.

Таким образом, разработка конструкций и методов управления движением мобильных роботов за счет стационарного перемещения внутренних масс и наложения или снятия голономных связей с помощью опорных элементов, взаимодействующих с поверхностью, является актуальной задачей.

ГЛАВА 2. Математическая модель и алгоритм управления опорными элементами мобильного робота с вращающимся внутренним телом.

Рассматривается мобильный робот, перемещающийся по плоской ровной поверхности за счет движения по окружности внутреннего тела (одного или нескольких, находящихся внутри корпуса) вокруг неподвижной перпендикулярной опорной поверхности оси с постоянной угловой скоростью и стоек, расположенных на корпусе робота, которые формируют голономную нестационарную конфигурацию связей путем согласованного взаимодействия каждой из стоек с плоской опорной поверхностью.

Рассматривается задача определения алгоритма управления опорными стойками для целенаправленного перемещения корпуса мобильного робота из начальной точки в конечную на основе разработанной математической модели.

2.1 Описание элементов конструкции и принципа перемещения мобильного робота с управляемыми опорными стойками и вращающимся с постоянной угловой скоростью вокруг неподвижной перпендикулярной опорной поверхности оси внутренним телом

Мобильный робот содержит корпус с внутренним телом и снабжен шариковыми опорами, расположенными на нижней поверхности корпуса и в общем случае N выдвижными стойками, с возможностью их поочередного контакта с опорной поверхностью, рисунок 2.1. Внутреннее тело имеет возможность совершать вращательное движение вокруг неподвижной относительно корпуса робота оси. В случае если робот установлен на горизонтальной поверхности, ось вращения – вертикальная.

Использование шариковых опор и стоек как средство наложения или снятия голономных связей позволяет роботу совершать вращательное движение вокруг соответствующей стойки.

Принцип движения мобильного робота основан на объединении метода дискретного взаимодействия стоек с опорной поверхностью и стационарным движением внутренней массы. С помощью стоек на движение корпуса робота накладываются или снимаются голономные связи, что позволяет ему совершать вращательное движение вокруг стойки, взаимодействующей с опорной поверхностью. Для того чтобы силы трения обеспечивали неподвижность опорных стоек, их следует располагать около центра масс корпуса робота и центробежная сила инерции, развиваемая внутренним телом при вращении, должна соответствовать условию (2.1).

$$mr\omega^2 < fN \tag{2.1}$$

где: m – масса внутреннего тела; r - длина стержня, на котором закреплено тело; ω – угловая скорость вращения внутреннего тела; f – коэффициент трения между выдвинутой стойкой и опорной поверхностью; N – сила реакции опоры.

Смена стоек происходит в момент нулевого значения угловой скорости корпуса мобильного робота для предотвращения ударных нагрузок, перевод стойки из свободного состояние в состояние силового взаимодействия с опорной плоскостью и наоборот позволяет осуществлять различные движения робота, рисунок 2.2.

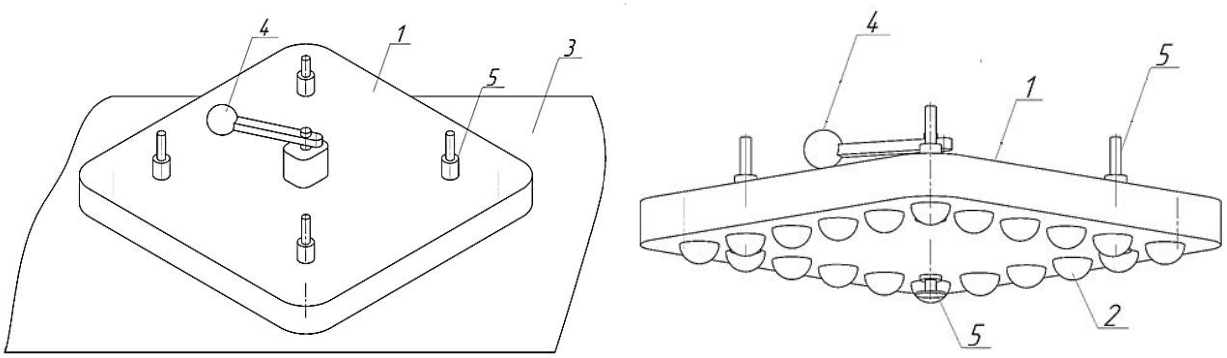


Рисунок 2.1 – Схема мобильного робота с вращающимся внутренним телом и опорными элементами, дискретно взаимодействующими с поверхностью

На рисунке 2.1 представлена схема мобильного робота, содержащего корпус 1, на нижней поверхности которого установлено *N* шариковых опор 2, благодаря которым корпус мобильного робота опирается на опорную поверхность 3. Внутренне тело 4, установленное на вертикальной оси корпуса 1 и совершающее вращательное движение вокруг вертикальной оси, проходящей через геометрический центр корпуса 1 робота. На корпусе 1 в определенных точках закреплены одинаковые выдвижные стойки 5, которые поочередно вступают в контакт с опорной поверхностью 3.

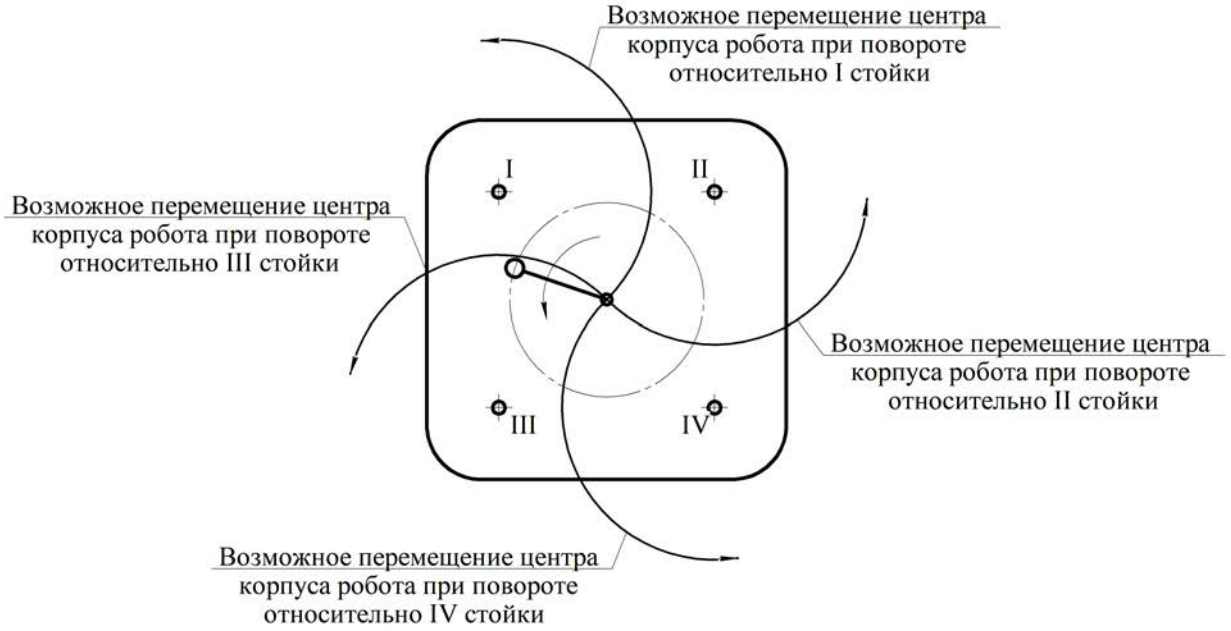


Рисунок 2.2 – Возможные перемещения центра масс корпуса мобильного робота при повороте относительно разных стоек

В начальный момент времени мобильный робот находится в состоянии покоя при отсутствии начальной скорости центра масс корпуса 1 робота. Робот опирается на поверхность 3 шариковыми опорами 2, которые не накладывают ограничения на его перемещение. В начале движения при выдвинутых, например, при помощи соленоида, опорных стойках 5 за счет чего фиксируется положение корпуса 1, расположенное внутри корпуса тело 4 раскручивается при помощи двигателя относительно корпуса 1 до номинальной скорости вращения, которая поддерживается постоянной все время движения.

Движение корпуса 1 мобильного робота начинается после поднятия всех кроме одной опорных стоек 5. При вращении расположенного внутри корпуса тела 4 при помощи двигателя и одной выдвинутой опорной стойки корпус робота 1 поворачивается относительно выдвинутой стойки 5, контактирующей с опорной поверхностью 3. Это происходит в результате действия на корпус центробежной силы инерции, которая постоянна по величине (т.к. угловая скорость вращения внутреннего тела постоянна, $\omega = const$), но изменяется по направлению. Поэтому момент центробежной силы инерции относительно зафиксированной опорной стойки, изменяется от нуля, когда вектор этой силы совпадает с направлением отрезка, соединяющего центр масс робота с осью опорной стойки, до своего экстремального значения, когда эти отрезки взаимно перпендикулярны. Причем, момент центробежной силы инерции достигает как своего максимума, так и минимума, что приводит к ускоренному и замедленному движению корпуса робота. Под действием сил инерции в процессе движения корпус 1 начинает вращаться в одну сторону, затем происходит его замедление и остановка, смена стоек 5 происходит в момент нулевого значения угловой скорости корпуса мобильного робота 1, то есть в момент его остановки за счет соответствующего действия силы инерции на корпус 1 робота, что обеспечивает отсутствие удара при смене находящейся в опоре одной из стоек 5. Посредством поочередно вступающих в контакт с опорной поверхностью стоек 5, алгоритм выдвижения которых может быть выбран и зависеть от необходимой программной траектории корпуса 1, на движение корпуса 1 мобильного робота накладываются или снимаются ограничения, что позволяет ему совершать целенаправленное в целом плоское движение, периодически проворачиваясь вокруг одной из поочередно взаимодействующих с опорной поверхностью стоек 5. Перевод стойки 5 из свободного состояния в состояние контактно-силового взаимодействия с опорной плоскостью (стойка 5 контактирует с опорной поверхностью) и наоборот (стойка 5 не взаимодействует с опорной поверхностью) позволяет повысить маневренность движения мобильного робота на плоской

поверхности, кроме того отсутствует необходимость разгона или торможения вращающего внутреннего тела 4, что позволяет снизить энергозатраты на движение мобильного робота и упростить систему управления.

2.2 Расчетная схема мобильного робота с опорными элементами и вращающимся внутренним телом

Рассматривается мобильный робот (рисунок 2.3), 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 движения внутреннее тело (одно или несколько) совершает вращательное движение вокруг вертикальной оси, а стойки поочередно вступают в контакт с поверхностью, вследствие чего, на движение корпуса робота накладываются или снимаются голономные связи, что приводит к изменению конфигурации.

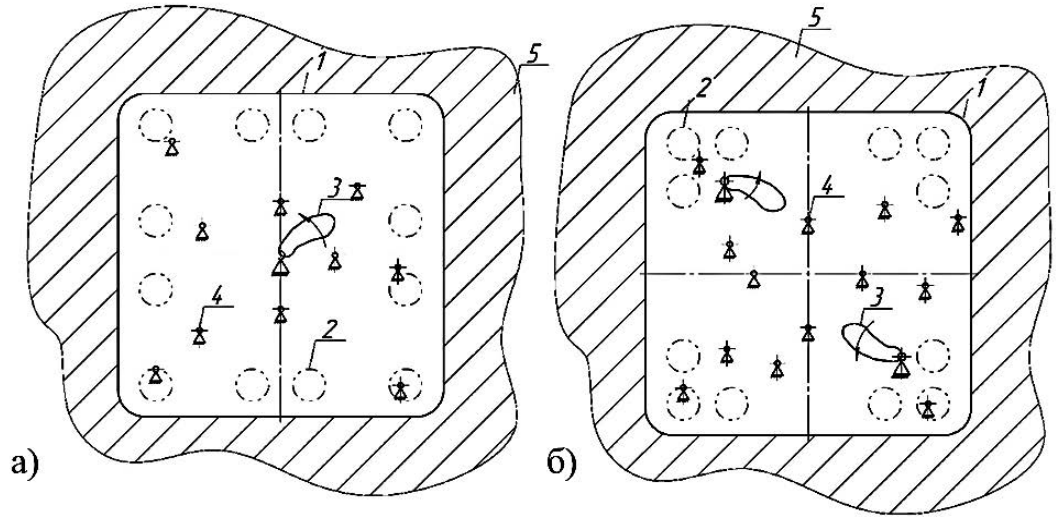


Рисунок 2.3 – Кинематическая схема: а) мобильного робота с одним внутренним телом; б) мобильного робота с двумя внутренними телами.

2.2.1 Математическая модель движения мобильного робота по горизонтально расположенной плоской поверхности с вращающимся внутренним телом и опорными стойками, периодически взаимодействующими с опорной поверхностью

Рассматривается движение робота в одной из фаз. Расчетная схема представлена на рисунке 2.4.

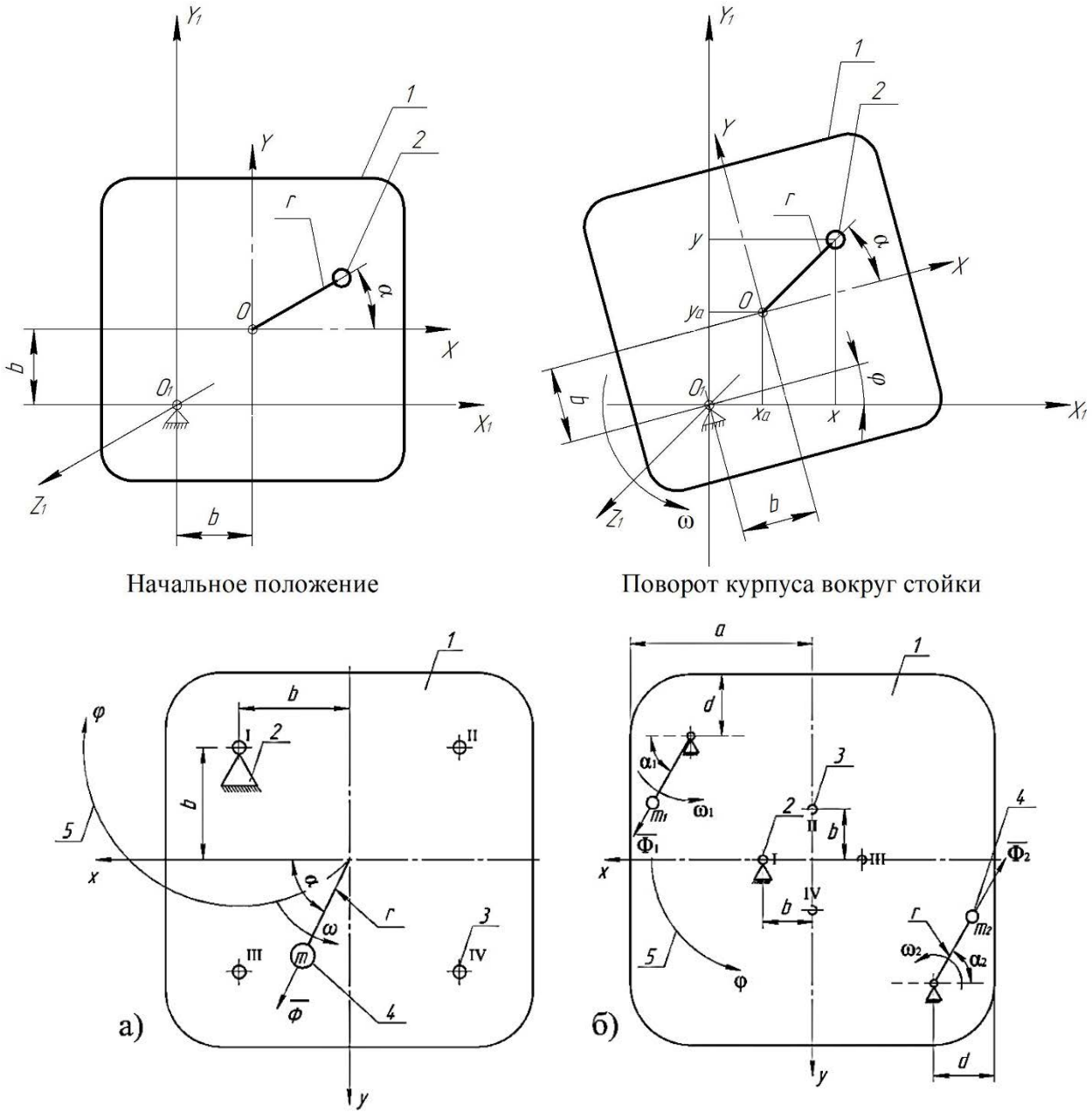


Рисунок 2.4 – Расчетная схема мобильного робота с вращающимся внутренним телом при движении по горизонтальной плоскости: а) с одним внутренним телом; б) с двумя внутренними телами.

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, α_1, α_2 – углы поворота тела внутри корпуса относительно горизонтальной оси X; Ф, Φ_1, Φ_2 – силы инерции; m, m_1, m_2 – массы грузов; r – длина стержня, на котором закреплен груз; ω, ω_1, ω_2 – угловые скорости стержней с закрепленными на них грузами.

Уравнение динамики движения мобильного робота с одним вращающимся внутренним телом и опорными стойками, рисунок 2.4, а, удобно получить с помощью уравнения Лагранжа:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right)-\frac{\partial T}{\partial q_i}=Q_i\left(i=1,2,\ldots s\right), \tag{2.2}$$

где: q_i, $\dot{q}_i$ – обобщенные координаты и обобщенные скорости точек системы, T – кинетическая энергия системы, Q_i – обобщенная сила системы, соответствующая выбранной обобщенной координате, s – число степеней свободы системы.

Механическая система, представленная на рисунке 2.4, а, состоит из двух тел: корпуса мобильного робота – 1, совершающего вращательное движение вокруг одной из опорных стоек, и внутреннего тела 2, совершающего сложное движение.

Система имеет две степени свободы. В качестве обобщенных координат выбирается угол поворота корпуса робота φ относительно горизонтальной оси X_1 и угол поворота тела внутри корпуса α относительно горизонтальной оси X. Тогда уравнение Лагранжа для обобщенных координат имеет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}}\right) - \dfrac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_{\varphi}, \\ \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}}\right) - \dfrac{\partial T}{\partial \alpha} = Q_{\alpha}. \end{cases} \tag{2.3}$$

Кинетическая энергия системы определяется суммой двух слагаемых:

$$T = T_1 + T_2, \tag{2.4}$$

где: $T_1 = \frac{1}{2} J_{1z} \dot{\varphi}^2$ – кинетическая энергия корпуса мобильного робота, J_{1z} – осевой момент инерции корпуса робота, относительно вертикально оси, проходящей через его центр масс, $\dot{\varphi}$ – угловая скорость корпуса робота; $T_2 = \frac{1}{2} m_2 v^2$ – кинетическая энергия вращающегося внутреннего тела, m_2 – масса внутреннего тела, v_2 – скорость внутреннего тела.

Координата тела 2 в проекции на оси O_1X_1, O_1Y_1:

$$\begin{cases} x = x_a + r \cdot \cos\left(\varphi + \alpha\right), \\ y = y_a + r \cdot \sin\left(\varphi + \alpha\right), \end{cases} \tag{2.5}$$

$x_a = b \cdot \cos(\varphi) - b \cdot \sin(\varphi)$ – координата центра корпуса мобильного робота 1 в проекции на ось O_1X_1, $y_a = b \cdot \cos(\varphi) + b \cdot \sin(\varphi)$ – координата центра корпуса мобильного робота 1 в проекции на ось O_1Y_1.

Из системы (2.5) определим проекции скорости внутреннего тела v_2 на оси O_1X_1, O_1Y_1:

$$\begin{cases} \dot{x} = -b\dot{\varphi} \cdot \sin\left(\varphi\right) - b\dot{\varphi} \cdot \cos\left(\varphi\right) - \left(\dot{\varphi} + \dot{\alpha}\right) r \cdot \sin\left(\varphi + \alpha\right), \\ \dot{y} = -b\dot{\varphi} \cdot \sin\left(\varphi\right) + b\dot{\varphi} \cdot \cos\left(\varphi\right) + \left(\dot{\varphi} + \dot{\alpha}\right) r \cdot \cos\left(\varphi + \alpha\right). \end{cases} \tag{2.6}$$

Тогда скорость внутреннего тела v_2:

$$v^2 = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = \sqrt{\begin{matrix} 2b^2\dot{\varphi}^2 + r^2\dot{\varphi}^2 + r^2\dot{\alpha}^2 + 2r^2\dot{\varphi}\dot{\alpha} + 2br\dot{\varphi}^2 \cdot \cos(\alpha) + \\ +2br\dot{\varphi}^2 \cdot \sin(\alpha) + 2br\dot{\varphi}\dot{\alpha} \cdot \cos(\alpha) + 2br\dot{\varphi}\dot{\alpha} \cdot \sin(\alpha) \end{matrix}} \quad (2.7)$$

Подставляя (2.7) в (2.4), получаем:

$$\begin{matrix} T = \frac{1}{2} J_{1z}\dot{\varphi} + \frac{1}{2} m_2 \left(2b^2\dot{\varphi}^2 + r^2\dot{\varphi}^2 + r^2\dot{\alpha}^2 + 2r^2\dot{\varphi}\dot{\alpha} + 2br\dot{\varphi}^2 \cdot \cos(\alpha)\right) + \\ + \frac{1}{2} m_2 \left(2br\dot{\varphi}^2 \cdot \sin(\alpha) + 2br\dot{\varphi}\dot{\alpha} \cdot \cos(\alpha) + 2br\dot{\varphi}\dot{\alpha} \cdot \sin(\alpha)\right) \end{matrix} \quad (2.8)$$

Активные силы, совершающие работу при движении системы по горизонтальной поверхности, отсутствуют, соответственно $Q_\varphi = 0$, $Q_\alpha = 0$.

Поэтому:

$$\begin{matrix} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = J_{1z}\dot{\varphi} + \frac{m_2}{2}\left(4b^2\dot{\varphi} + 2r^2\dot{\varphi} + 2r^2\dot{\alpha} + 4br\dot{\varphi} \cdot \cos(\alpha)\right) + \\ + \frac{m_2}{2}\left(4br\dot{\varphi} \cdot \sin(\alpha) + 2br\dot{\alpha} \cdot \cos(\alpha) + 2br\dot{\alpha} \cdot \sin(\alpha)\right) \end{matrix} \quad (2.9)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}}\right) = J_{1z}\ddot{\varphi} + \frac{m_2}{2}\left(4b^2\ddot{\varphi} + 2r^2\ddot{\varphi} + 2r^2\ddot{\alpha} + 4br\ddot{\varphi} \cdot \cos(\alpha)\right) +$$

$$+ \frac{m_2}{2}\left(-4br\dot{\varphi}\dot{\alpha} \cdot \sin(\alpha) + 4br\ddot{\varphi} \cdot \sin(\alpha) + 4br\dot{\varphi}\dot{\alpha} \cdot \cos(\alpha) + 2br\ddot{\alpha} \cdot \cos(\alpha)\right) + \quad (2.10)$$

$$+ \frac{m_2}{2}\left(-2br\dot{\alpha}^2 \cdot \sin(\alpha) + 2br\ddot{\alpha} \cdot \sin(\alpha) + 2br\dot{\alpha}^2 \cdot \cos(\alpha)\right)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} = \frac{m_2}{2}\left(2r^2\dot{\alpha} + 2r^2\dot{\varphi} + 2br\dot{\varphi} \cdot \cos(\alpha) + 2br\dot{\varphi} \cdot \sin(\alpha)\right) \quad (2.12)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}}\right)=\frac{m_2}{2}\left(2r^2\ddot{\alpha}+2r^2\ddot{\varphi}+2br\ddot{\varphi}\cdot\cos(\alpha)-2br\dot{\varphi}\dot{\alpha}\cdot\sin(\alpha)\right)+$$
$$+\frac{m_2}{2}\left(2br\ddot{\varphi}\cdot\sin(\alpha)+2br\dot{\varphi}\dot{\alpha}\cdot\cos(\alpha)\right) \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \alpha}=\frac{m_2}{2}\left(-2br\dot{\varphi}^2\cdot\sin(\alpha)+2br\dot{\varphi}^2\cdot\cos(\alpha)\right)+$$
$$+\frac{m_2}{2}\left(-2br\dot{\varphi}\dot{\alpha}\cdot\sin(\alpha)+2br\dot{\varphi}\dot{\alpha}\cdot\cos(\alpha)\right) \quad (2.14)$$

С учетом (2.9–2.14) система (2.3) имеет вид:

$$\begin{cases} J_{1z}\ddot{\varphi}+\frac{m_2}{2}\left(4b^2\ddot{\varphi}+2r^2\ddot{\varphi}+2r^2\ddot{\alpha}+4br\ddot{\varphi}\cdot\cos(\alpha)\right)+ \\ +\frac{m_2}{2}\left(-4br\dot{\varphi}\dot{\alpha}\cdot\sin(\alpha)+4br\ddot{\varphi}\cdot\sin(\alpha)+4br\dot{\varphi}\dot{\alpha}\cdot\cos(\alpha)\right)+ \\ +\frac{m_2}{2}\left(2br\ddot{\alpha}\cdot\cos(\alpha)-2br\dot{\alpha}^2\cdot\sin(\alpha)+2br\ddot{\alpha}\cdot\sin(\alpha)+2br\dot{\alpha}^2\cdot\cos(\alpha)\right)=0; \\ \frac{m_2}{2}\left(2r^2\ddot{\alpha}+2r^2\ddot{\varphi}+2br\ddot{\varphi}\cdot\cos(\alpha)-2br\dot{\varphi}\dot{\alpha}\cdot\sin(\alpha)+2br\ddot{\varphi}\cdot\sin(\alpha)\right)+ \\ +\frac{m_2}{2}\left(2br\dot{\varphi}\dot{\alpha}\cdot\cos(\alpha)\right)-\frac{m_2}{2}\left(-2br\dot{\varphi}^2\cdot\sin(\alpha)+2br\dot{\varphi}^2\cdot\cos(\alpha)\right)- \\ -\frac{m_2}{2}\left(-2br\dot{\varphi}\dot{\alpha}\cdot\sin(\alpha)+2br\dot{\varphi}\dot{\alpha}\cdot\cos(\alpha)\right)=0 \end{cases} \quad (2.15)$$

Учитываем, что рассматривается установившийся режим движения внутреннего тела: $\dot{\alpha}$ = const; $\ddot{\alpha}$ = 0; и из-за малых ускорений корпуса робота пренебрегаем действием сил инерции.

Тогда, система (2.15) допускает упрощения:

$$\ddot{\varphi}\left(J_{1z}+m_2\left(2b^2+r^2+2br\cdot\left(\cos(\alpha)+\sin(\alpha)\right)\right)\right)=m_2\left(\dot{\alpha}^2br\cdot\left(\cos(\alpha)-\sin(\alpha)\right)\right) \quad (2.16)$$

2.2.2 Движение мобильного робота с вращающимся внутренним телом и опорными элементами по плоскости, расположенной под углом

Рассматривается вариант движения мобильного робота с вращающимся внутренним телом по поверхности, расположенной под углом β к горизонту. В этом случае расчетная схема, рисунок 2.4, видоизменяется (рисунок 2.5).

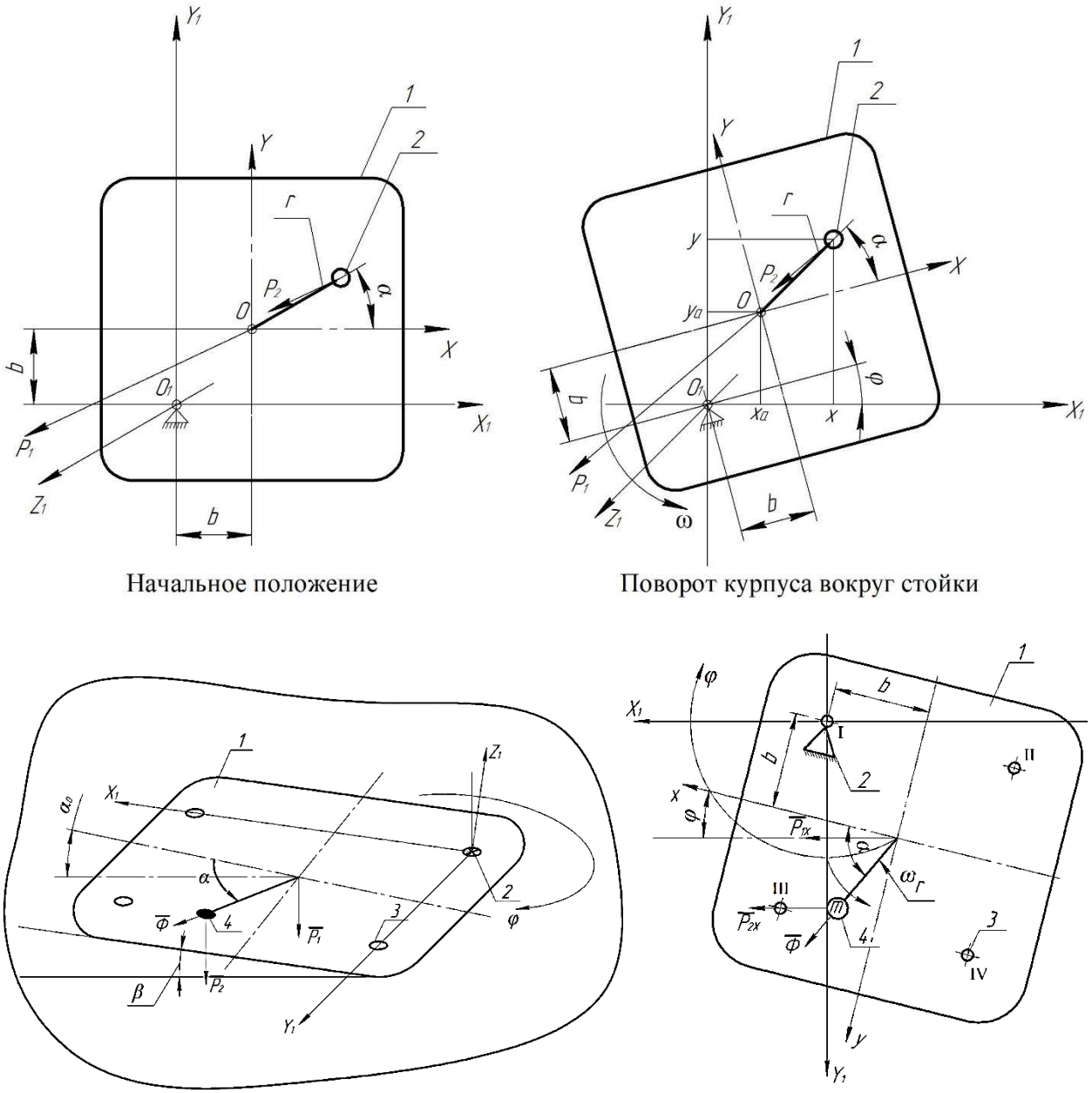


Рисунок 2.5 – Расчетная схема мобильного робота с вращающимся внутренним телом при движении по плоскости, расположенной под углом

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, β – угол наклона поверхности по которой движется мобильный робот; P_1, P_2 – вес платформы и груза соответственно.

Аналогично уравнениям (2.2–2.14) определим полную кинетическую энергию системы и обобщенные силы Q_φ, Q_α, соответствующие обобщенным координатам.

$$\begin{aligned} T = \frac{1}{2} J_{1z} \dot{\varphi} + \frac{1}{2} m_2 \left(2b^2 \dot{\varphi}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2 + r^2 \dot{\alpha}^2 + 2r^2 \dot{\varphi}\dot{\alpha} + 2br\dot{\varphi}^2 \cdot \cos(\alpha) \right) + \\ + \frac{1}{2} m_2 \left(2br\dot{\varphi}^2 \cdot \sin(\alpha) + 2br\dot{\varphi}\dot{\alpha} \cdot \cos(\alpha) + 2br\dot{\varphi}\dot{\alpha} \cdot \sin(\alpha) \right) \end{aligned} \tag{2.17}$$

Обобщенные силы Q_φ, Q_α, соответствующие обобщенным координатам, определяются выражениями:

$$\begin{aligned} Q_\varphi &= P_1 \cdot \sin(\beta) \cdot b \cdot \cos(\varphi) + P_1 \cdot \sin(\beta) \cdot b \cdot \sin(\varphi); \\ Q_\alpha &= P_2 \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \left(b + r \cdot \sin(\alpha) \right) + \\ &+ P_2 \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \left(b - r \cdot \cos(\alpha) \right) \end{aligned} \tag{2.18}$$

С учетом (2.17, 2.18) система (2.19) имеет вид:

$$
\begin{cases}
J_{1z}\ddot{\varphi}+\dfrac{m_2}{2}\left(4b^2\ddot{\varphi}+2r^2\ddot{\varphi}+2r^2\ddot{\alpha}+4br\ddot{\varphi}\cdot\cos(\alpha)\right)+ \\
+\dfrac{m_2}{2}\left(-4br\dot{\varphi}\dot{\alpha}\cdot\sin(\alpha)+4br\ddot{\varphi}\cdot\sin(\alpha)\right)+ \\
+\dfrac{m_2}{2}\left(4br\dot{\varphi}\dot{\alpha}\cdot\cos(\alpha)+2br\ddot{\alpha}\cdot\cos(\alpha)-2br\dot{\alpha}^2\cdot\sin(\alpha)\right)+ \\
+\dfrac{m_2}{2}\left(2br\ddot{\alpha}\cdot\sin(\alpha)+2br\dot{\alpha}^2\cdot\cos(\alpha)\right)= \\
=P_1\cdot\sin(\beta)\cdot b\cdot\cos(\varphi)+P_1\cdot\sin(\beta)\cdot b\cdot\sin(\varphi); \\
\\
\dfrac{m_2}{2}\left(2r^2\ddot{\alpha}+2r^2\ddot{\varphi}+2br\ddot{\varphi}\cdot\cos(\alpha)\right)+ \\
+\dfrac{m_2}{2}\left(-2br\dot{\varphi}\dot{\alpha}\cdot\sin(\alpha)+2br\ddot{\varphi}\cdot\sin(\alpha)\right)+\dfrac{m_2}{2}\left(2br\dot{\varphi}\dot{\alpha}\cdot\cos(\alpha)\right)- \\
-\dfrac{m_2}{2}\left(-2br\dot{\varphi}^2\cdot\sin(\alpha)+2br\dot{\varphi}^2\cdot\cos(\alpha)\right)- \\
-\dfrac{m_2}{2}\left(-2br\dot{\varphi}\dot{\alpha}\cdot\sin(\alpha)+2br\dot{\varphi}\dot{\alpha}\cdot\cos(\alpha)\right)= \\
=P_2\cdot\sin(\beta)\cdot\cos(\varphi)\cdot\left(b+r\cdot\sin(\alpha)\right)+P_2\cdot\sin(\beta)\cdot\cos(\varphi)\cdot\left(b-r\cdot\cos(\alpha)\right)
\end{cases}
\tag{2.19}
$$

Так как рассматривается установившийся режим движения внутреннего тела: $\dot{\alpha}$ = const; $\ddot{\alpha}$ = 0; и из-за малых ускорений корпуса робота пренебрегаем действием сил инерции, тогда, решая систему (2.19) получаем:

$$
\begin{gathered}
\ddot{\varphi}\left[J_{1z}+m_2\left(2b^2+r^2+2br\left(\cos(\alpha)+\sin(\alpha)\right)\right)\right]= \\
=-m_2\left(\dot{\alpha}^2br\left(\cos(\alpha)-\sin(\alpha)\right)\right)+ \\
+P_1\cdot\sin(\beta)\cdot b\cdot\cos(\varphi)+P_1\cdot\sin(\beta)\cdot b\cdot\sin(\varphi)+ \\
P_2\cdot\sin(\beta)\cdot\cos(\varphi)\cdot\left(b+r\cdot\sin(\alpha)\right)+P_2\cdot\sin(\beta)\cdot\cos(\varphi)\cdot\left(b-r\cdot\cos(\alpha)\right)
\end{gathered}
\tag{2.20}
$$

2.3 Исследование модельной задачи движения мобильного робота с вращающимся внутренним телом и опорными стойками.

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 на прекращает своего движения.

Корпус робота в начале движения считается неподвижным, что соответствует начальным условиям $\varphi_0 = 0$ рад; $\dot{\varphi}_0 = 0$ рад/с.

Для предотвращения удара смена стоек происходит в момент нулевого значения угловой скорости корпуса мобильного робота.

2.3.1 Движение мобильного робота с одним вращающимся внутренним телом и опорными стойками по горизонтально расположенной поверхности

Проведено исследование модельной задачи движения мобильного робота с одной вращающейся с постоянной угловой скоростью внутренней массой (рисунок 2.4, а) как механической системы 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·м^2 (момент инерции корпуса робота); $m = 2$ кг. Длина и ширина корпуса мобильного робота $l = 0{,}5$ м.

На рисунках 2.6, 2.7 представлены зависимости изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ и его угловой скорости $\dot{\varphi}$ от времени. На графиках отображено, что смена опорных стоек происходит в момент остановки корпуса робота, а также какая из опор находится в контакте с поверхностью.

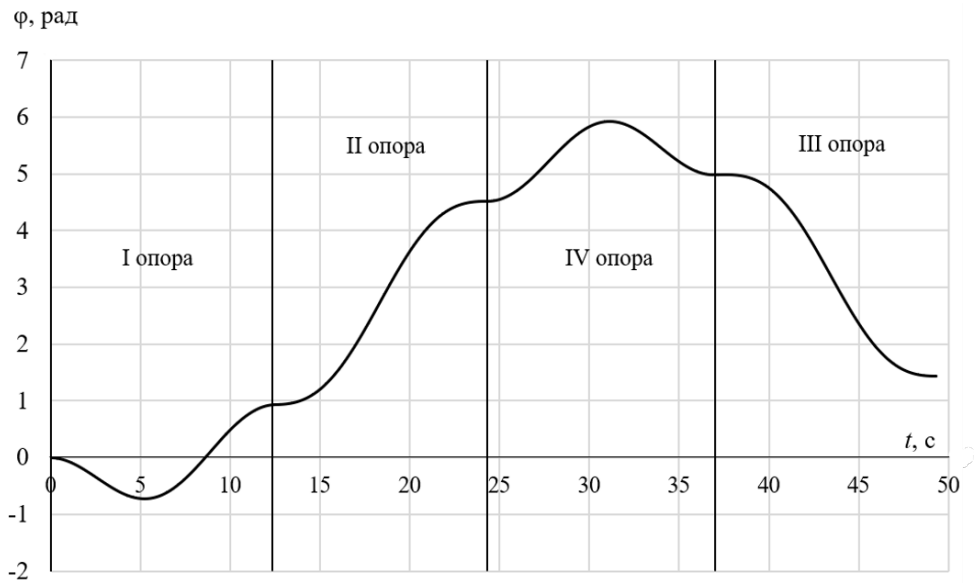


Рисунок 2.6 – Зависимость изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ от времени *t*

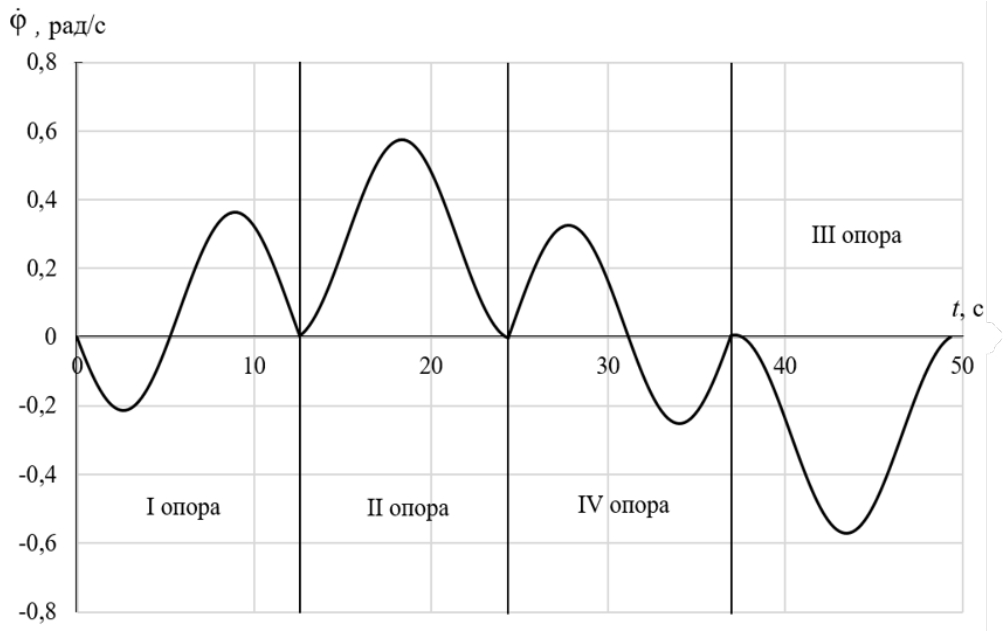


Рисунок 2.7 – Зависимость изменения угловой скорости корпуса мобильного робота φ̇ от времени *t*

В таблице 2.1 указан алгоритм управления опорными стойками, соответствующий траектории движения геометрического центра корпуса робота, представленной на рисунке 2.8, и изменениям угла поворота и угловой скорости корпуса, представленным на рисунках 2.6, 2.7, а также значения угла поворота корпуса φ, рад.

Таблица 2.1 – Алгоритм управления стойками мобильного робота при движении по горизонтальной поверхности

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

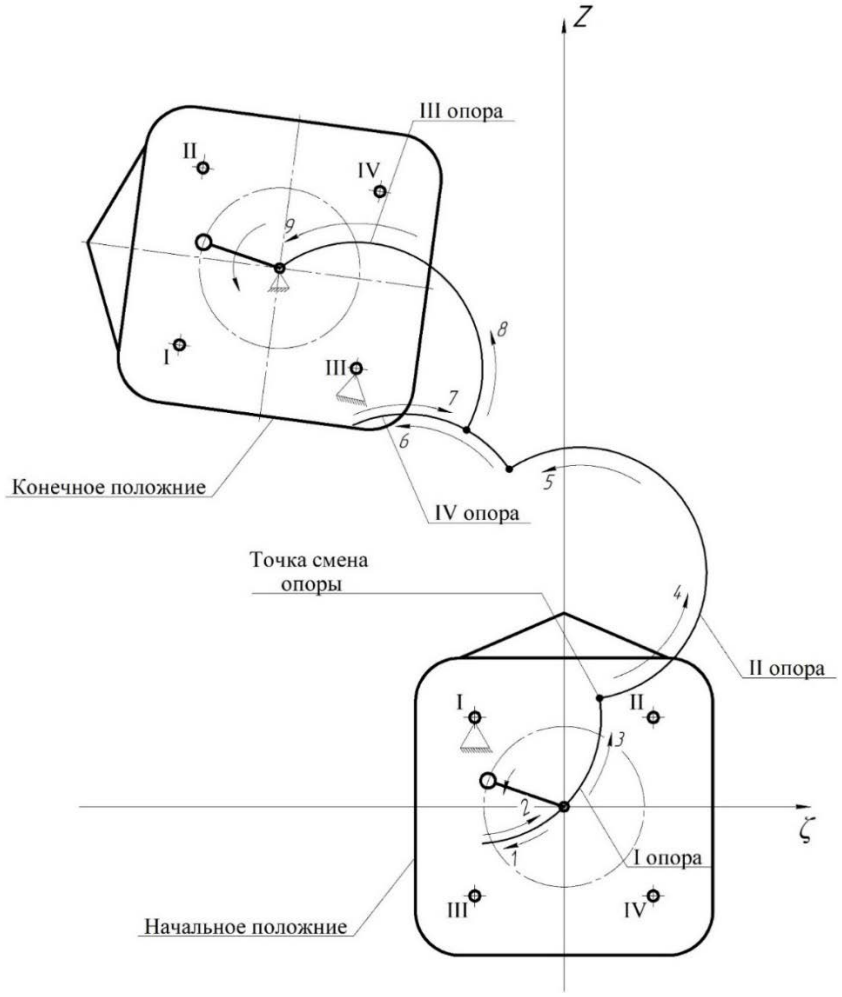


Рисунок 2.8 – Изменение положения центра корпуса мобильного робота с одним вращающимся внутренним телом при движении по горизонтальной поверхности

На рисунке 2.8 представлена траектория изменения положения центра корпуса мобильного робота. Подробнее рассматривается участок

движения 1–5. В начальный момент времени корпус начинает вращение по часовой стрелке 1 вокруг опорной стойки I, находящейся в состоянии контактно-силового взаимодействия с опорной поверхностью, через определенное время происходит его торможение (рисунок 2.7), после чего корпус начинает движение против часов стрелки 2–3 все также вокруг неподвижной стойки I. В момент времени t = 12,53 с угловая скорость корпуса робота $\dot{\varphi} = 0$ и происходит смена опоры (с I на II), вокруг которой корпус робота совершает вращательное движение. На отрезке 4–5 видно, что направление вращения не изменилось. Дальнейшее перемещение мобильного робота происходит аналогичным образом.

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 2.9, 2.10). Длина и ширина корпуса мобильного робота l = 0,5 м. Вводится безразмерный коэффициент $k = \frac{J_a}{mrb}$. В начальный момент времени $\alpha_0 = 0$ рад; $\omega = 1$ рад/с. Рассматривается один цикл поворота корпуса робота вокруг I опорной стойки.

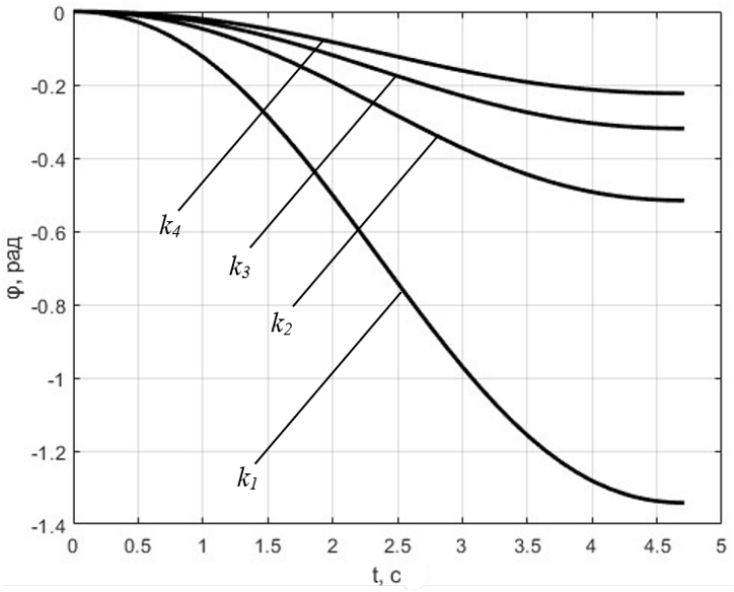


Рисунок 2.9 – Изменение угла поворота корпуса робота φ при различных значениях коэффициента k (k_1 = 5, k_2 = 13, k_3 = 21, k_4 = 30) на одном цикле взаимодействия опоры с поверхностью

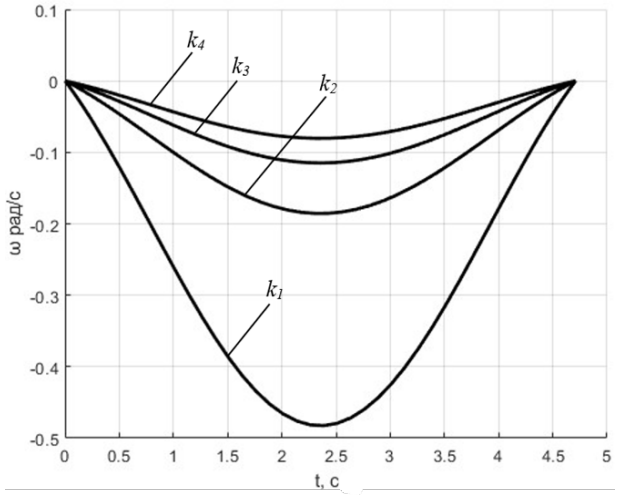


Рисунок 2.10 – Изменение угловой скорости корпуса робота ω при различных значениях коэффициента k (k_1 = 5, k_2 = 13, k_3 = 21, k_4 = 30) на одном цикле взаимодействия опоры с поверхностью

Из рисунков 2.8, 2.9 определяется, что с увеличением момента инерции внутреннего тела $M_{\Phi} = mr\omega^2 \cdot b$, происходит увеличение угла поворота и угловой скорости корпуса мобильного робота.

На рисунках 2.11, 2.12. представлены изменения угла поворота и угловой скорости корпуса мобильного робота при некоторых значениях α_0. Механическая система имеет параметры: l = 0,5 м, k = 13, ω = 1 рад/с. Рассматривается один цикл поворота корпуса робота вокруг I опорной стойки.

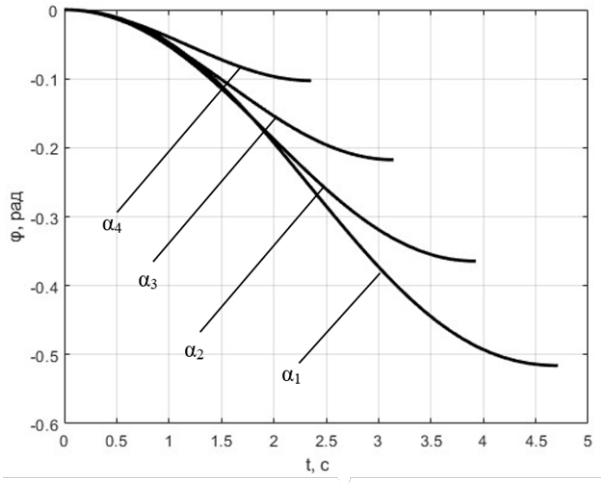


Рисунок 2.11 – Изменение угла поворота корпуса робота φ при различных значениях α_0 (α_1 = 0 рад, α_2 = 0,4 рад, α_3 = 0,785 рад, α_4 = 1,178 рад) на одном цикле взаимодействия опоры с поверхностью

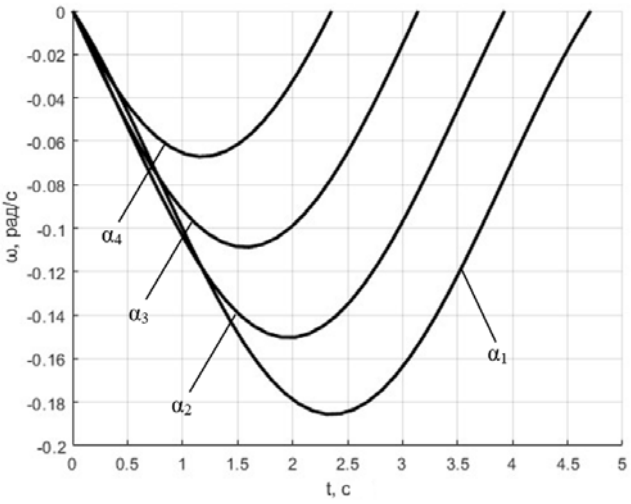


Рисунок 2.12 – Изменение угловой скорости корпуса робота ω при различных значениях α_0 ($\alpha_1 = 0$ рад, $\alpha_2 = 0{,}4$ рад, $\alpha_3 = 0{,}785$ рад, $\alpha_4 = 1{,}178$ рад) на одном цикле взаимодействия опоры с поверхностью

Из графиков (рисунок 2.11, 2.12) видно, что угол поворота и угловая скорость корпуса мобильного робота зависят положения внутреннего тела α_0.

Исследовано движение робота с вращающимся внутренним телом и опорными стойками как механической системы с параметрами: $\alpha_0 = 1{,}0472$ рад; $\omega = 0{,}5$ рад/с; $b = 0{,}4$ м; $r = 0{,}35$ м; $J_a = 0{,}9054$ кг·м^2; $m = 2$ кг; $l = 0{,}5$ м.

В таблице 2.2 представлены алгоритмы смены опорных стоек, реализующие различные траектории движения геометрического центра корпуса мобильного робота, которые представлены на рисунке 2.12.

Таблица 2.2 – Алгоритмы смены опорных стоек

	1 участок движения	2 участок движения	3 участок движения	4 участок движения
1 последовательность смены опор	I опора в фазе взаимодействия с поверхностью	III опора в фазе взаимодействия с поверхностью	IV опора в фазе взаимодействия с поверхностью	II опора в фазе взаимодействия с поверхностью
2 последовательность смены опор	II опора в фазе взаимодействия с поверхностью	IV опора в фазе взаимодействия с поверхностью	I опора в фазе взаимодействия с поверхностью	III опора в фазе взаимодействия с поверхностью
3 последовательность смены опор	III опора в фазе взаимодействия с поверхностью	I опора в фазе взаимодействия с поверхностью	II опора в фазе взаимодействия с поверхностью	IV опора в фазе взаимодействия с поверхностью
4 последовательность смены опор	IV опора в фазе взаимодействия с поверхностью	II опора в фазе взаимодействия с поверхностью	III опора в фазе взаимодействия с поверхностью	I опора в фазе взаимодействия с поверхностью

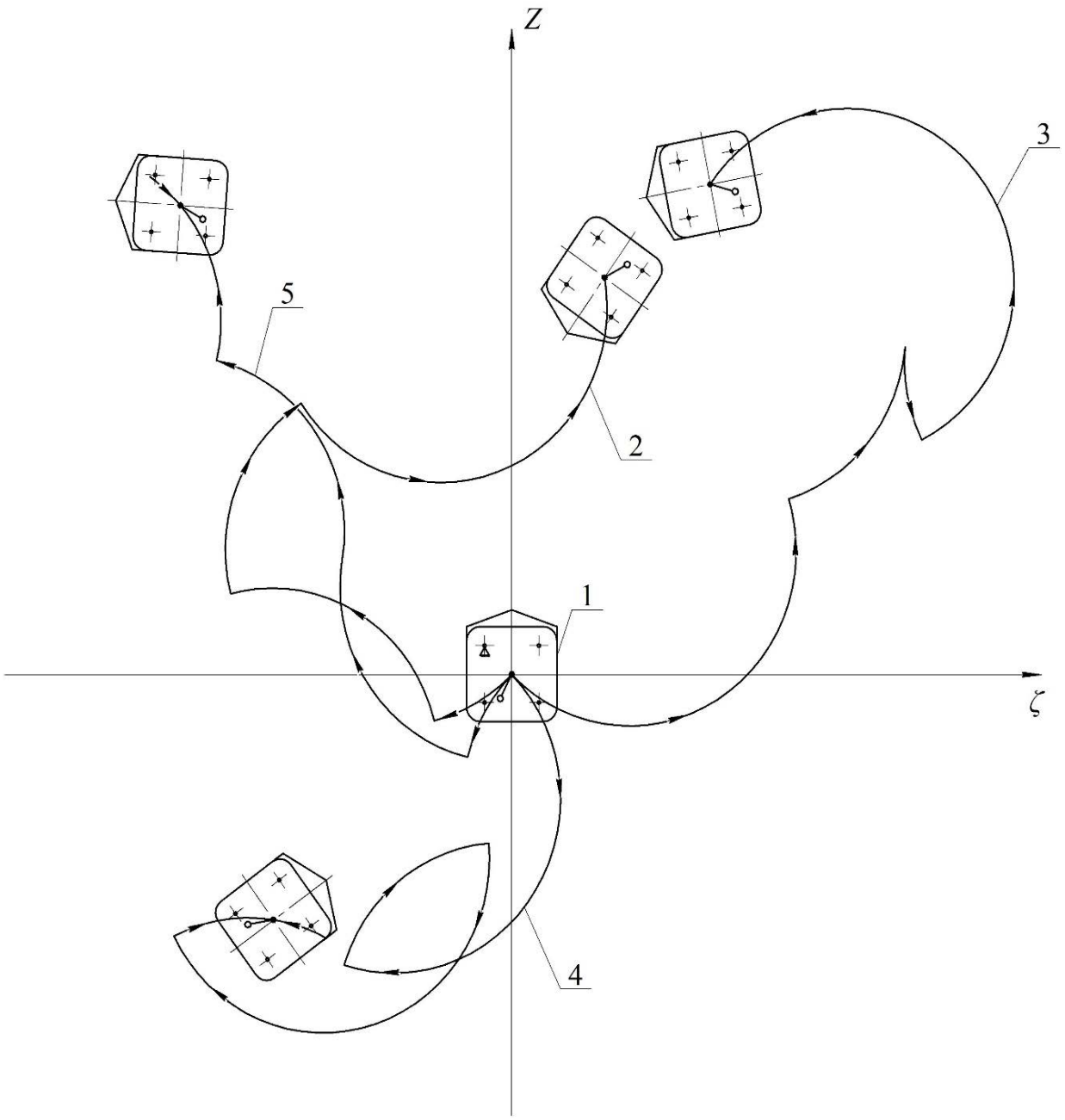


Рисунок 2.13 – Изменение положения центра корпуса мобильного робота в процессе движения при различных алгоритмах смены опорных стоек:
1 – начальное положение; 2 – траектория движения центра корпуса робота при первой последовательности смены опорных стоек; 3 – траектория движения центра корпуса робота при второй последовательности смены опорных стоек; 4 –траектория движения центра корпуса робота при третьей последовательности смены опорных стоек; 5 – траектория движения центра корпуса робота при четвертой последовательности смены опорных стоек

Из рисунков 2.8, 2.13 определяется, что представленный мобильный робот с одним вращающимся внутренним телом и опорными стойками способен перемещаться в любом направление. Траектория движения геометрического центра корпуса робота во многом зависит от алгоритма управления сменой опорных стоек. Важнейшим этапом исследования является получение базовых траекторий перемещения геометрического центра корпуса мобильного робота, таких как движение в прямом направлении, боковое движение, движение по дуге окружности, движение по диагонали и разворот корпуса робота, для подтверждения близкой к «идеальной» маневренности рассматриваемого мобильного робота.

2.3.2 Движение мобильного робота с одним вращающимся внутренним телом и опорными стойками по горизонтально расположенной поверхности по определенным заданным траекториям

Исследование модельной задачи движения мобильного робота с одной вращающейся с постоянной угловой скоростью внутренней массой (рисунок 2.4, а) как механической системы с параметрами $\alpha_0 = 1{,}0472$ рад; $\omega = 0{,}5$ рад/с; $b = 0{,}05$ м; $r = 0{,}2$ м; $J_a = 0{,}1365$ кг·м^2; $m = 1$ кг; $l = 0{,}5$ м. Рассматриваются пять базовых траекторий движения геометрического центра корпуса мобильного робота: движение в прямом направлении, боковое движение, движение по дуге окружности, движение по диагонали и разворот корпуса робота.

Алгоритм управления опорными стойками для движения геометрического центра корпуса мобильного робота в прямом направлении, выглядит следующим образом:

I опора → Все опоры → II опора → Все опоры → I опора → Все опоры → II опора → Все опоры → I опора → Все опоры → II опора → Все опоры → I опора → Все опоры → II опора. Указываются опоры, поочередно находящиеся в состоянии контактно-силового взаимодействия с поверхностью.

Общее время движения мобильного робота составляет 97,25 с.

На рисунках 2.14, 2.15 представлены зависимости изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ и его угловой скорости $\dot{\varphi}$ от времени.

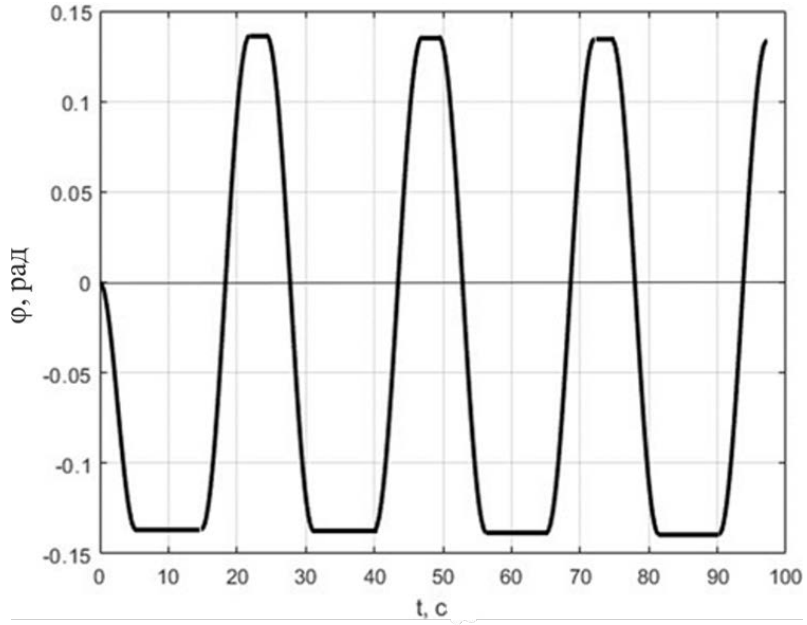


Рисунок 2.14 – Зависимость изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ от времени *t*

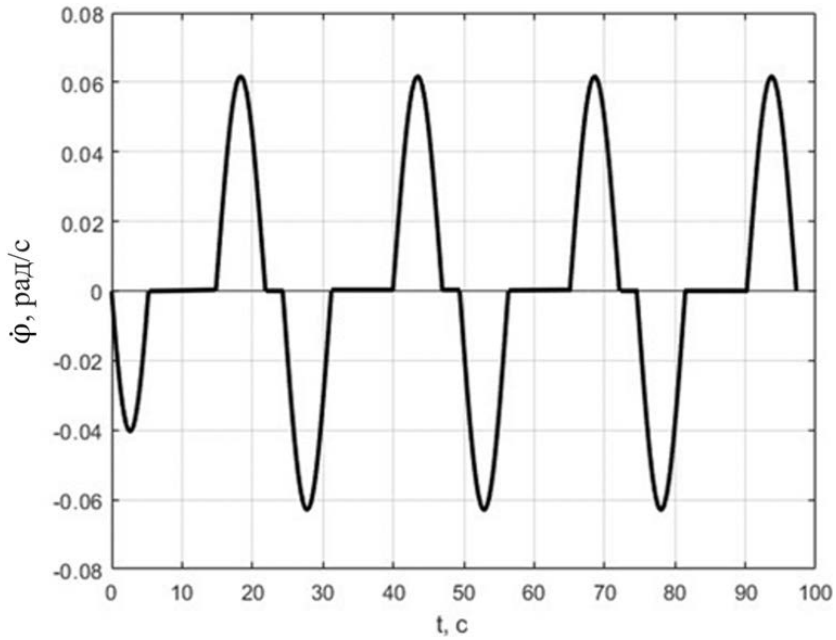


Рисунок 2.15 – Зависимость изменения угловой скорости корпуса мобильного робота $\dot{\varphi}$ от времени *t*

На рисунке 2.16 представлена траектория движения геометрического центра мобильного робота в прямом направлении.

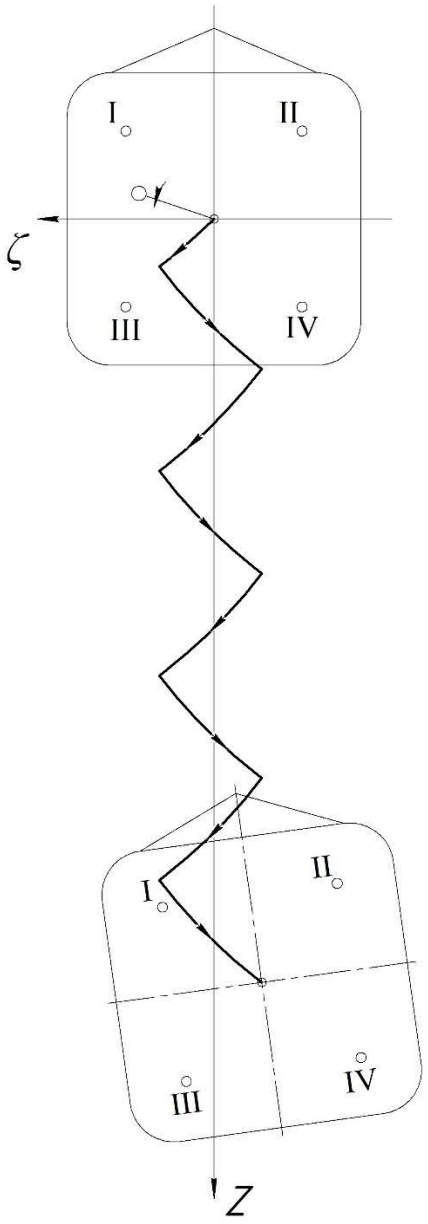


Рисунок 2.16 – Изменение положения геометрического центра корпуса мобильного робота с одним вращающимся внутренним телом при движении в прямом направлении

Алгоритм управления опорными стойками для движения геометрического центра корпуса мобильного робота в боковом направлении: I опора → Все опоры → III опора → Все опоры → I опора → Все опоры → III опора → Все опоры → I опора → Все опоры → III опора → Все опоры → I опора → Все опоры → III опора.

Общее время движения мобильного робота составляет 90,97 с.

На рисунках 2.17, 2.18 представлены зависимости изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ и его угловой скорости $\dot{\varphi}$ от времени.

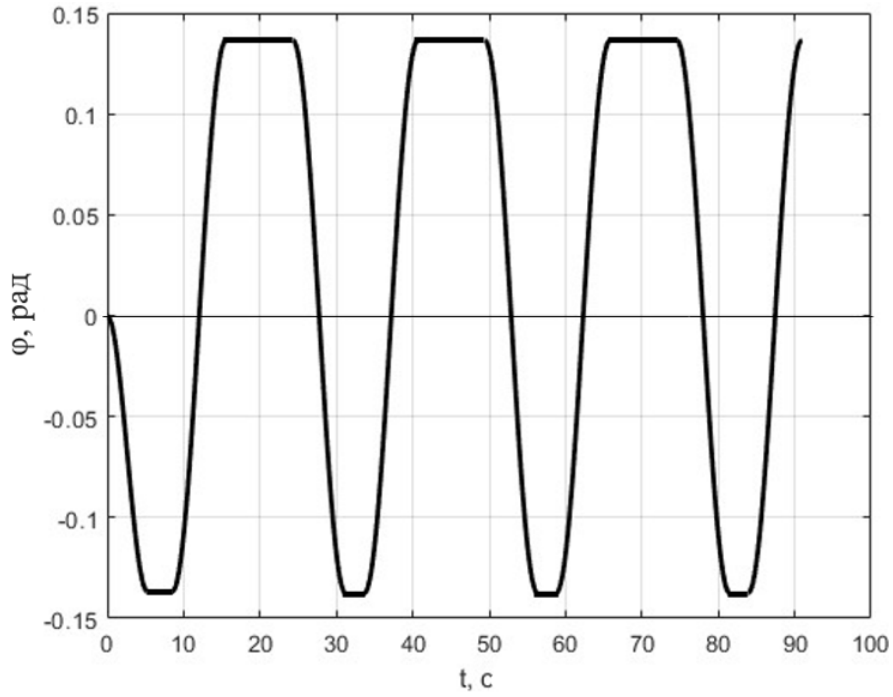


Рисунок 2.17 – Зависимость изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ от времени *t*

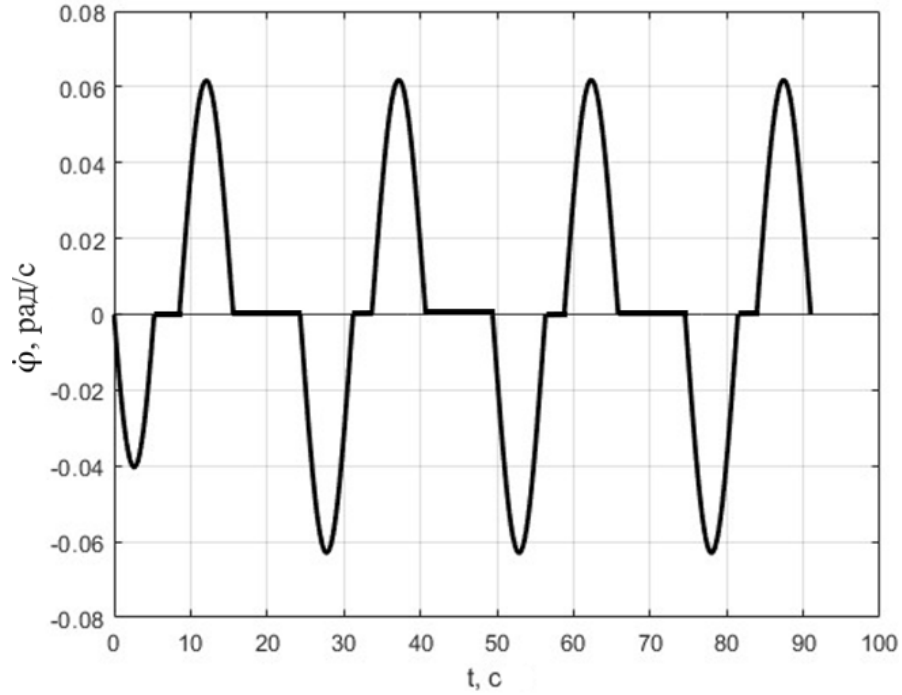


Рисунок 2.18 – Зависимость изменения угловой скорости корпуса мобильного робота $\dot{\varphi}$ от времени *t*

На рисунке 2.19 представлена траектория движения геометрического центра корпуса мобильного робота в боковом направлении.

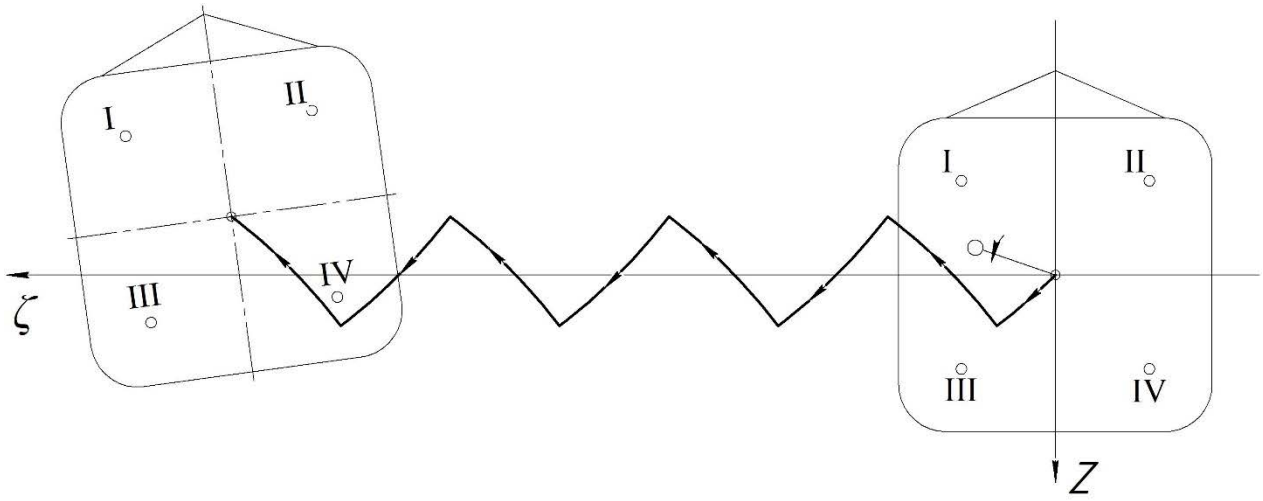


Рисунок 2.19 – Изменение положения геометрического центра корпуса мобильного робота с одним вращающимся внутренним телом при движении в боковом направлении

Алгоритм управления опорными стойками для движения геометрического центра корпуса мобильного робота по дуге окружности с R = 0,103 м:

I опора → Все опоры → II опора → Все опоры → I опора → Все опоры → II опора → Все опоры → I опора → Все опоры → IV опора → Все опоры → I опора → Все опоры → IV опора → Все опоры → I опора → Все опоры → III опора → Все опоры → I опора → Все опоры → III опора → Все опоры → I опора.

Общее время движения мобильного робота составляет 156,04 с.

На рисунках 2.20, 2.21 представлены зависимости изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ и его угловой скорости $\dot{\varphi}$ от времени.

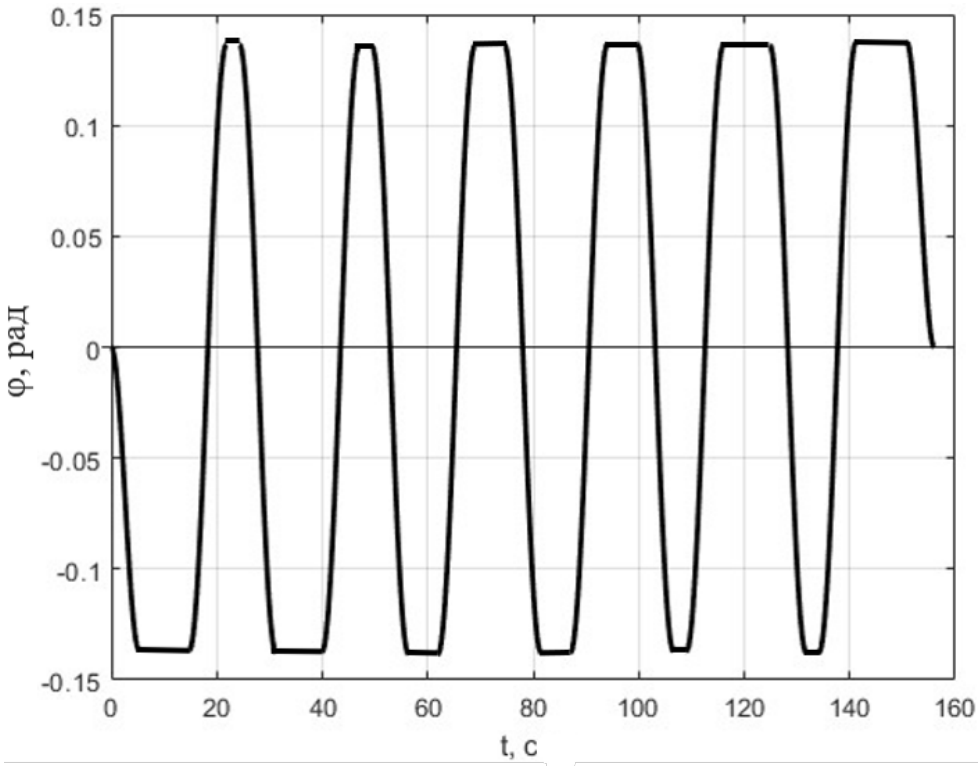


Рисунок 2.20 – Зависимость изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ от времени *t*

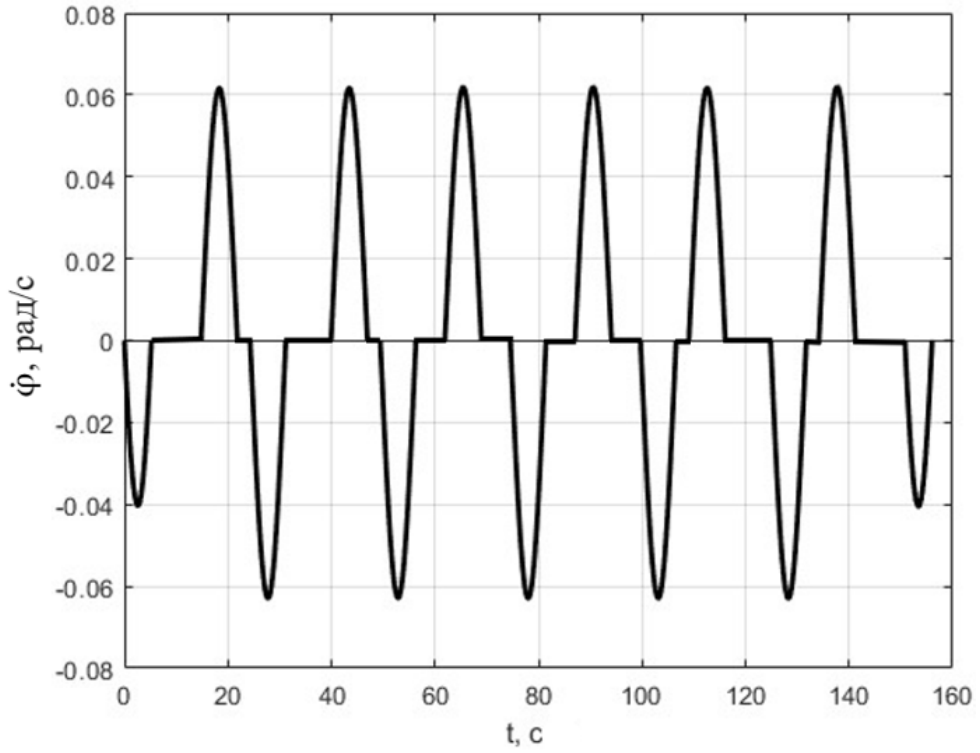


Рисунок 2.21 – Зависимость изменения угловой скорости корпуса мобильного робота $\dot{\varphi}$ от времени *t*

На рисунке 2.22 представлена траектория движения геометрического центра корпуса мобильного робота по дуге окружности с R = 0,103 м.

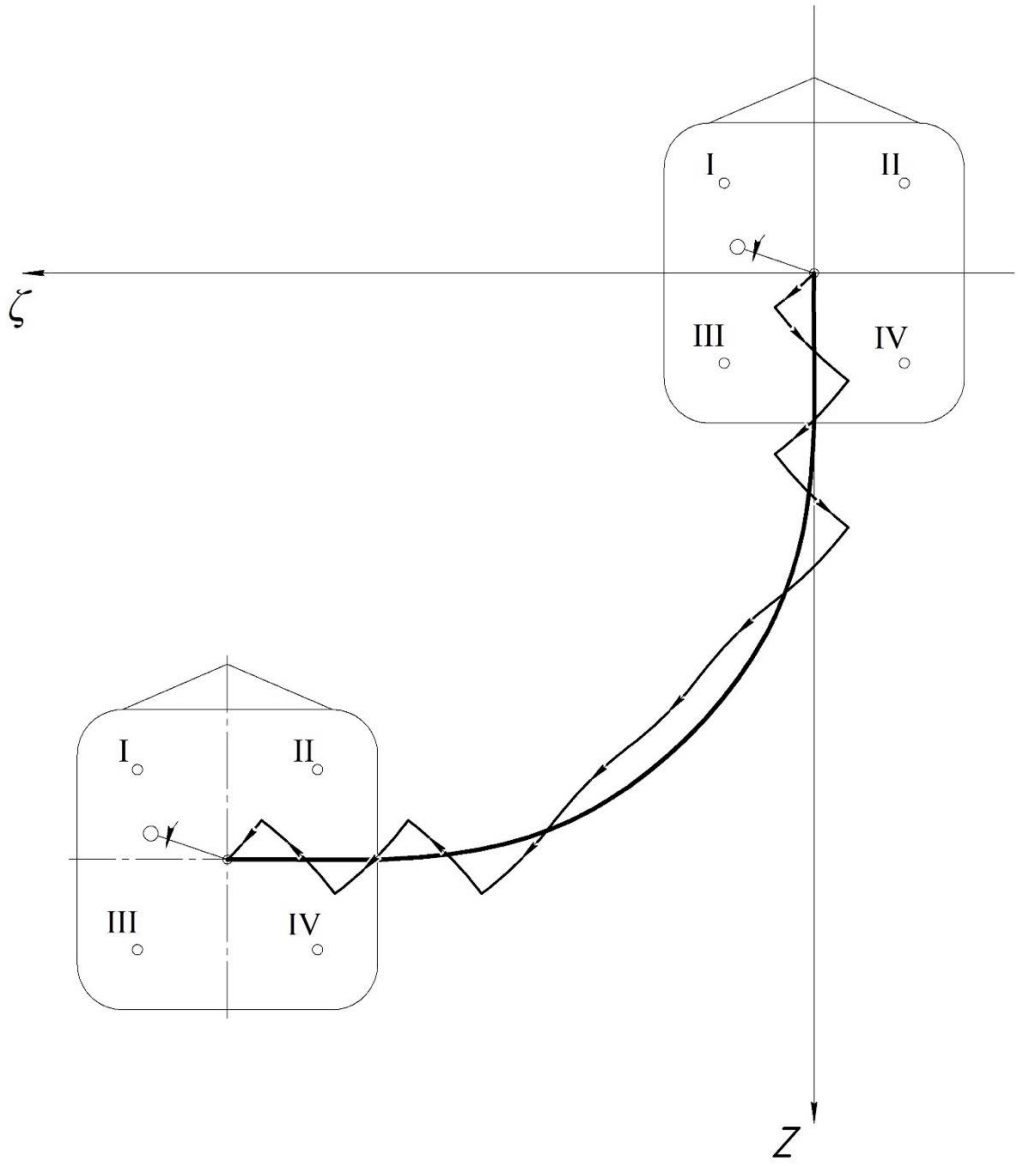


Рисунок 2.22 – Изменение положения геометрического центра корпуса мобильного робота с одним вращающимся внутренним телом при движении по дуге окружности с R = 0,103 м

Алгоритм управления опорными стойками для движения геометрического центра корпуса мобильного по диагонали:

I опора → Все опоры → IV опора → Все опоры → I опора → Все опоры → IV опора → Все опоры → I опора → Все опоры → IV опора → Все опоры → I опора → Все опоры → IV опора.

Общее время движения мобильного робота составляет 94,11 с.

На рисунках 2.23, 2.24 представлены зависимости изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ и его угловой скорости $\dot{\varphi}$ от времени.

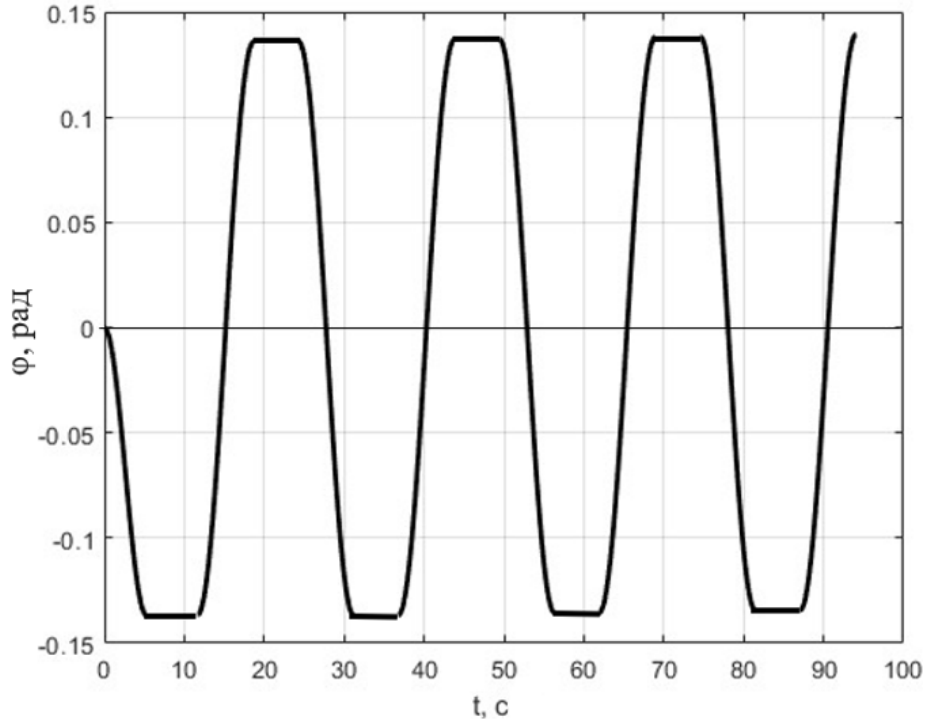


Рисунок 2.23 – Зависимость изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ от времени *t*

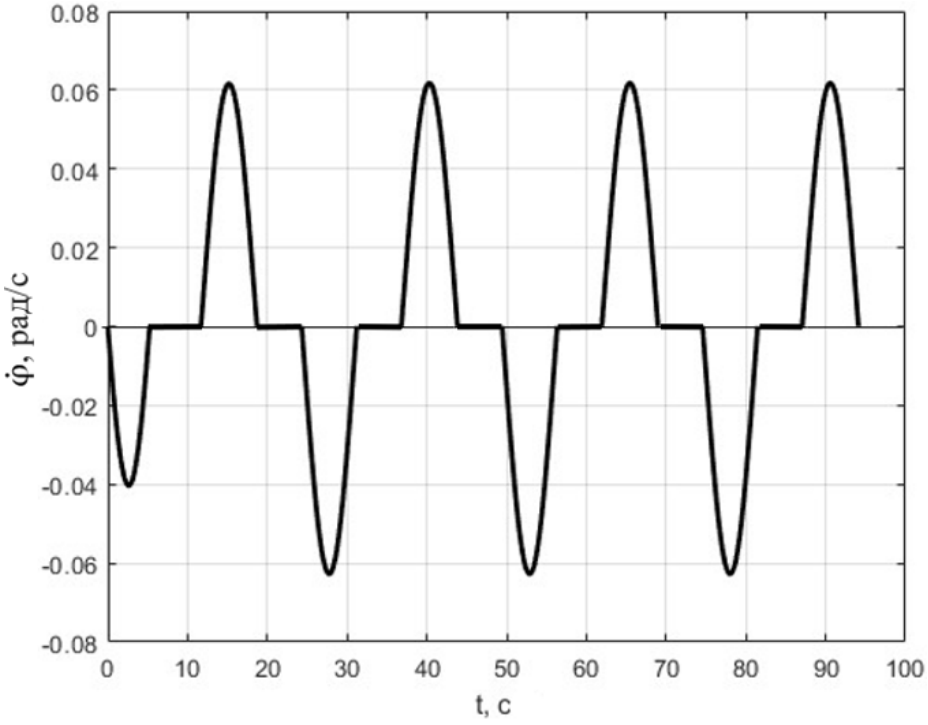


Рисунок 2.24 – Зависимость изменения угловой скорости корпуса мобильного робота $\dot{\varphi}$ от времени *t*

На рисунке 2.25 представлена траектория движения геометрического центра корпуса мобильного робота по диагонали.

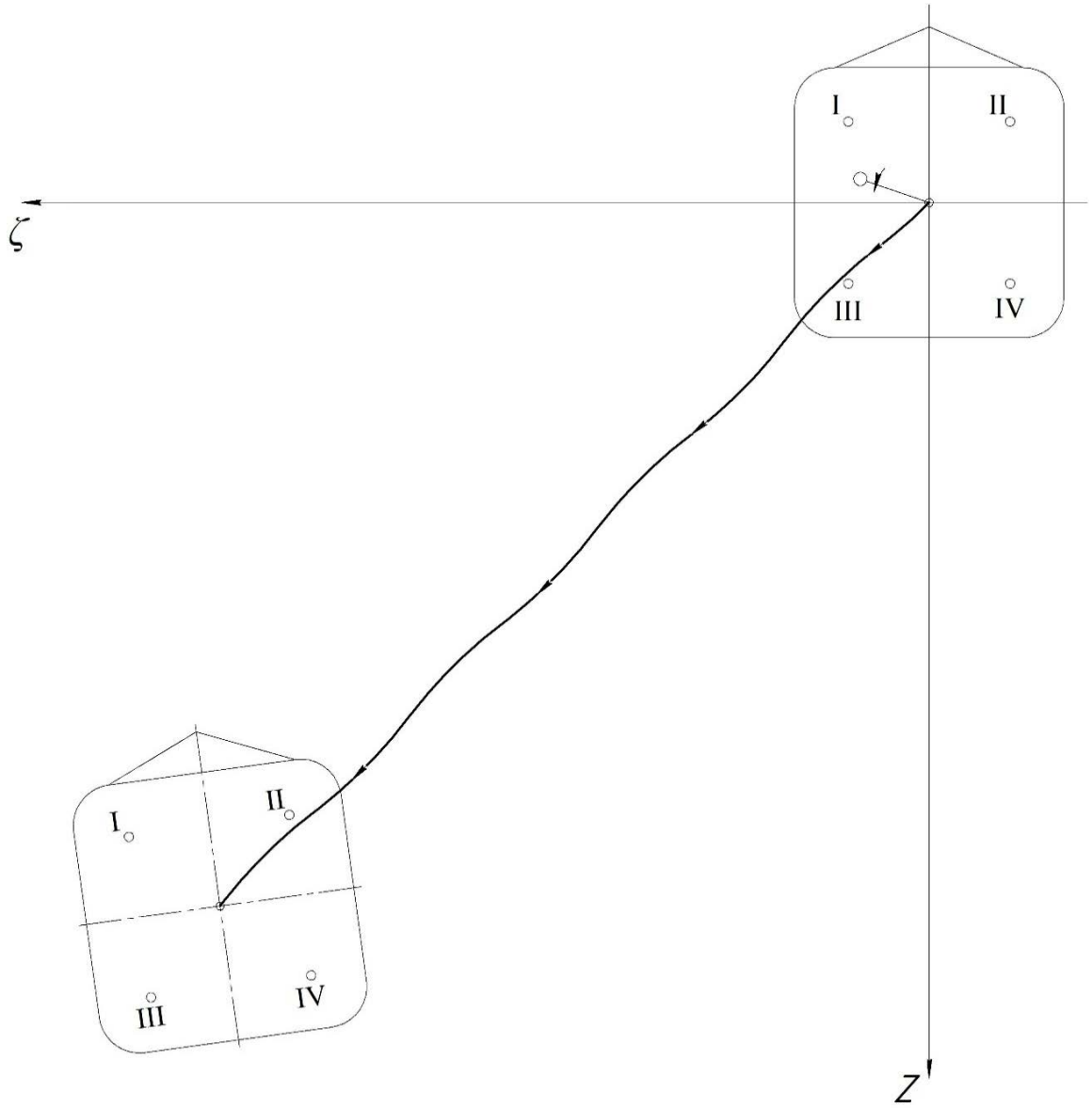


Рисунок 2.25 – Изменение положения геометрического центра корпуса мобильного робота с одним вращающимся внутренним телом при движении по диагонали

Алгоритм управления опорными стойками для разворота корпуса мобильного робота:

I опора → Все опоры → I опора → Все опоры → I опора → Все опоры → I опора → II опора → Все опоры → II опора

Общее время движения мобильного робота составляет 78,43 с.

На рисунках 2.26, 2.27 представлены зависимости изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ и его угловой скорости φ̇ от времени.

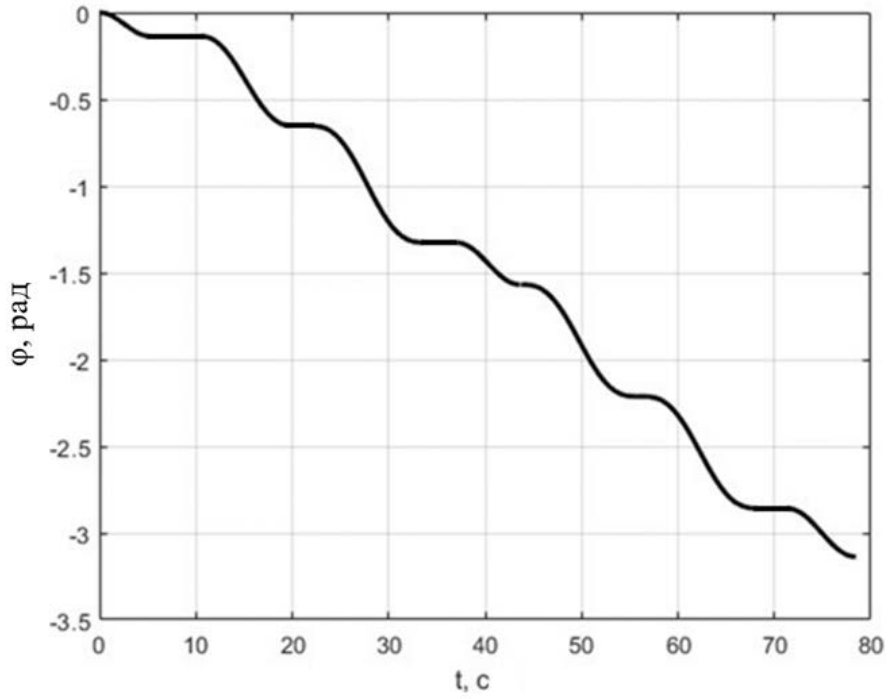


Рисунок 2.26 – Зависимость изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ от времени *t*

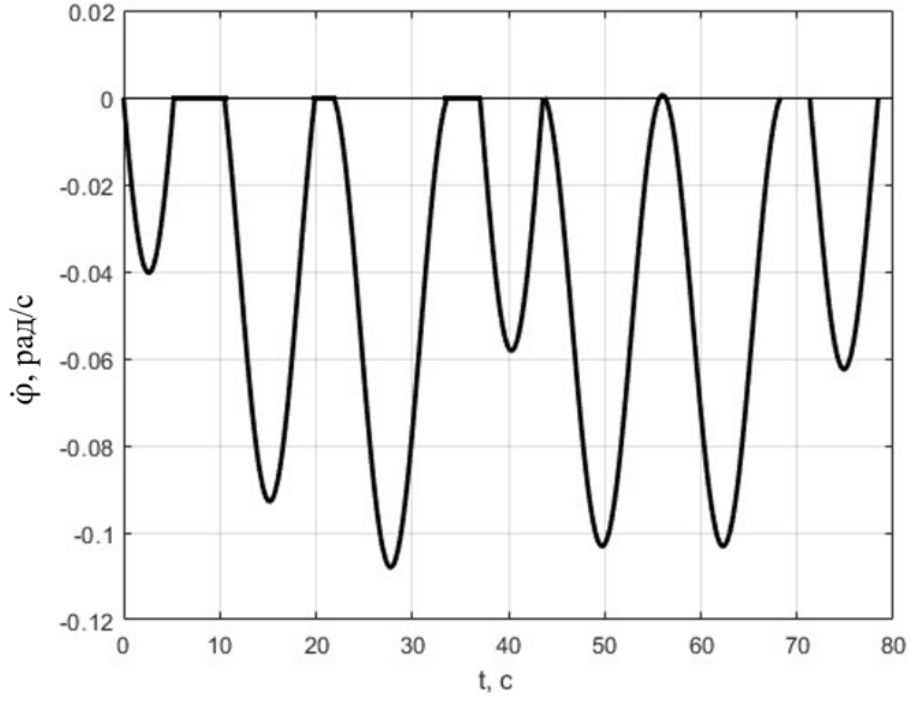


Рисунок 2.27 – Зависимость изменения угловой скорости корпуса мобильного робота φ̇ от времени *t*

На рисунке 2.28 представлена траектория движения геометрического центра корпуса мобильного робота при его развороте.

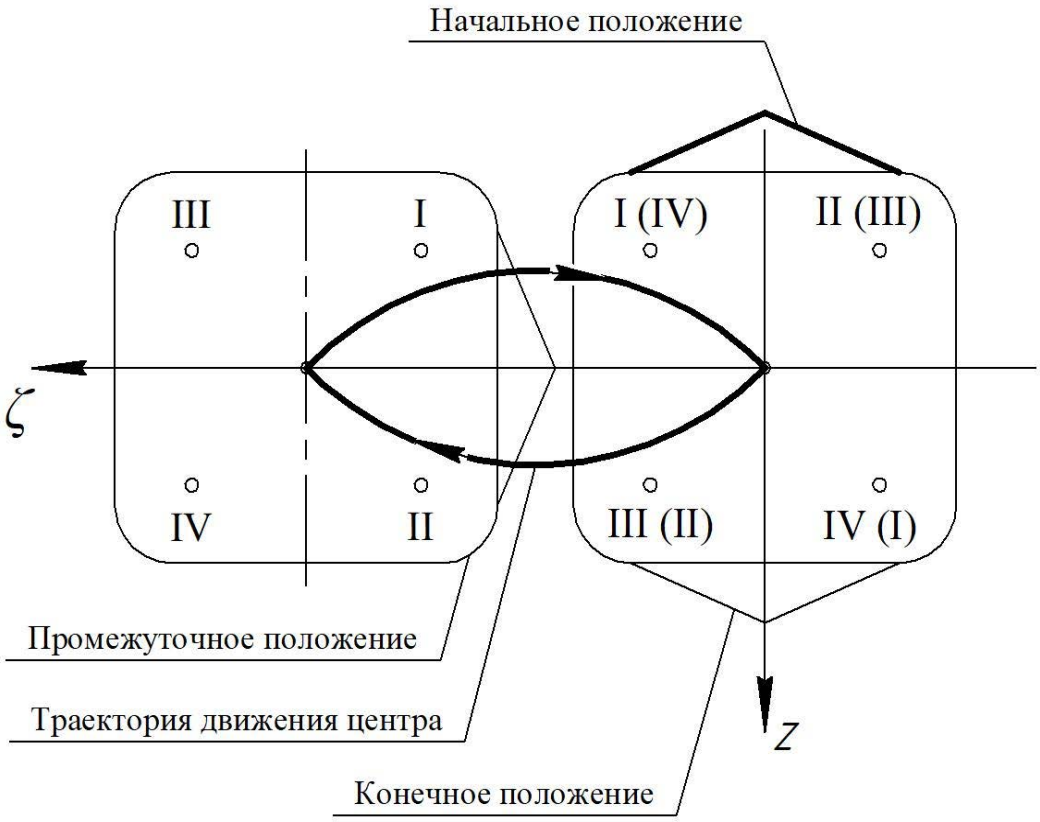


Рисунок 2.28 – Изменение положения геометрического центра корпуса мобильного при его развороте (в скобках указаны номера опор в конечном положении робота)

На рисунке 2.29 определены зависимости времени движения мобильного робота от угловой скорости вращения внутреннего тела. Из графиков следует, что увеличение угловой скорости вращения внутренней массы приводит к уменьшению времени движения робота из начального положения в конечное, время движения во многом зависит от алгоритма смены опорных стоек и необходимой траектории движения геометрического центра корпуса робота.

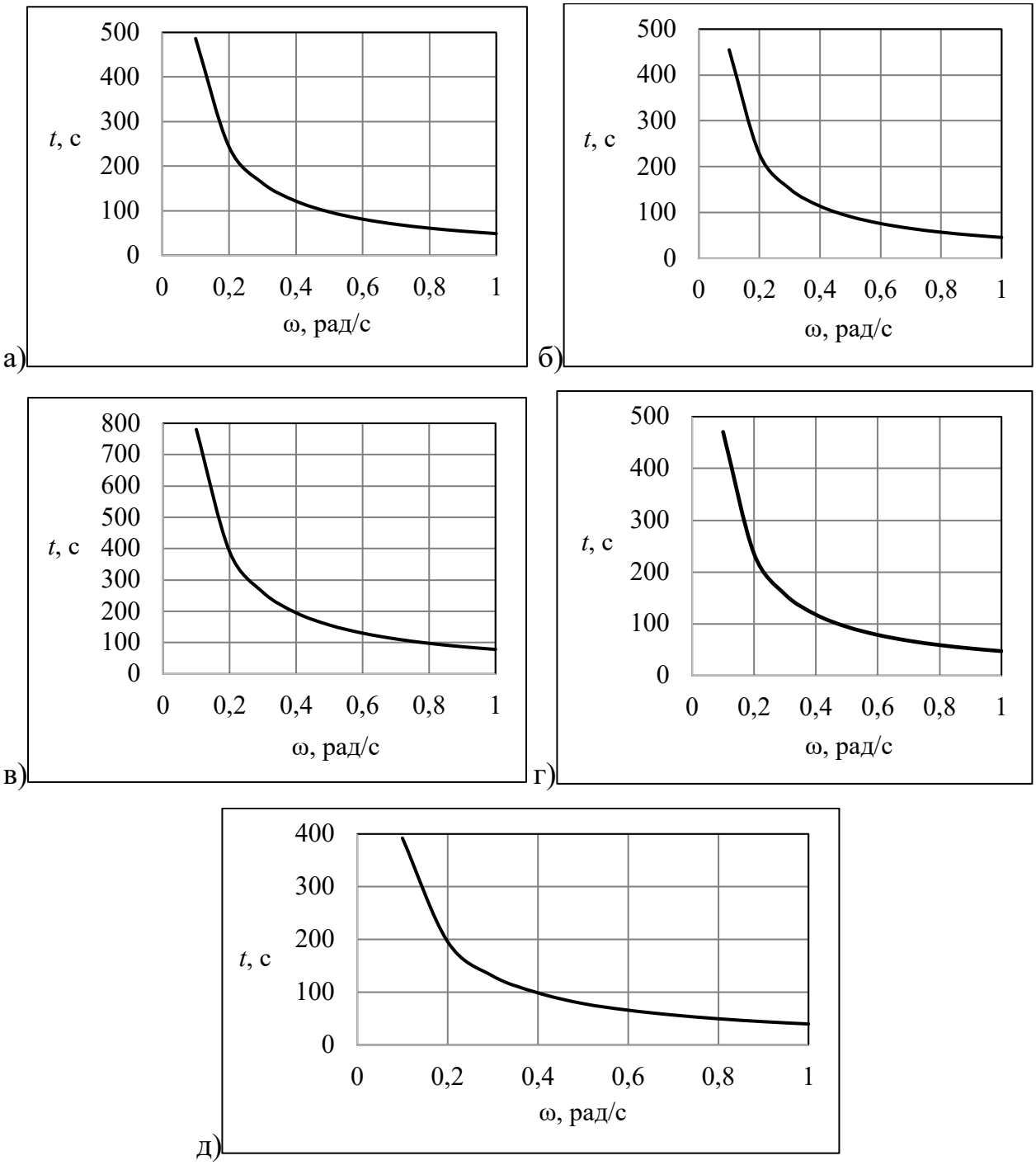


Рисунок 2.29 – Зависимость времени движения мобильного робота *t* от угловой скорости вращения внутреннего тела ω при движении геометрического центра корпуса робота: а) в прямом направлении; б) в боковом направлении; в) по дуге окружности; г) по диагонали; д) разворот корпуса

Движение мобильного робота происходит с рысканием корпуса, которое зависит от его угла поворота. При перемещении робот занимает пространство

S, рисунок 2.30. Вводится безразмерный параметр, называемый «коридором» $H = S/l$.

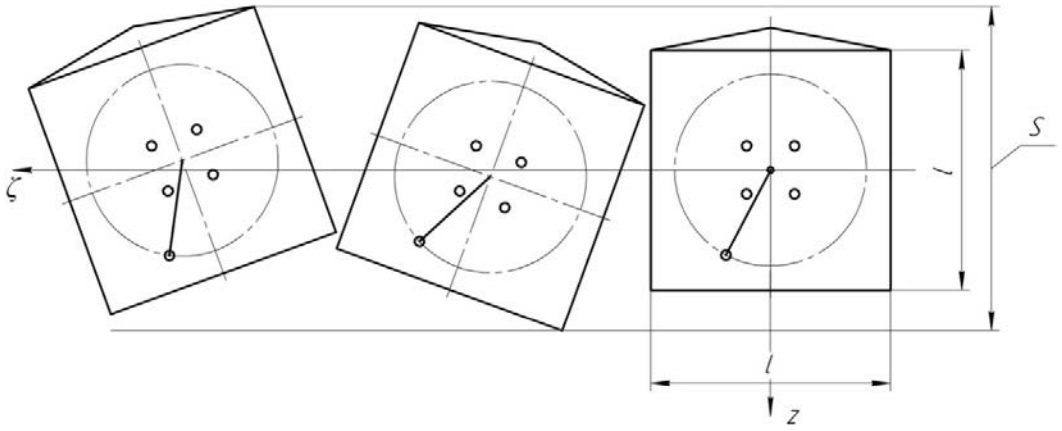


Рисунок 2.30 – «Коридор», занимаемый корпусом робота в процессе бокового движения

На рисунке 2.31 представлена зависимость изменения «коридора» H от параметра $T = \frac{t \cdot \omega}{2\pi}$, а также определены соотношения значимости показателей при движении робота в боковом направлении: $H = \lambda_1 T$; $H = \lambda_2 T$; $H = \lambda_3 T^2$, где λ – безразмерный коэффициент, определяемый экспертно: $\lambda_1 = 0{,}04$; $\lambda_2 = 0{,}07$; $\lambda_3 = 0{,}01$. В рассматриваемом случае длина и ширина корпуса робота $l = 0{,}5$ м, расстояние, пройденное роботом $L = 0{,}338$ м.

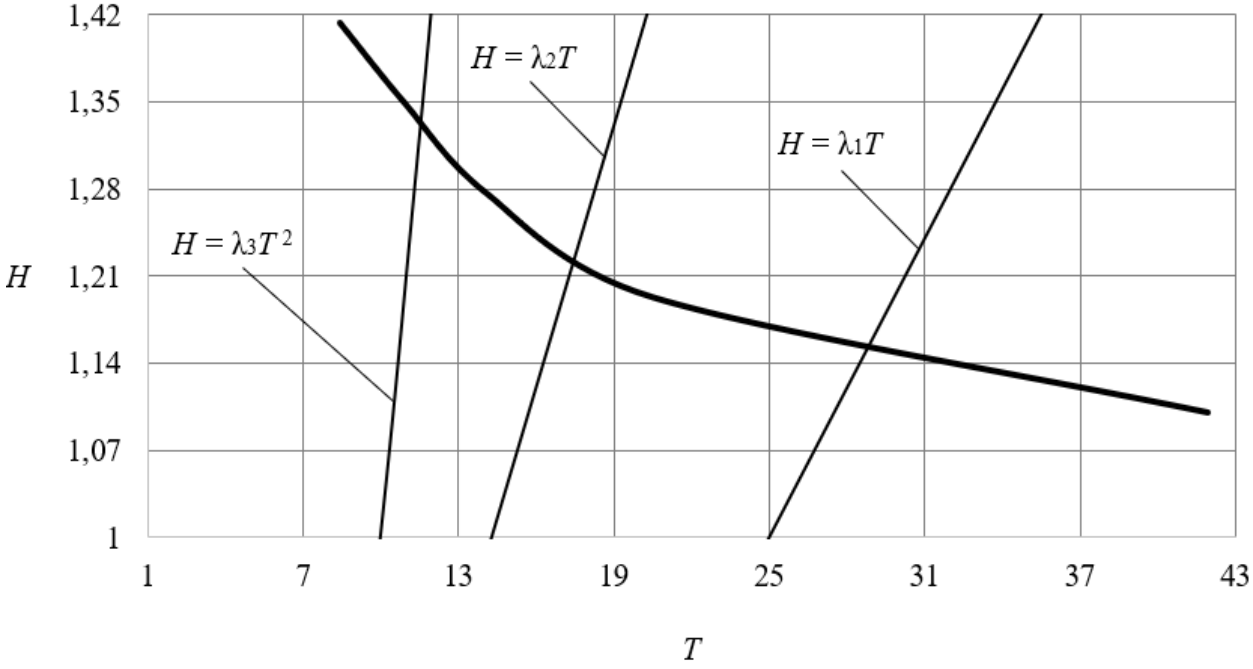


Рисунок 2.31 – Зависимость величины «коридора» H от параметра T

Решена многокритериальная задача оптимизации движения мобильного робота при перемещении корпуса в боковом направлении, рисунок 2.30. Решение оптимизационной задачи движения робота:

$$i = q_1 H + q_2 T \tag{2.21}$$

где: q_1, q_2 – весовые коэффициенты, определяемые экспертно.

Оптимизация движения робота производится при следующий значения весовых коэффициентов:

$$i = 0{,}34 \cdot H + 0{,}66 \cdot T \tag{2.22}$$

На рисунке 2.32 представлено решение оптимизационной задачи в зависимости от безразмерного коэффициента $k = \frac{J_a}{mrb}$, учитывающего массово-геометрические характеристики робота при следующих параметрах рассматриваемой механической системы: $\alpha_0 = 1.0472$ рад; $\omega = 1$ рад/с, $l = 0{,}5$ м. Расстояние, пройденное мобильным роботом, составляет 0,274 м.

Энергия, затрачиваемая при движении мобильного робота с опорными стойками и вращающимся внутренним телом:

$$W = \frac{J_a \varphi_{\max}^2 - J_a \varphi_{\min}^2}{2} \cdot n \tag{2.23}$$

где: J_a – момент инерции корпуса робота; $\varphi_{\max}$, $\varphi_{\min}$ – максимальный и минимальный углы поворота корпуса мобильного робота n – количество циклов перемещения робота.

В таблице 2.3 представлены значения величин *k, H, T, I*, а также затрачиваемой энергии в процессе движения робота *W*.

Таблица 2.3 – Сводная таблица величин

Безразмерный коэффициент, k	5	10	15	20	25
Величина коридора, H	1,35	1,193	1,135	1,103	1,083
Безразмерный параметр, учитывающий время движения, T	8,424	17,4204	23,949	40,892	43,519
Решение оптимизационной задачи, i	6,018	11,903	16,192	27,363	29,091
Затрачиваемая энергия в процессе движения, W (Дж)	0,275	0,137	0,057	0,045	0,037

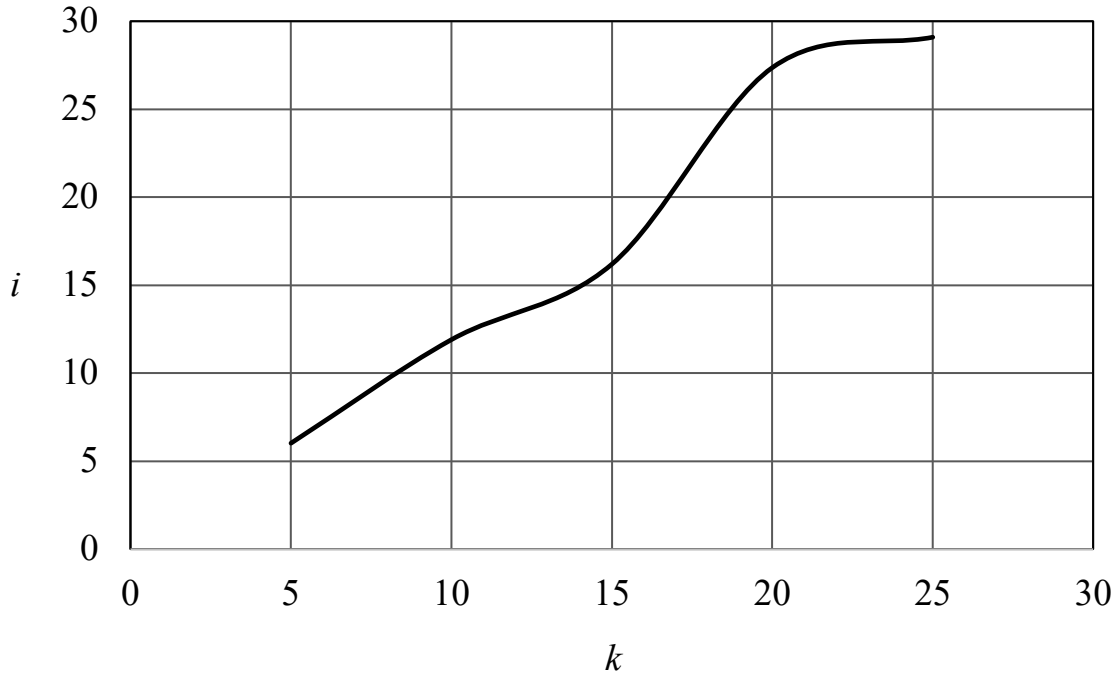


Рисунок 2.32 – Зависимость решения оптимизационной задачи i от безразмерного коэффициента k, учитывающего массово-геометрические характеристики робота

Из полученных результатов определяется, что уменьшение угла поворота корпуса мобильного робота и более частая смена опорных стоек приводит к меньшим значениям энергозатрат и уменьшению «коридора», при этом время движения робота по заданной траектории увеличивается.

2.3.2 Движение мобильного робота с одним вращающимся внутренним телом и опорными стойками по наклонно расположенной поверхности

Исследование модельной задачи движения мобильного робота по наклонной поверхности, рисунок 2.5, как механической системы с параметрами α_0 = 60 град; ω = 0,5 рад/с; β = 4 град; b = 0,5 м; r = 0,3 м; J_a = 1,2809 кг·м^2; m = 2 кг.

На рисунках 2.33, 2.34 представлены зависимости изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ и его угловой скорости $\dot{\varphi}$ от времени.

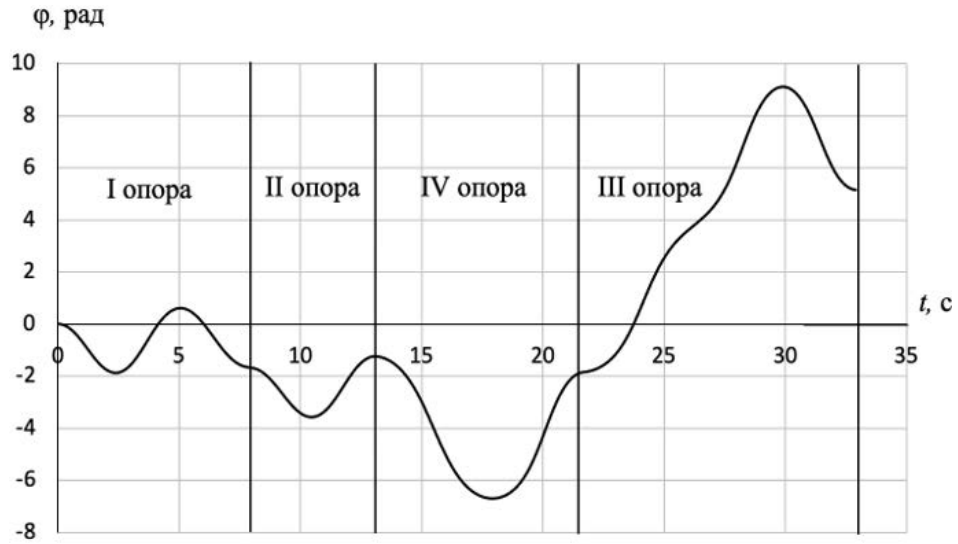


Рисунок 2.33 – Зависимость изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ от времени t

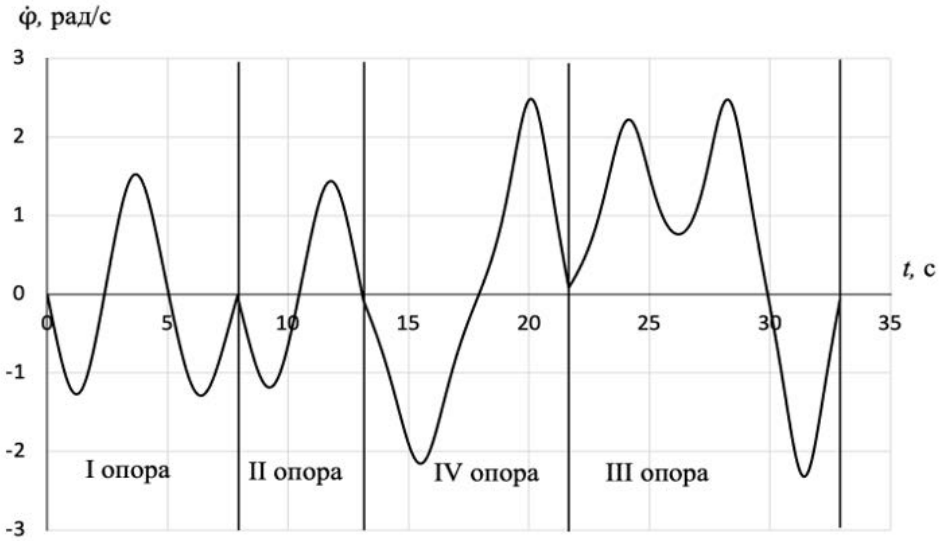


Рисунок 2.34 – Зависимость изменения угловой скорости корпуса мобильного робота $\dot{\varphi}$ от времени t

В таблице 2.3 представлен алгоритм управления опорными стойками, соответствующий траектории движения геометрического центра корпуса робота, представленной на рисунке 2.35, а также значения угла поворота корпуса φ, рад.

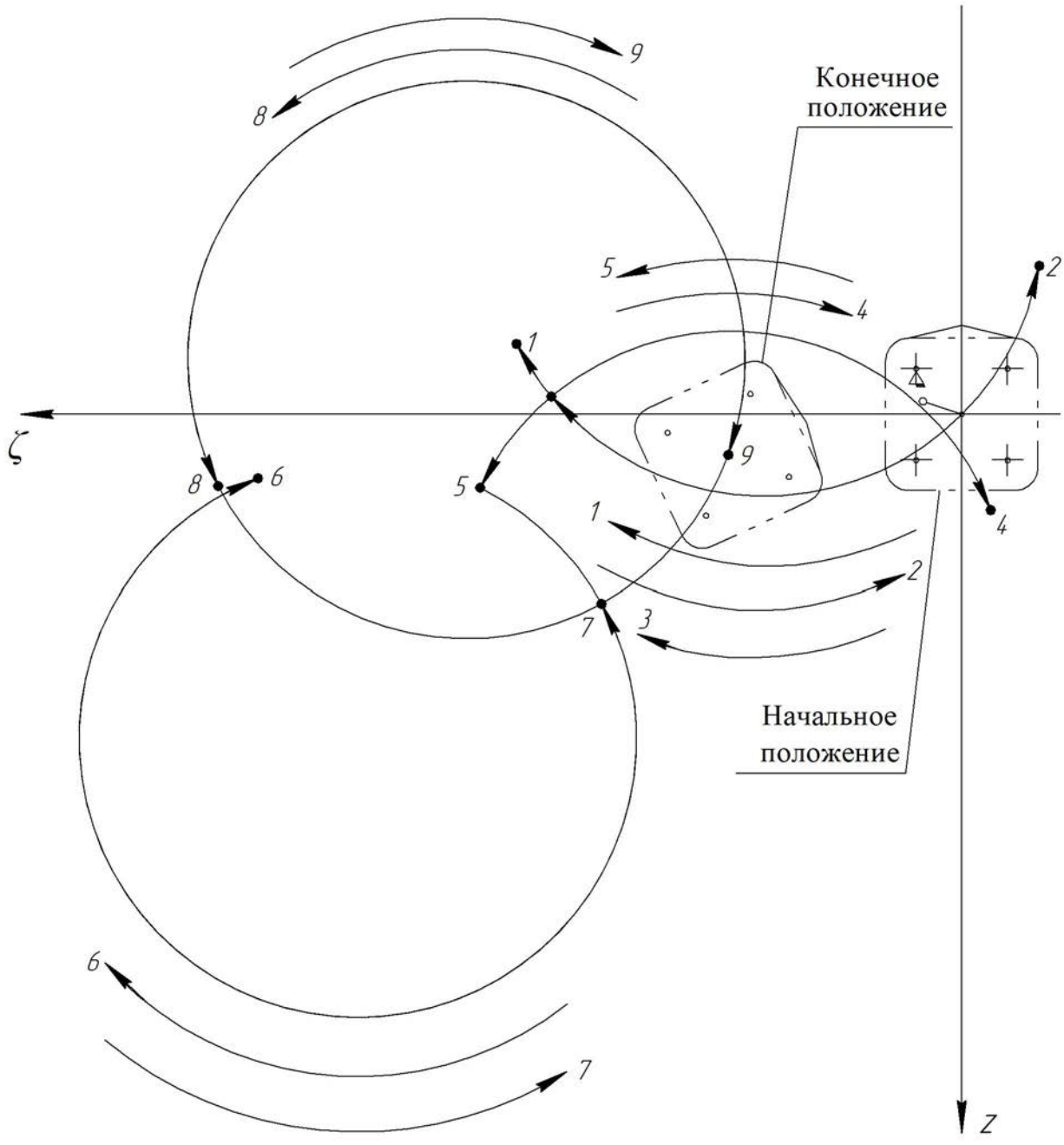


Рисунок 2.35 – Изменение положения центра корпуса мобильного робота с одним вращающимся внутренним телом при движении по наклонной поверхности

Таблица 2.3 – Алгоритм управления стойками мобильного робота при движении по наклонно расположенной поверхности

Промежуток времени движения *t*, с.	Угол поворота корпуса мобильного робота φ, град.	Стойка, взаимодействующая с поверхностью
0 … 7,9 с.	0 … -95,43°	I опора
7,9 … 13,13 с.	-95,43 … -70,65°	II опора
13,13 … 21,65 с.	-70,65 … -105,51°	IV опора
21,65 … 32,9 с.	-105,51 … -295,27°	III опора

При движении робота по наклонной плоскости угловая скорость корпуса увеличивается (рисунок 2.34) за счет действия сил тяжести. Смена направления вращения корпуса вокруг неподвижной опоры имеет более частый характер, это заметно из рисунков 2.33, 2.35. В таком случае для перемещения по заданной траектории потребуется либо более частая смена опорных стоек, либо необходимое направления вращения корпуса вокруг неподвижной опоры (смена опоры после нескольких циклов изменения направления вращения корпуса робота). Таким образом задача перемещения мобильного робота по наклонной плоскости является более сложной, так как в зависимости от необходимых требований, например, времени движения робота, заданного «коридора» или минимума энергозатрат, необходимо установить наиболее эффективный алгоритм смены опорных элементов.

2.3.3 Движение мобильного робота с несколькими вращающимся внутренними телами и опорными стойками по горизонтальной поверхности

Исследование модельной задачи движения мобильного робота с двумя вращающимися с постоянной скоростью внутренними массами, (рисунок 2.3, б) как механической системы с параметрами a = 0,20 м; b = 0,02 м; d = 0,02 м; r_1 = 0,09 м; r_2 = 0,10 м; m_1 = 1 кг; m_2 = 2,5 кг; ω_1 = 0,5 рад/с; ω_2 = 0,5 рад/с; α_1 = 1,047 рад.; α_2 = 0,52 рад.

На рисунках 2.36, 2.37 представлены зависимости изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ и его угловой скорости $\dot{\varphi}$ от времени.

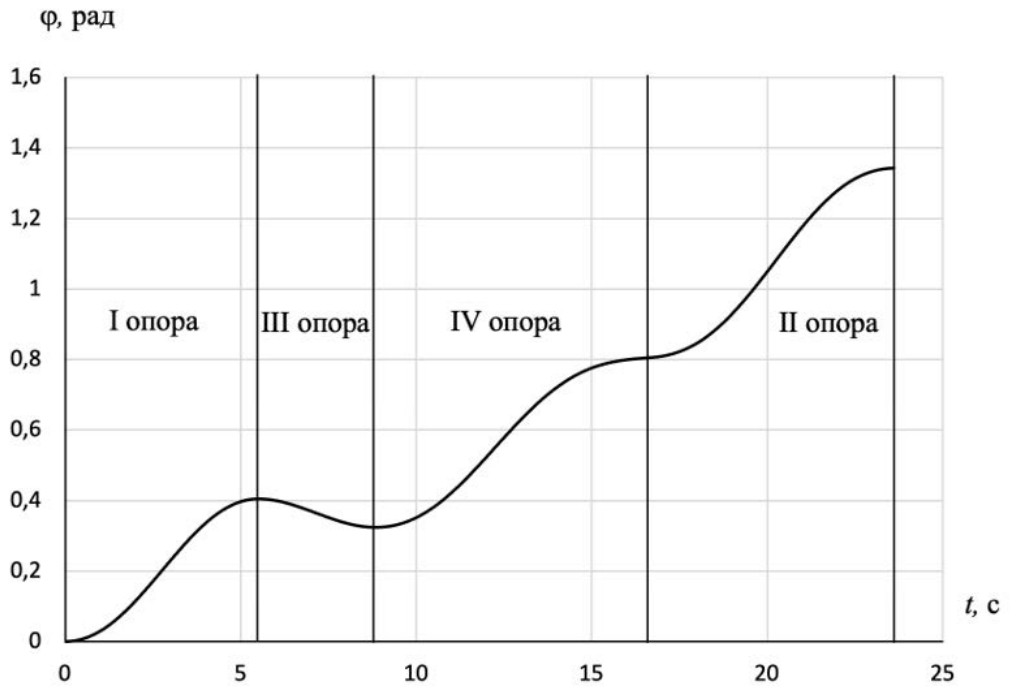


Рисунок 2.36 – Зависимость изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ от времени *t*

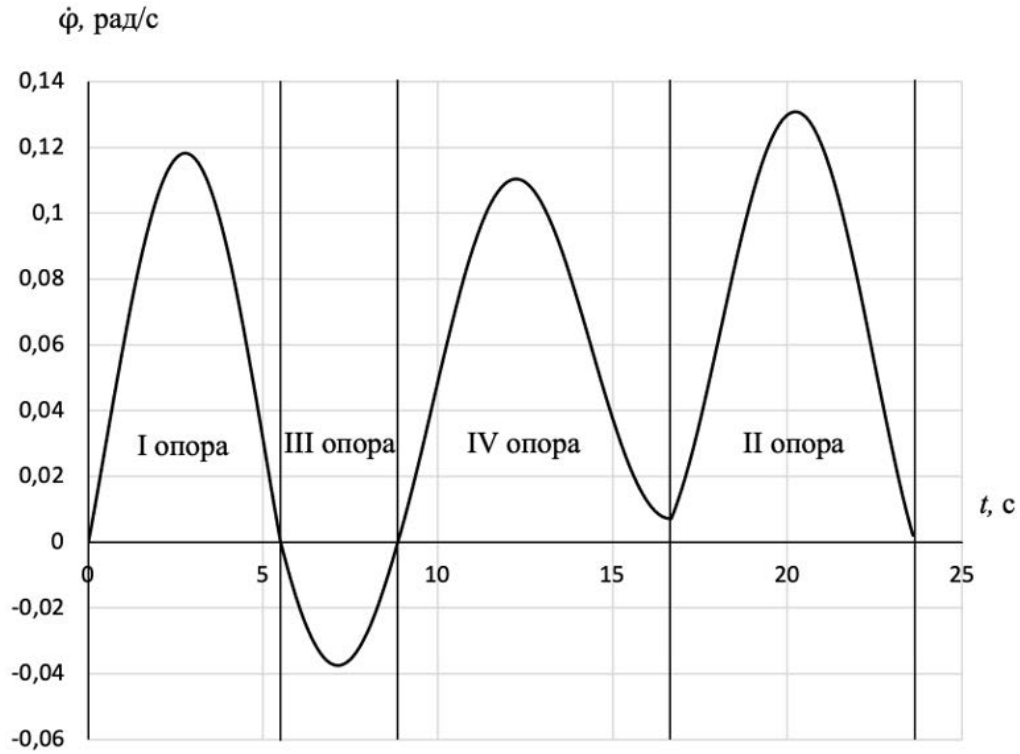


Рисунок 2.37 – Зависимость изменения угловой скорости корпуса мобильного робота $\dot{\varphi}$ от времени *t*

В таблице 2.4 представлен алгоритм управления опорными стойками на различных участках движения, соответствующий траектории движения геометрического центра корпуса робота, представленной на рисунке 2.38, а также значения угла поворота корпуса φ, рад.

Таблица 2.4 – Алгоритм управления стойками мобильного робота с несколькими вращающимися внутренними телами при движении по горизонтально расположенной поверхности

Участок движения	Промежуток времени движения *t*, с.	Угол поворота корпуса мобильного робота φ, град.	Стойка, взаимодействующая с поверхностью
Участок 1 – 2	0 … 5,50 с.	0 … 23,17°.	I опора
Участок 2 – 3	5,50 … 8,86 с.	23,17 … 18,52°.	III опора
Участок 3 – 4	8,86 … 16,68 с.	18,52 … 46,12°.	IV опора
Участок 4 – 5	16,68 … 23,60 с.	46,12 … 76,98°.	II опора

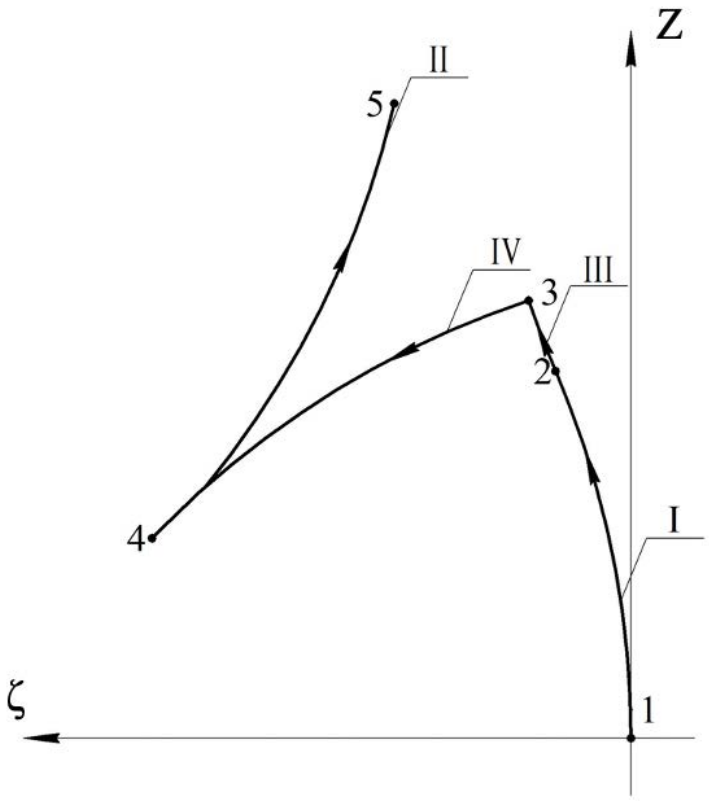


Рисунок 2.38 – Изменение положения центра корпуса мобильного робота с несколькими вращающимися внутренними телами

Изменения положения геометрического центра корпуса мобильного робота с несколькими внутренними массами, рисунок 2.4, б: в начальный момент времени корпус вращается против часовой стрелки, участок 1, в момент времени 5,50 с. его угловая скорость равна нулю и происходит смена стойки, после чего корпус начинает вращаться против часовой стрелки, участок 2. Дальнейшее перемещение мобильного робота происходит аналогичным образом.

2.4 Выводы по 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, учитывающие массово-геометрические параметры и позволяющие устанавливать законы перемещения по заданной траектории.

Представлены уравнения программного движения робота с внутренними массами, совершающими вращательное движение, с произвольным последовательным изменением взаимодействующих с опорной поверхностью стоек при перемещении по плоским горизонтальным и наклонным поверхностям.

Определены временные промежутки контакта каждой из стоек с опорной поверхностью, а также значения угла порота и угловой скорости корпуса робота в процессе движения, для обеспечения отсутствие удара в момент смены стоек. Получена траектория движения геометрического центра корпуса робота, при различных заданных алгоритмах смены опорных стоек.

Представлены алгоритмы управления опорными стойками мобильного робота с вращающимся внутренним телом, позволяющие реализовывать различные траектории движения геометрического центра корпуса робота, в том числе и базовые (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 отсутствие 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 за счет жесткой фиксации в момент ее контакта с поверхностью.

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.

ГЛАВА 3. Расчетная схема и определение тяговых усилий привода мобильного робота, перемещающегося за счет периодического заклинивания опорных элементов

Рассматривается мобильный робот, состоящий из двух тел, связанных 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 усилий, создаваемых линейным приводом мобильного робота, при движении робота по различно ориентированной в пространстве направляющей.

3.1 Описание конструкции и принципа перемещения мобильного робота, перемещающегося за счет периодического заклинивания опорных элементов

Мобильный робот, работающий на эффекте периодического заклинивания опорных элементов, рисунок 3.1, содержит две соосные каретки 1, выполненные в форме втулок, внутренняя поверхность которых имеет грубую шероховатость в периферийной расширяющейся зоне и гладкую поверхность в центральной цилиндрической зоне, рисунок 3.2, каретки 1 установлены на цилиндрической направляющей 5 и присоединены друг к другу линейным электроприводом 2, при этом на каждой из кареток 1, выполненных в форме втулок, установлен сервопривод 4 с осью, перпендикулярной осям втулок 1, а на выходных валах установлены неуравновешенные грузы 3.

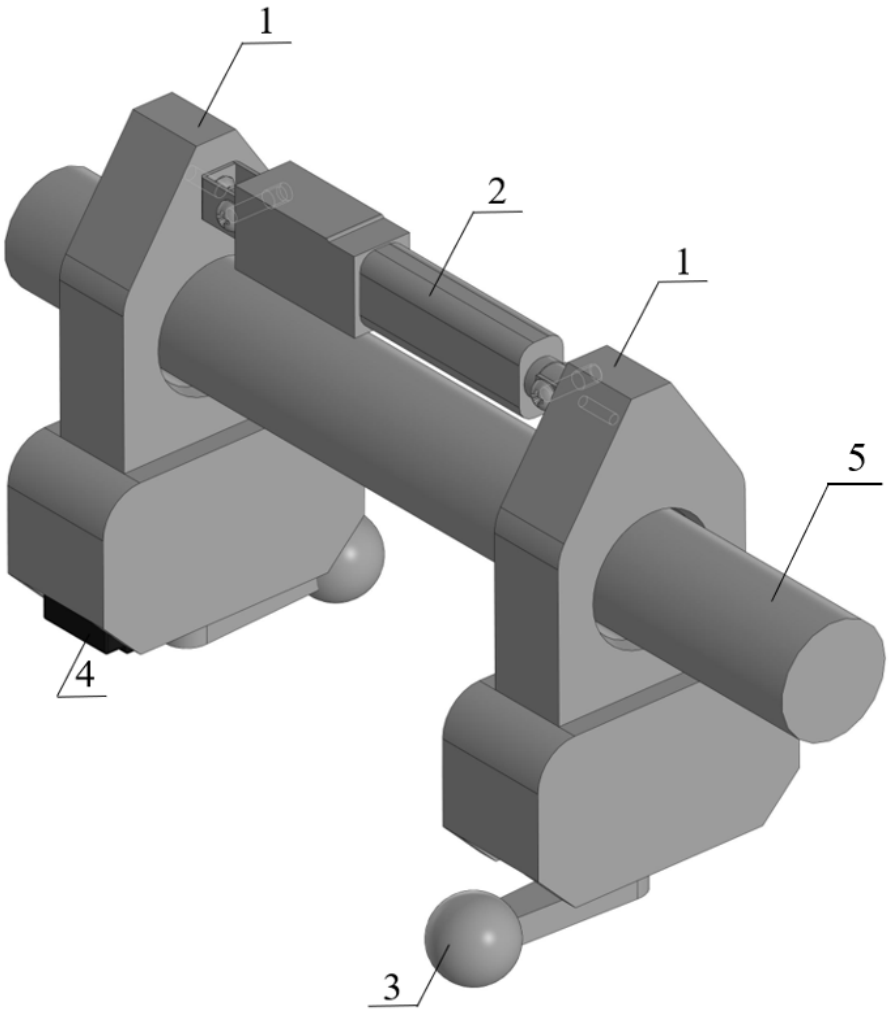


Рисунок 3.1 – Мобильный робот, работающий на эффекте периодического заклинивания опорных элементов

Особенностью конструкции втулки является то, что внутренняя поверхность, периодически взаимодействующая с несущей протяженной конструкцией (стержнем, трубой, канатом и т.п.) имеет различную шероховатость за счет гладкой поверхности в средней части внутренней поверхности втулки и грубо шероховатой в периферийной зоне. Этим обеспечивается как заклинивание, так и скольжение втулки относительно несущей конструкции, необходимое для перемещения корпуса робота. Конструкция втулки выполнена таким образом, что внутренняя поверхность втулки 1, периодически взаимодействующая с несущей протяженной конструкцией 2 (стержнем, трубой, канатом и т.п.) имеет скосы 3 с шероховатой поверхностью по краям внутренней поверхности втулки под

углом к более гладкой поверхности 4 в средней части внутренней поверхности втулки, рисунок 3.2, что обеспечивает повышение эффективности реализации процесса заклинивания и прогнозируемое значение коэффициентов трения в фазах заклинивания и скольжения втулки относительно несущей конструкции.

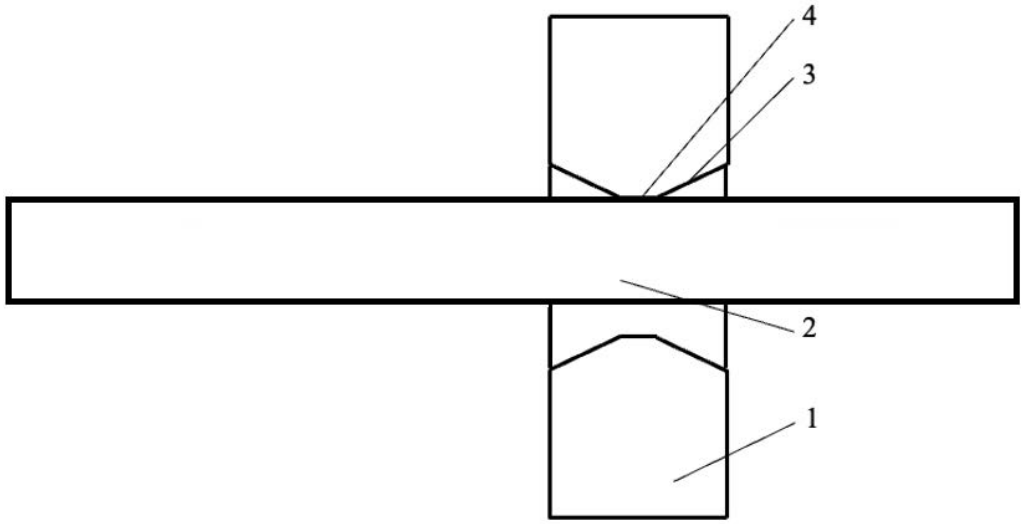


Рисунок 3.2 – Схема конструкции втулки

Движение робота (рисунок 3.1) осуществляется за счет воздействия линейного привода 2, на втулки 1. Привод закреплен на шарнирах, что позволяет втулкам менять угол наклона. Заклинивание одной из втулок зависит от направления движения робота и происходит следующим образом: сервопривод 4 поворачивает стержень с закрепленным дополнительным грузом 3 под действием массы груза 3 и силы трения происходит заклинивание втулки 1 со стержнем 5, в то время как другая – свободно перемещается по нему.

При движении робота по горизонтальной направляющей левая втулка заклинивается за счет работы сервопривода и перемещения неуравновешенного груза в крайнее левое положение. При этом левая втулка взаимодействует с направляющей внутренней шероховатой поверхностью. Одновременно за счет работы линейного привода правая втулка расклинивается и движется вправо. Затем цикл повторяется относительно противоположных втулок.

Таким образом, мобильный робот осуществляет перемещение по направляющей и одновременно, при необходимости, выполняет те или иные технологические операции, например, очищает ее от посторонних тел.

3.2 Расчетная схема мобильного робота, перемещающего за счет периодического заклинивания опорных элементов, при движении по горизонтально расположенной направляющей

Расчетная схема мобильного робота представлена на рисунке 3.3. Одна из втулок находится в постоянном 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.

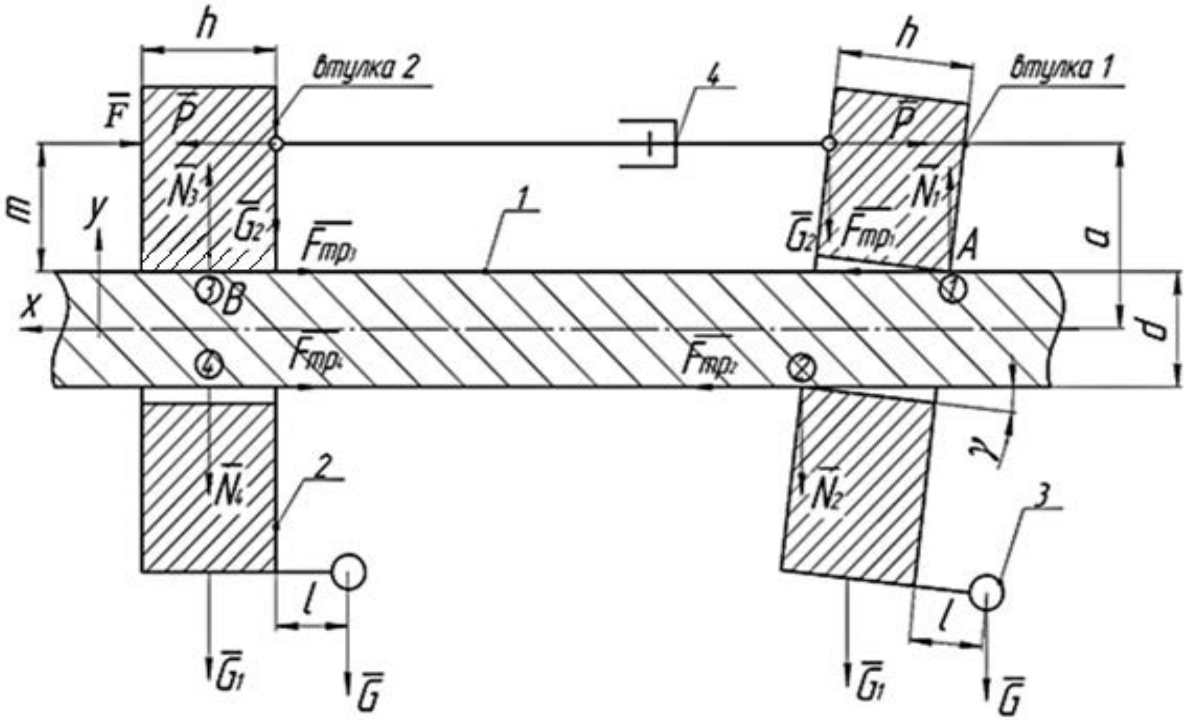


Рисунок 3.3 – Расчетная схема мобильного робота при движении по горизонтальной направляющей: 1 – стержень; 2 – втулка; 3 – груз; 4 – линейный привод

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, равняется действующей со стороны привода силе при движении робота; 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 груза до втулки; a – расстояние от места крепления привода до середины стержня; d – диаметр стержня; m – расстояние от силы, действующей со стороны препятствия до стержня; b – расстояние от центра втулки до точки действия силы реакции опоры N; угол $\gamma \approx 0$ град.

Для определения необходимых со стороны привода мобильного робота усилий для заклинивания одной из втулок и перемещения по направляющей другой представлены уравнения квазистатического движения, учитывается малость угла γ наклона втулки.

Для первой втулки система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} fN_1 + fN_2 - P = 0, \\ N_1 - N_2 - G - G_1 - G_2 = 0, \\ -P\left(a - \dfrac{d}{2}\right) + G_2 h - fN_2 d + G_1 \dfrac{h}{2} - Gl + N_2 h = 0; \end{cases} \tag{3.1}$$

для второй втулки:

$$\begin{cases} P - f_1 N_3 - f_1 N_4 - F = 0, \\ N_3 - N_4 - G - G_1 - G_2 = 0, \\ P\left(a - \dfrac{d}{2}\right) - G_2 \dfrac{h}{2} - G\left(l + \dfrac{h}{2}\right) + f_1 N_4 d - Fm = 0; \end{cases} \quad (3.2)$$

Из системы уравнений 3.1 определятся минимальное необходимое значение силы, действующая со стороны привода $P_{\text{I min}}$, для заклинивания одной из втулок в зависимости от параметров рассматриваемой механической системы:

$$P_{\text{I min}} \geq -\frac{Gf\left(df - 2l - h\right) + G_1 df^2 + G_2 f\left(df + h\right)}{h - 2af} \quad (3.3)$$

Из системы уравнений 3.2 определятся минимальное необходимое значение силы, действующая со стороны привода $P_{\text{II min}}$, для начала движения не заклиненной втулки в зависимости от параметров рассматриваемой механической системы:

$$P_{\text{II min}} > \frac{G\left(h + 2l + df_1\right) + G_1 df_1 + G_2\left(h + df_1\right) + 2Fm}{2a} \quad (3.4)$$

А также значение силы сопротивления F, действующей со стороны препятствия или со стороны инструмента, который может быть установлен на втулке для совершения определённой технологической операции:

$$F = -\frac{G\left(h + 2l + df_1\right) + G_1 df_1 + G_2\left(h + df_1\right) - 2Pa}{d + 2m} \quad (3.4)$$

3.3 Расчетная схема мобильного робота, перемещающего за счет периодического заклинивания опорных элементов, при движении по направляющей, расположенной под углом

При движении по направляющей, расположенной под углом, необходимость в дополнительных грузах уменьшается, зацепление одной из втулок с опорной поверхностью происходит за счет силы, действующей со стороны линейного привода, и сил трения.

3.3.1 Движение мобильного робота вверх по наклонной направляющей

Расчетная схема мобильного робота представлена на рисунке 3.4.

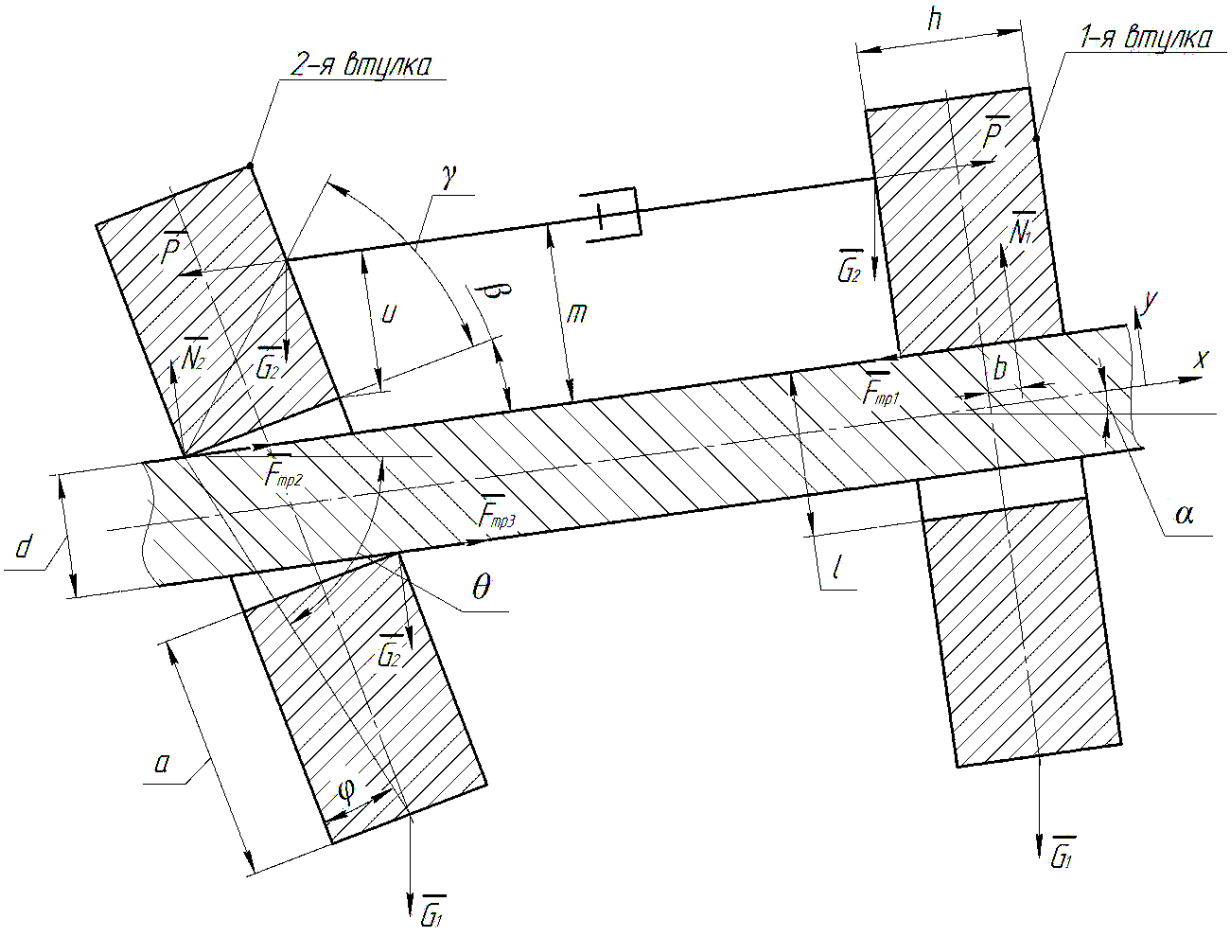


Рисунок 3.4 – Расчетная схема мобильного робота при движении вверх по направляющей, расположенной под углом

Уравнения квазистатического движения мобильного робота, учитывается малость угла γ наклона втулки.

Для первой втулки:

$$\begin{cases} P - fN_1 - \sin\alpha\left(G_1 + G_2\right) = 0, \\ N_1 - \cos\alpha\left(G_1 + G_2\right) = 0, \\ G_2\sqrt{\left(\dfrac{h}{2}\right)^2 + m^2}\cdot\sin\left[\arctan\left(\dfrac{h}{2m} + \alpha\right)\right] - Pm - G_1\left(a + l\right)\sin\alpha + N_1 b = 0; \end{cases} \tag{3.5}$$

для второй втулки:

$$\begin{cases} -P + f_1\left(N_2 + N_3\right) - \sin\alpha\left(G_1 + G_2\right) = 0, \\ N_2 - N_3 - \cos\alpha\left(G_1 + G_2\right) = 0, \\ Pm + f_1 N_3 d - G_2\sqrt{(m-s)^2 + h^2}\cdot\cos\left(\alpha+\beta+\gamma\right) - N_3\left(d\cdot\tan\beta + \dfrac{h}{\cos\beta}\right) - \\ -G_1\sqrt{\left(a+l\right)^2 + \left(\dfrac{h}{2}\right)^2}\cdot\cos\theta = 0. \end{cases} \tag{3.6}$$

3.3.2 Движение мобильного робота вниз по наклонной направляющей

Расчетная схема мобильного робота представлена на рисунке 3.5.

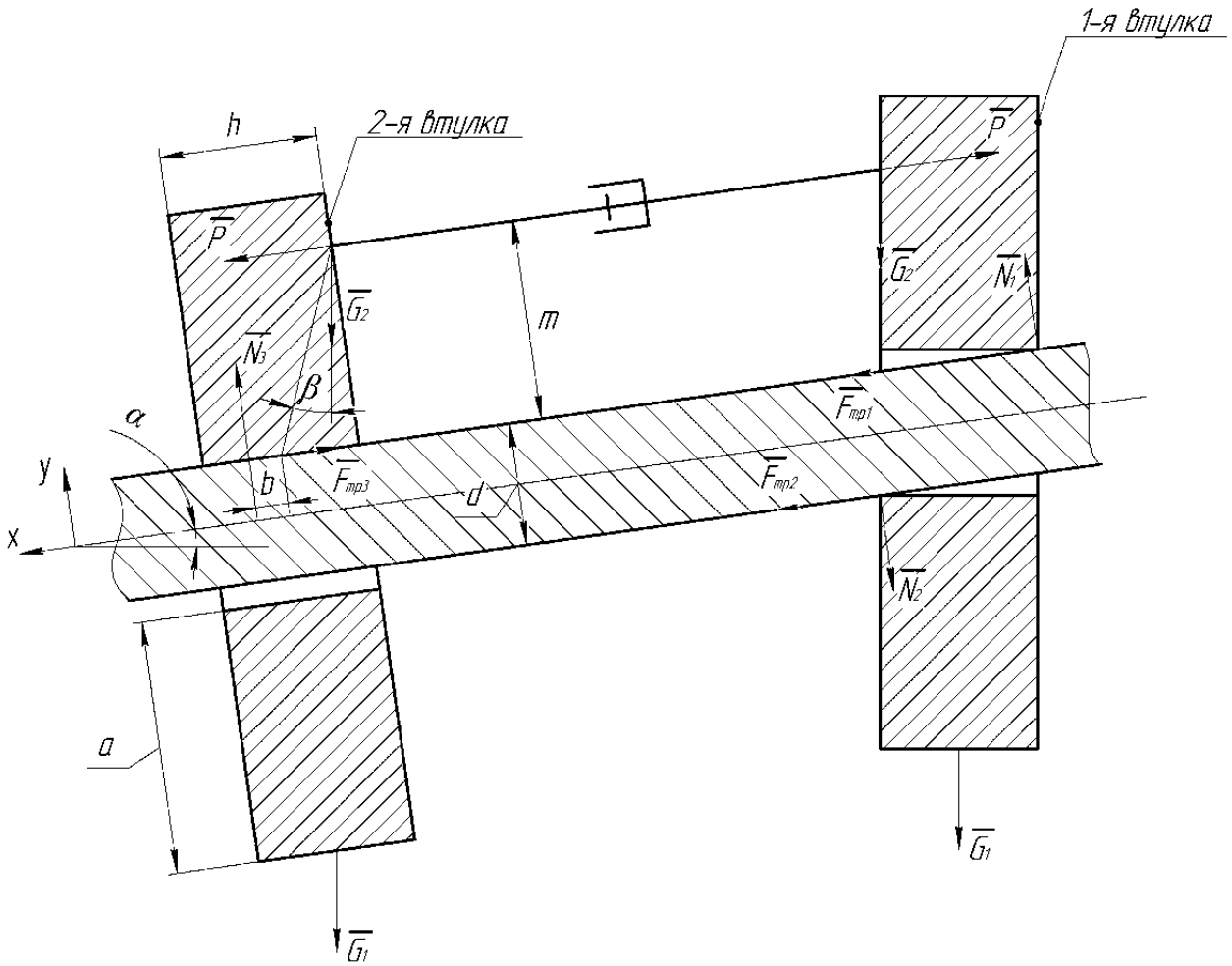


Рисунок 3.5 – Расчетная схема мобильного робота при движении вниз по направляющей, расположенной под углом

Уравнения квазистатического движения робота, учитывается малость угла γ наклона втулки.

Для первой втулки:

$$\begin{cases} f\left(N_1+N_2\right)+\sin\alpha\left(G_1+G_2\right)-P=0; \\ N_1-N_2-\cos\alpha\left(G_1+G_2\right)=0; \\ \dfrac{G_1h}{2}+G_2h-fN_2d-Pm+N_2\left(d\cdot\tan\alpha+\dfrac{h}{\cos\alpha}\right)=0; \end{cases} \quad (3.6)$$

для второй втулки:

$$\begin{cases} P - f_1 N_3 + \sin\alpha\left(G_1 + G_2\right) = 0, \\ N_3 - \cos\alpha\left(G_1 + G_2\right) = 0, \\ Pm - N_3 b - G_1\left(a + l\right)\cdot\sin\alpha - G_2\sqrt{m^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}\cdot\sin\left[\arctan\left(\frac{h}{2m}\right) - \alpha\right] = 0, \end{cases} \tag{3.7}$$

где: $-\frac{h}{2} \le b \le \frac{h}{2}$; $\beta = \arctan\left(\frac{l-d}{h}\right)$; $\gamma = \arctan\left(\frac{m-s}{h}\right)$; $\varphi = \arctan\left(\frac{h}{2\left(a+l\right)}\right)$;

$\theta = 90^\circ - \beta - \alpha - \varphi.$

3.4 Исследование модельной задачи движения мобильного робота, определения усилий, создаваемых линейным приводом

3.4.1 Усилия, создаваемые линейным приводом для движения мобильного робота по горизонтально расположенной направляющей.

Рассматривается механическая система, соответствующая схеме, представленной на рисунке 3.3, с параметрами: G_1 = 3,92 Н; G_2 = 3 Н; F = 0 Н; a = 0,065 м; h = 0,03 м; d = 0,03 м; l = 0,015 м; m = 0,02 м.

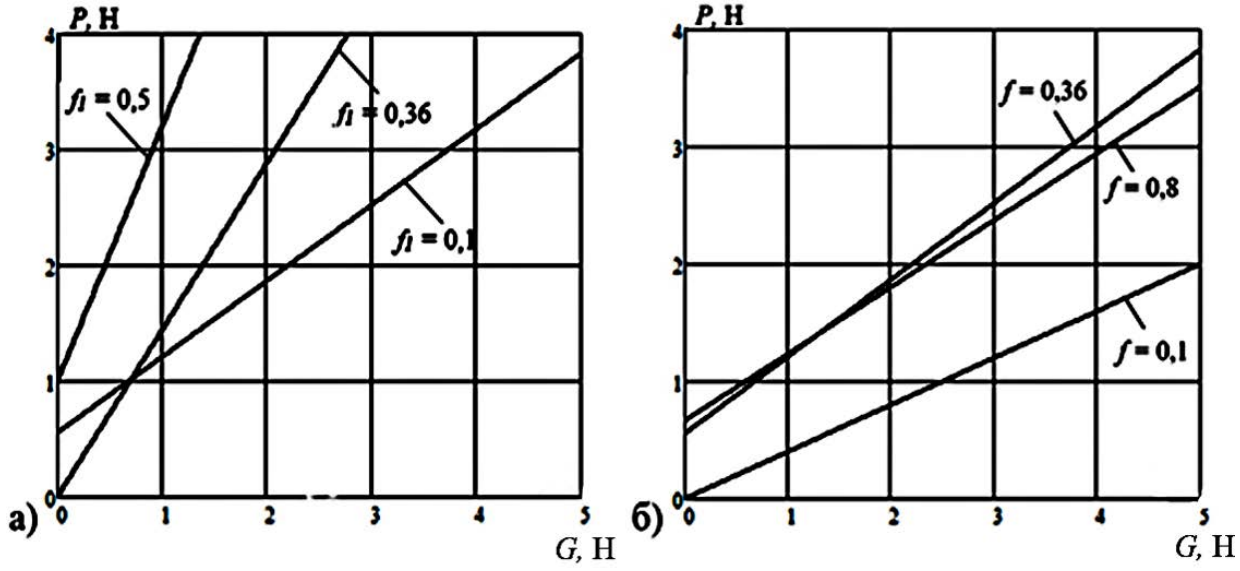


Рисунок 3.6 – Зависимость силы, действующей со стороны привода P от веса дополнительного груза G при: а) f = 0,36; б) f_1 = 0,1

Рассмотрим, как зависит сила, действующая со стороны привода P, от геометрических параметров рассматриваемой механической системы и силы сопротивления F, действующей со стороны препятствия или со стороны инструмента, который может быть установлен на втулке для совершения определённой технологической операции. Параметры механической системы: G = 3 Н; G_1 = 3,92 Н; G_2 = 3 Н; F_1 = 0 Н; F_2 = 5 Н; F_3 = 10 Н; f = 0,5; f_1 = 0,1; a = 0,065 м; h = 0,03 м; l = 0,015 м; m = 0,02 м; d = 0,03 м.

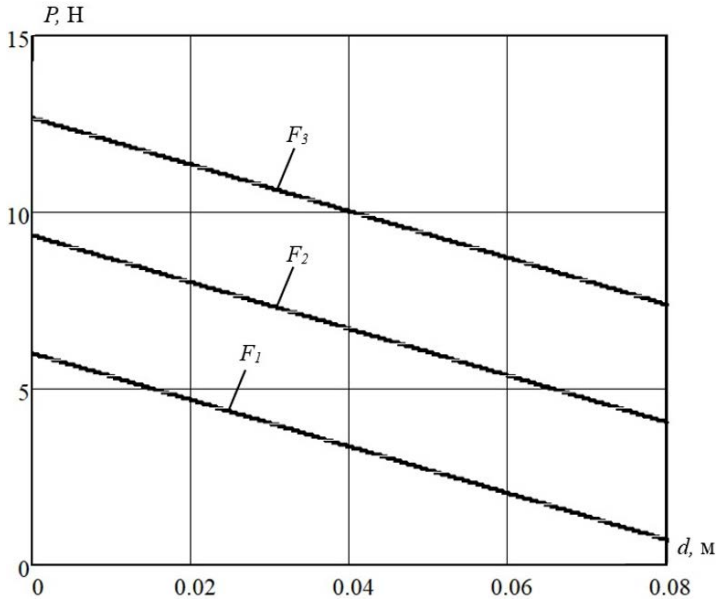


Рисунок 3.7 – Зависимость силы, действующей со стороны привода P от диаметра направляющей d

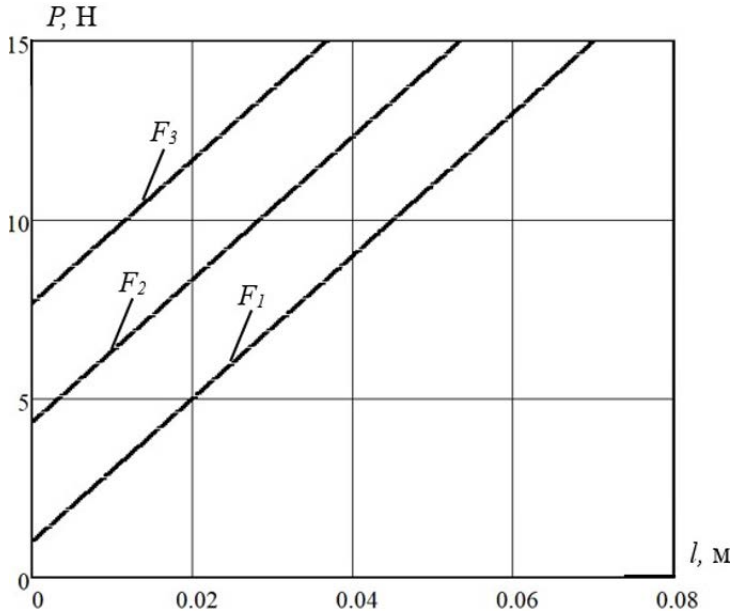


Рисунок 3.8 – Зависимость силы, действующей со стороны привода P от l (расстояние от груза до втулки)

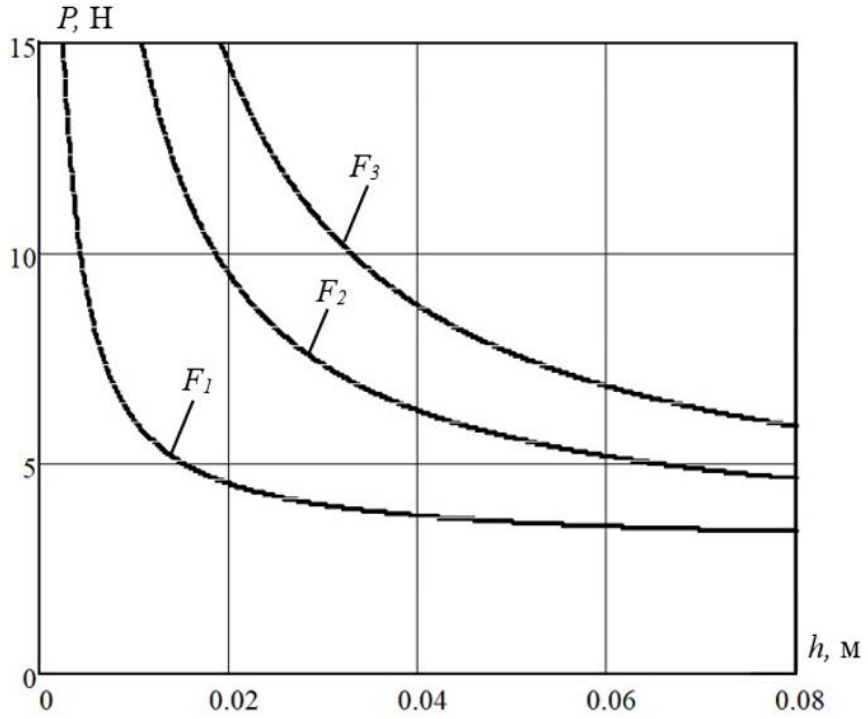


Рисунок 3.9 – Зависимость силы, действующей со стороны привода *P* от ширины втулки *h*

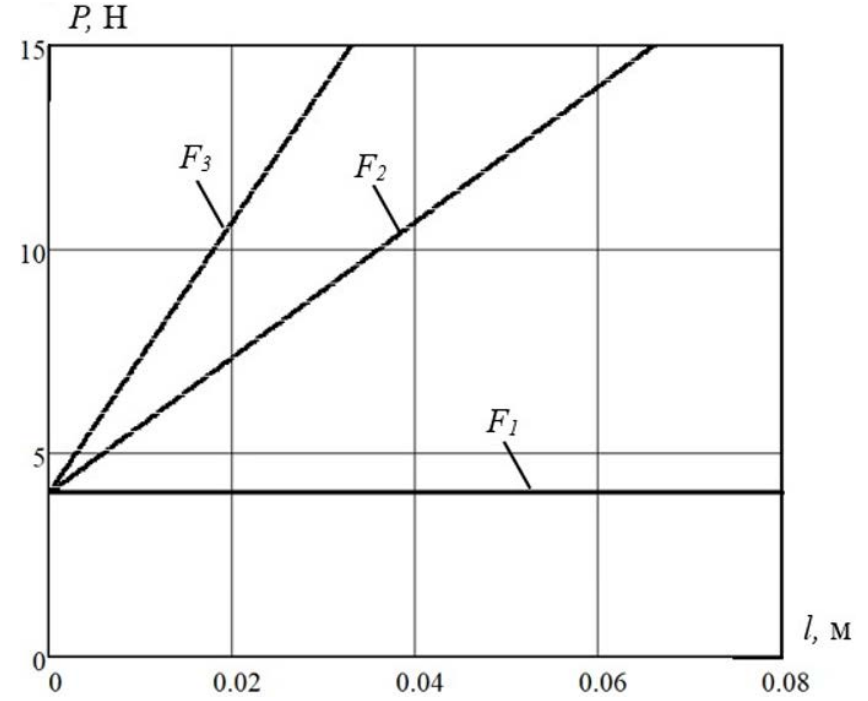


Рисунок 3.10 – Зависимость силы, действующей со стороны привода *P* от *l* (расстояние от силы, действующей со стороны препятствия до стержня)

Определены зависимости силы, действующей со стороны привода P и веса дополнительного груза G от силы сопротивления F. Рассматривается механическая система с параметрами, приведенными в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры механической системы

G_1, Н – вес втулки	3,92
G_2, Н – половина веса привода	2,5
f – коэффициент трения зацепления	0,36
f_1 – коэффициент трения движения	0,1
a, м – расстояние от места крепления привода до середины стержня	0,05
h, м – ширина втулки	0,03
d, м – диаметр стержня	0,03
m, м – расстояние от силы, действующей со стороны препятствия до стержня	0,035
l, м – расстояние от груза до втулки	0,015

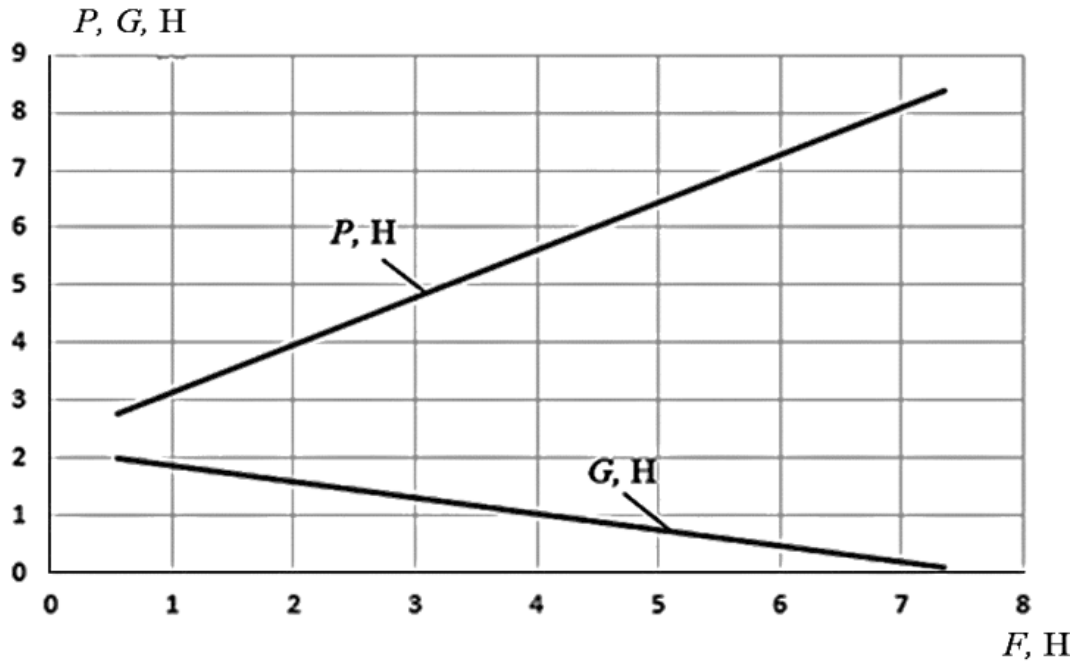


Рисунок 3.11 – Зависимость силы, действующей со стороны привода P и веса дополнительного груза G от силы сопротивления F

Во всех рассмотренных случаях усилия со стороны привода определяются таким образом, чтобы свободная втулка не переходила в режим заклинивания, а заклиненная – в свободный режим. Из зависимостей (рисунок

3.6–3.11) определяется, что наиболее весомыми показателями, влияющими на необходимые создаваемые приводом усилия, являются коэффициенты трения в периферийной и внутренней поверхностях втулки и ширина втулки.

Сила сопротивления, действующая со стороны препятствия или со стороны инструмента, который может быть установлен на втулке для совершения определённой технологической операции, определяется аналитическим методом (рисунок 3.10, 3.11). На нее влияют как массовые, так и геометрические параметры мобильного робота. При проектировании стоит учитывать силы сопротивления для оптимального расположение линейного привода.

3.4.2 Усилия, создаваемые линейным приводом для движения мобильного робота вверх по направляющей, расположенной под наклоном.

Механическая система имеет параметры с параметрами: G_1 = 3,92 Н; G_2 = 6 Н; F = 0 Н; a = 0,065 м; h = 0,03 м; l = 0,032 м; m = 0,063 м; f = 0,16; f_1 = 0,8.

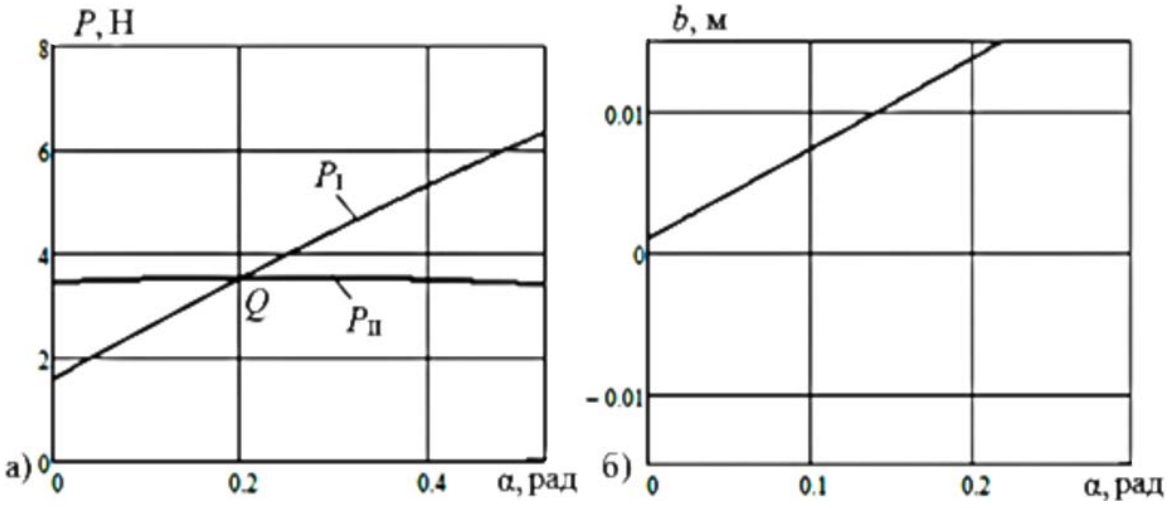


Рисунок 3.12 – а) зависимость силы, действующей со стороны привода P на втулки 1 (P_I) и 2 (P_{II}) от угла наклона направляющей α; б) расстояние от центра втулки до точки действия силы реакции опоры при различном угле наклона направляющей

Из графиков (рисунок 3.12) определяются значения силы *P,* угол наклона направляющей α и расстояние от центра втулки до точки действия силы реакции опоры. Точка пересечения *Q* (рисунок 3.12, а) является единственным решением, при заданных параметрах рассматриваемой системы (свободная втулка не переходит в режим заклинивания, а заклиненная – свободный режим в процессе работы привода).

3.4.3 Усилия, создаваемые линейным приводом для движения мобильного робота вниз по направляющей, расположенной под наклоном

Механическая система имеет следующие параметры: G_1 = 3,92 Н; G_2 = 3 Н; F = 0 Н; a = 0,065 м; h = 0,030 м; d = 0,03 м; l = 0,035 м; m = 0,050 м; f = 0,36; f_1 = 0,36.

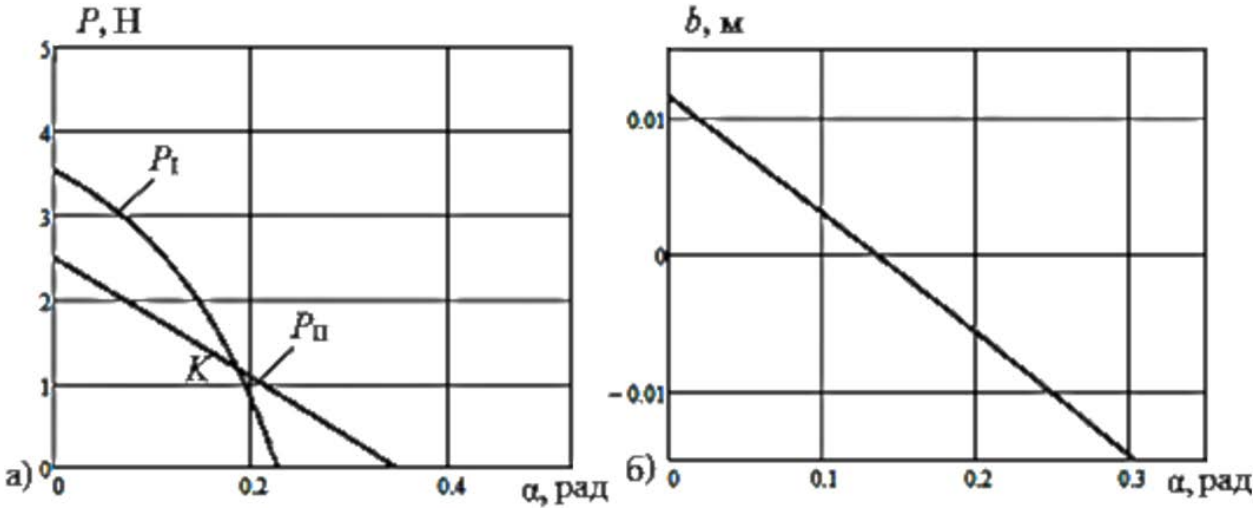


Рисунок 3.13 – а) зависимость силы, действующей со стороны привода *P* на втулки 1 (P_I) и 2 (P_{II}) от угла наклона направляющей α; б) расстояние от центра втулки до точки действия силы реакции опоры при различном угле наклона направляющей

Из рисунка 3.13 определяются значения силы *P*, угол наклона направляющей α и расстояние от центра втулки до точки действия силы реакции опоры. Точка пересечения *K* (рисунок 3.13, а) является единственным решением, при заданных параметрах рассматриваемой системы (свободная

втулка не переходит в режим заклинивания, а заклиненная – свободный режим в процессе работы привода).

3.5 Выводы по третьей главе

Разработаны математическая модель и расчетные схемы, обеспечивающие управляемое перемещение опорных втулок мобильного робота при поступательном движении штока внутреннего актуатора, что обеспечивает заданное программное движение по различно ориентированной в пространстве направляющей.

Представлены уравнения квазистатического движения мобильного робота, перемещающегося по различно ориентированной в пространстве направляющей, за счет периодического заклинивания втулок.

Установлены методы определения усилий, действующих на опорные втулки со стороны штока внутреннего актуатора, для перемещения робота по горизонтальной и расположенной под углом направляющим.

Определена сила, действующая со стороны привода P, и вес дополнительного груза G в зависимости от значения силы сопротивления F для перемещения робота.

Во всех рассмотренных случаях при перемещении по направляющим усилия со стороны привода определяются таким образом, чтобы свободная втулка не переходила в режим заклинивания при работе привода, а заклиненная – в свободный режим. Наиболее весомыми показателями, влияющими на необходимые усилия, создаваемые приводом, являются коэффициенты трения в периферийной и внутренней поверхностях втулки и ширина втулки. Сила сопротивления, действующая со стороны препятствия или со стороны инструмента, который может быть установлен на втулке для совершения определённой технологической операции, определяется аналитическим методом. На нее влияют как массовые, так и геометрические

параметры мобильного робота. При проектировании стоит учитывать силы сопротивления для оптимального расположение линейного привода.

При движении по наклонной направляющей для определения необходимого со стороны линейного привода усилия следует учитывать угол ее наклона и расстояние от центра втулки до точки действия силы реакции опоры.

ГЛАВА 4. Экспериментальные исследования «капсульноподобных» мобильных роботов на плоских и цилиндрических поверхностях

Для верификации параметров математических моделей мобильных роботов с изменяемой конфигурацией голономных связей и проведения экспериментальных исследований были разработаны лабораторные модели:

– мобильного робота с опорными стойками, управляемыми согласованно, и одним внутренним телом, совершающим стационарное вращательное движение вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью;

– мобильного робота, перемещающегося по направляющей за счет управления линейным приводом и периодического заклинивания одной из опорных втулок.

4.1 Методика экспериментальных испытаний мобильных роботов

Согласно национальному стандарту, под мобильным роботом понимается робот, способный перемещаться под своим собственным управлением [110].

Для проведения экспериментов с разработанными мобильными роботами в соответствии с требованиями ГОСТ следует выполнить следующие основные этапы [111]:

1. Подготовка испытательной зоны.

Обеспечить категорию размещения О4 (закрытое помещение с искусственным регулированием климата) – это предписывает поддерживать макроклиматические условия без прямого воздействия внешней среды.

Проверить ровность покрытия пола: отклонения не более ±2 мм/м, чтобы исключить случайное проскальзывание или заклинивание опорных элементов.

2. Стабилизация и мониторинг климатических параметров.

Температура воздуха: 21 ± 1 °C (при среднем 21 °C).

Относительная влажность: 45…80 %.

Атмосферное давление: 84…106,7 кПа.

Перед началом серии тестов выдержать не менее 2 часов (режим стабилизации) для выравнивания всех параметров.

Регистрировать температуру, влажность и давление каждые 5 минут с помощью откалиброванного термогигрометра и манометра.

3. Калибровка и проверка датчиков, приводов и средств измерений [112].

4. Подготовка мобильного робота к тесту.

Установить мобильного робота в начальное положение, выверить начальный угол поворота корпуса робота.

Проверить уровень заряда/напряжение источника питания (220 В ± 10 %, бесперебойный источник подключён).

5. Проведение основных испытаний.

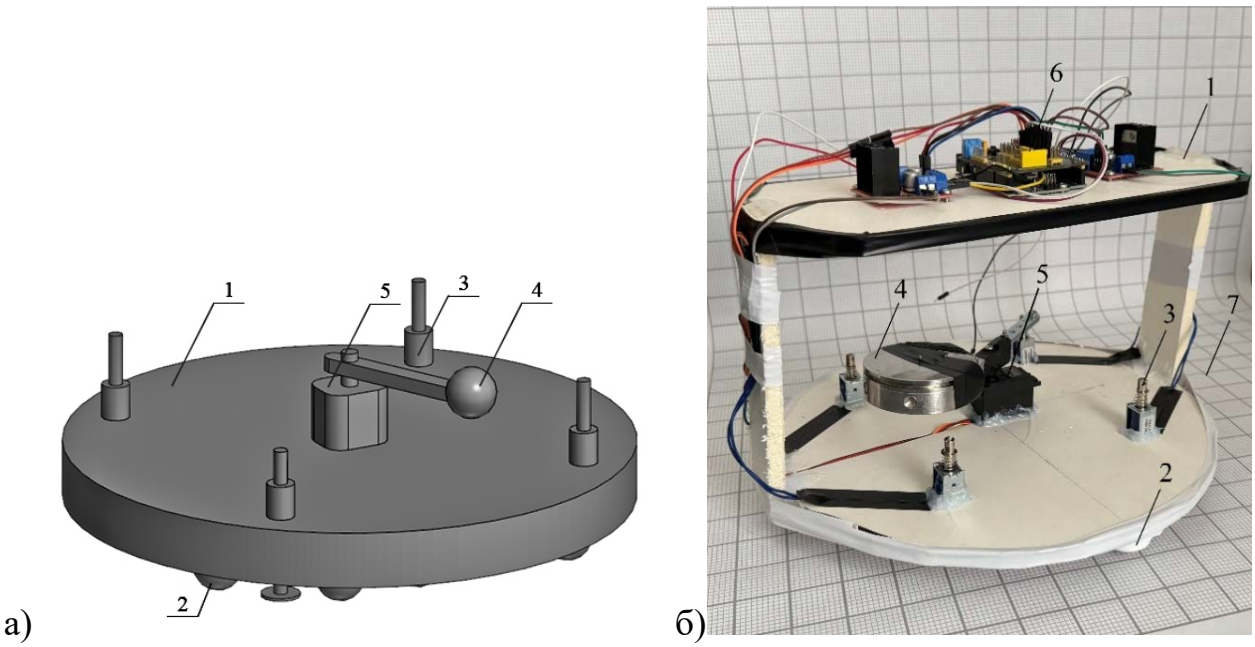
Регистрация перемещения и траектории движения мобильного робота по опорной поверхности. Фиксация отсутствия проскальзывания

6. Обработка и анализ результатов.

Построение графиков траекторий движения геометрического центра мобильного робота.

4.2. Лабораторная модель и экспериментальные исследования мобильного робота с опорными стойками и внутренним телом, совершающим стационарное вращательное движение вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью

На рисунке 4.1 представлен прототип мобильного робота с опорными стойками, дискретно взаимодействующими с поверхностью, и внутренним телом, совершающим стационарное вращательное движение вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью.



а) б)

Рисунок 4.1 – Мобильный робот с опорными стойками и вращающимся внутренним телом: а) 3D – модель; б) лабораторная установка

Конструкция прототипа мобильного робота с вращающимся внутренним телом и опорными стойками, рисунок 4.1, б, включает корпус 1, который опирается на поверхность за счет установленных на его нижней части N шариковых опор 2. Закрепленные на корпусе выдвижные стойки 3 (соленоиды), поочередно вступают в контакт с поверхностью, формируя изменяемую конфигурацию голономных связей. Внутренне тело 4 совершает вращательное движение с постоянной угловой скоростью вокруг вертикальной оси, проходящей через геометрический центр корпуса 1 за счет привода 5 (сервопривод) и формирует приложенную к корпусу 1 силу реакции, приводящую робота в движение. Управление приводами осуществляется за счет блока управления 6 (Arduino UNO).

Проведена серия экспериментов с прототипом мобильного робота, представленным на рисунке 4.1, со следующими массово-геометрическими параметрами: m_1 = 0,5 кг (масса внутреннего тела); m_2 = 0,85 кг (сумма масс корпуса робота, приводов и блока управления; R = 0,3 м (диаметр корпуса робота); r = 0,084 м (длина стержня, на котором закреплено внутреннее тело); b = 0,073 м (расстояние от центра корпуса мобильного робота до опоры).

Корпус робота в начале движения считается неподвижным, что соответствует начальным условиям $\varphi_0 = 0$ рад; $\dot{\varphi}_0 = 0$ рад/с.

Начальное положение робота во всех случаях одинаково (рисунок 4.2). Реализованы движения и построены траектории перемещения геометрического центра корпуса робота в три различные точки: 1) правый нижний угол, рисунок 4.3; 2) правый верхних угол, рисунок 4.4; 3) левый верхний угол, рисунок 4.5.

Определены алгоритмы попеременной смены опорных элементов, соответствующие траекториям, представленным на рисунках 4.3-4.5. Алгоритмы указаны в таблице 4.1.

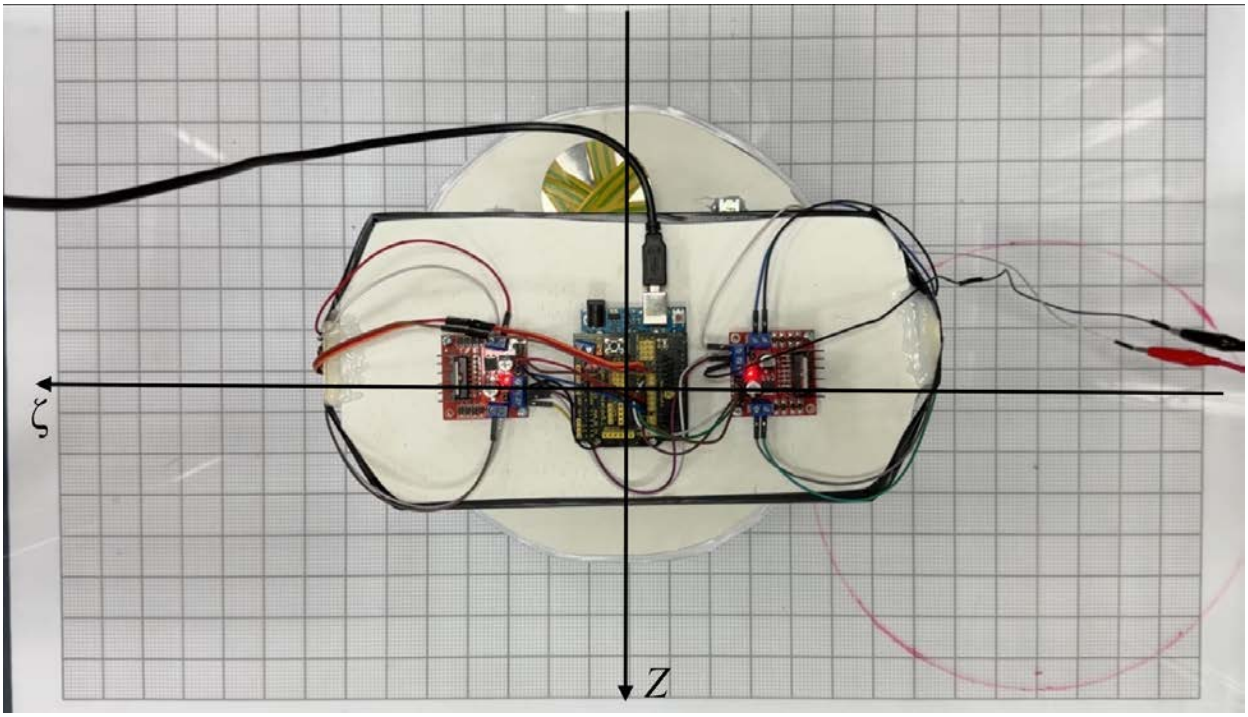


Рисунок 4.2 – Начальное положение мобильного робота с опорными элементами и вращающимся внутренним телом

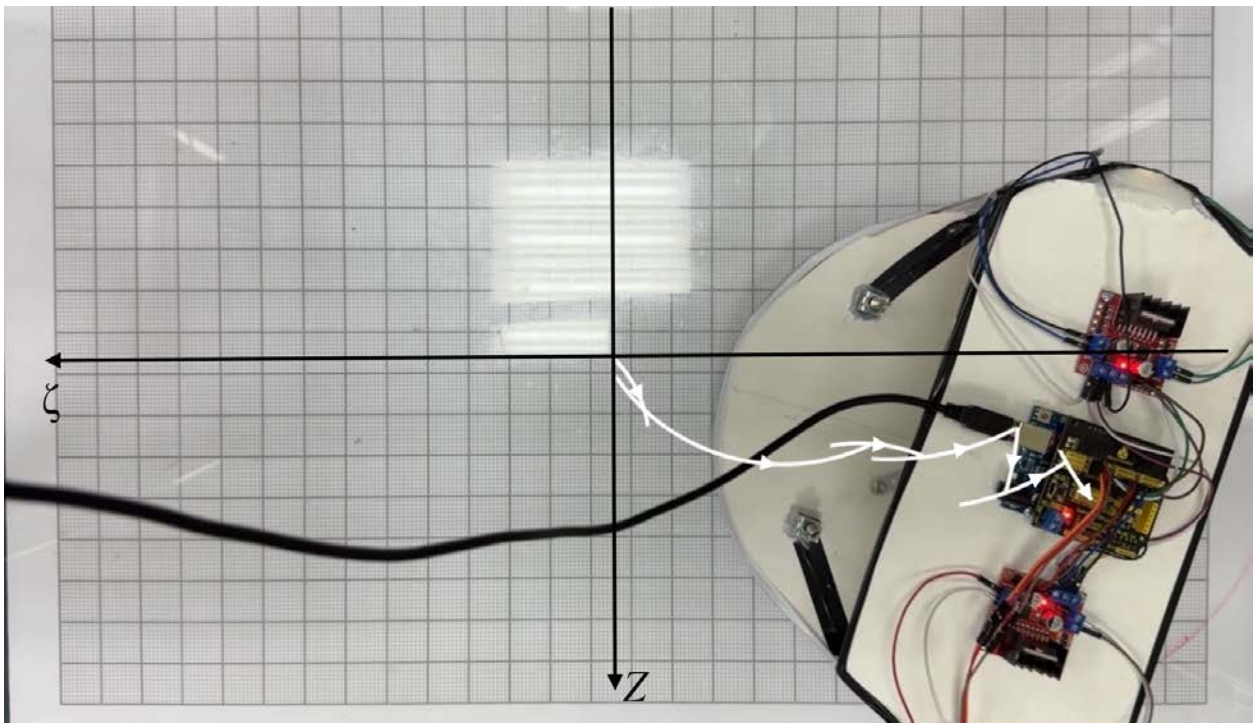


Рисунок 4.3 – Траектория перемещения геометрического центра мобильного робота при его движении в правый нижний угол

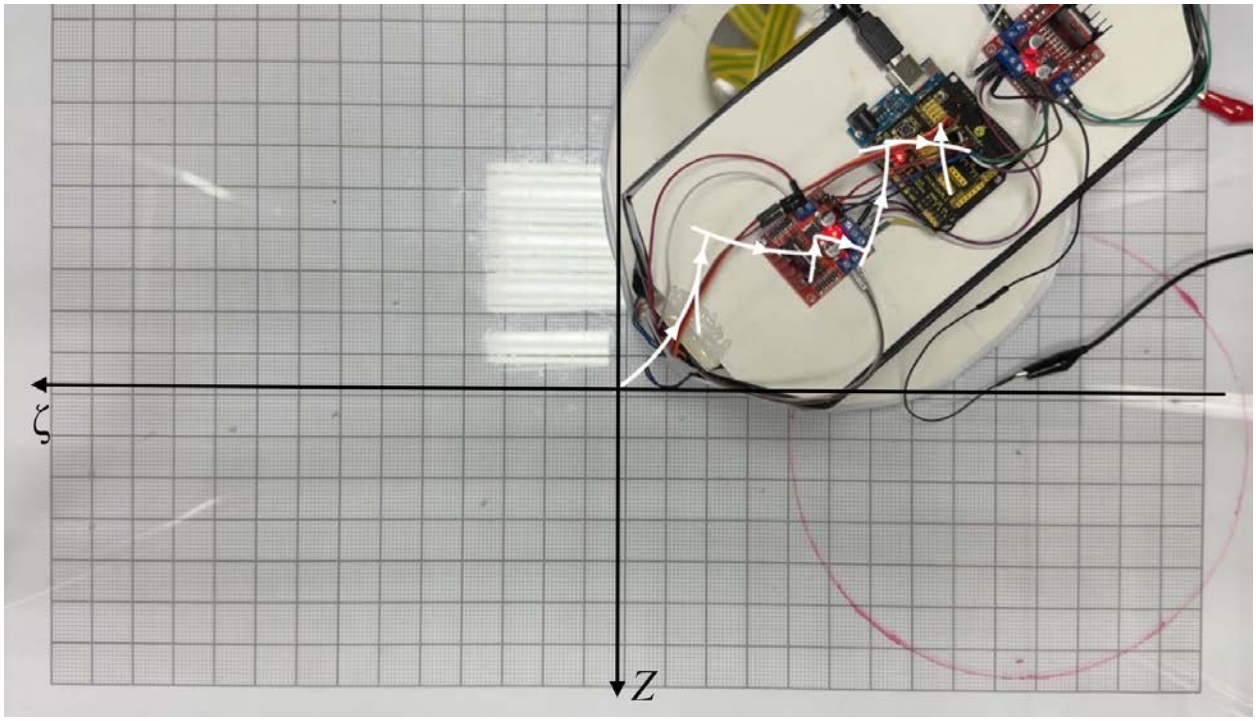


Рисунок 4.4 – Траектория перемещения геометрического центра мобильного робота при его движении в правый верхний угол

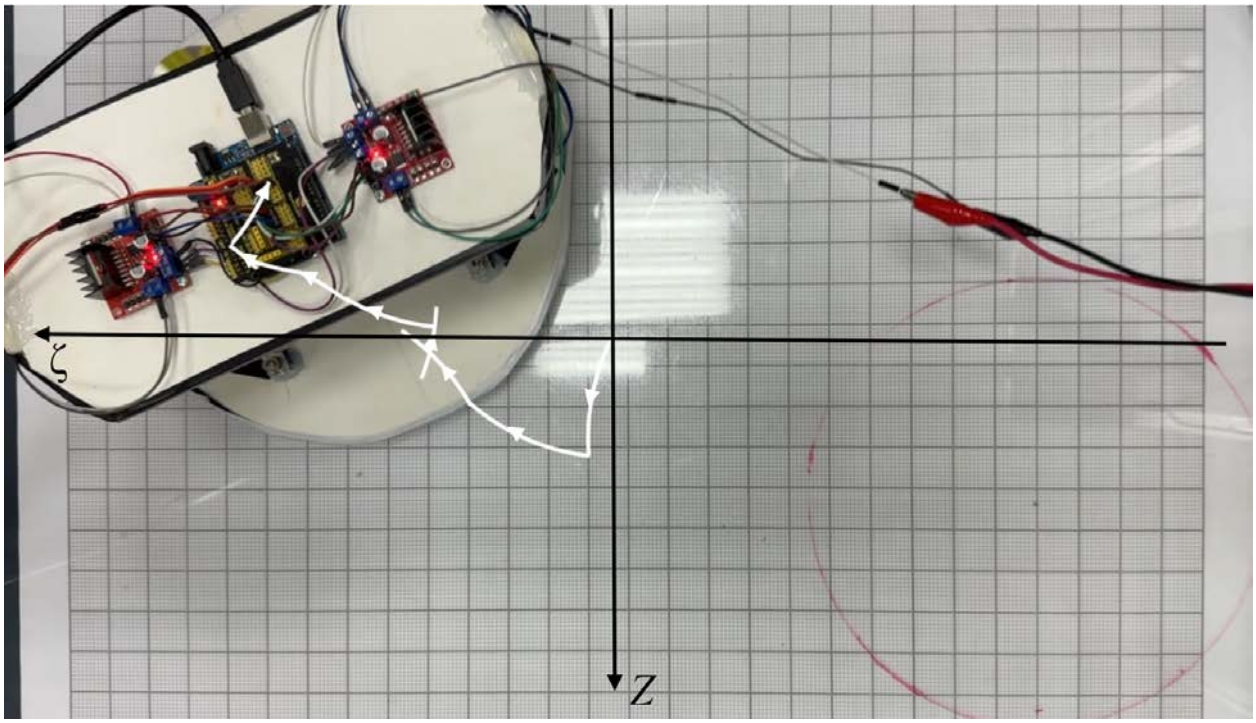


Рисунок 4.5 – Траектория перемещения геометрического центра мобильного робота при его движении в левый верхний угол

Таблица 4.1 – Алгоритм смены опорных стоек

№ опыта	Последовательность смены опорных стоек
1 опыт (рисунок 4.2)	I → III → I → III → II → III → IV
2 опыт (рисунок 4.3)	II → IV → III → II → I → II → III → I → IV
3 опыт (рисунок 4.4)	IV → III → I → II → III → I → III → I → II

Из проведенных экспериментальных исследований определяется, что представленный прототип мобильного робота с вращающимся внутренним телом и опорными стойками способен перемещаться в любом направление. Траектория движения робота носит волнообразный характер и во многом зависит от алгоритма управления сменой опорных стоек.

Выполнено сравнение теоретических и экспериментальных результатов перемещения мобильного робота с опорными стойками и вращающимся внутренним телом при боковом движении корпуса, рисунок 4.6 при следующих параметрах: $\alpha_0 = 1{,}0472$ рад; $\omega = 0{,}5$ рад/с; $b = 0{,}073$ м; $r = 0{,}084$ м; $m_1 = 0{,}5$ кг; $m_2 = 0{,}85$ кг; $l = 0{,}3$ м.

Управление взаимодействием опорных стоек с поверхностью: II опора → все опоры → IV опора → все опоры → II опора → все опоры → IV опора → все опоры → II опора → все опоры → IV опора → все опоры → II опора → все опоры → IV опора.

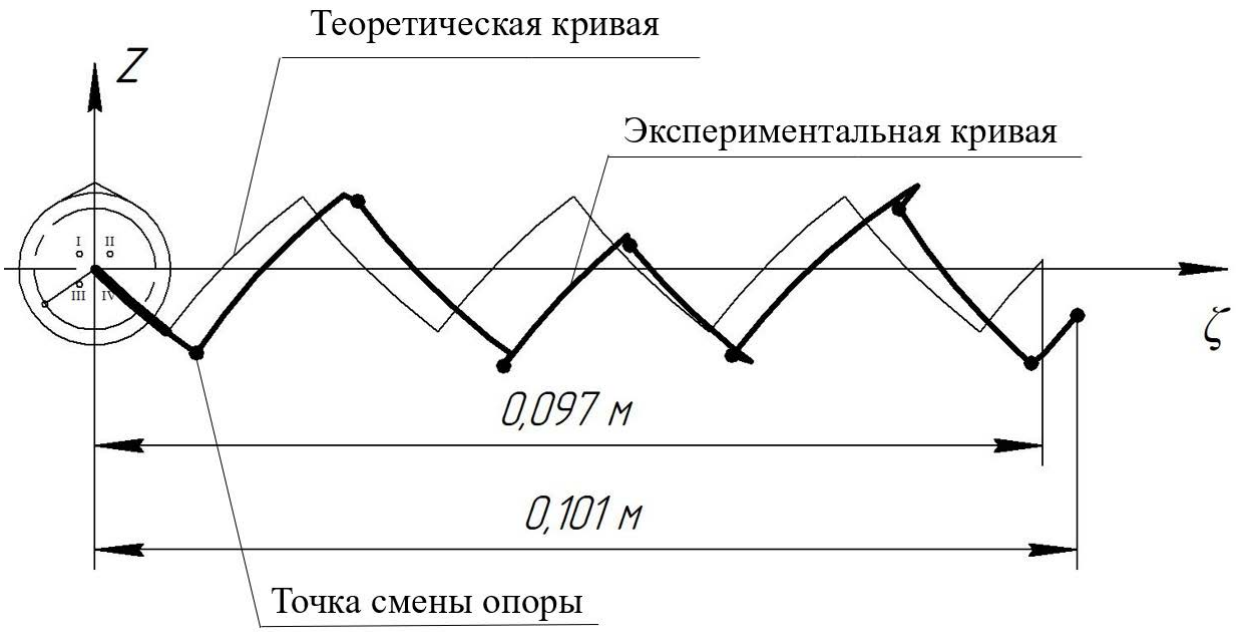


Рисунок 4.6 – Теоретическая и экспериментальная траектории перемещения геометрического центра мобильного робота при его боковом движении

Из рисунка 4.6 определяется, что в экспериментальных исследование смена опор, находящихся во взаимодействии с поверхностью, происходила с небольшим ударом, вследствие чего смещался геометрический центр корпуса мобильного робота.

Проведено сравнение энергозатрат при движении капсульного мобильного робота, рисунок 4.7, и робота с опорными стойками и вращающимся внутренним телом, рисунок 4.1.

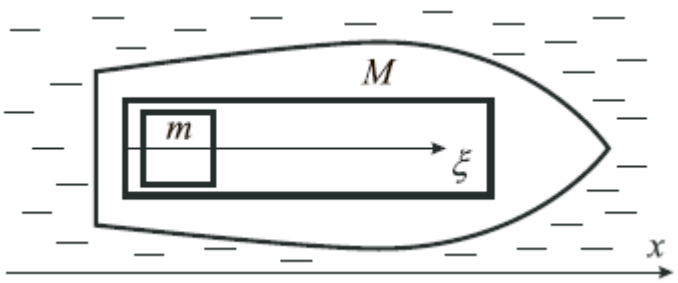


Рисунок 4.7 – Схема капсульного мобильного робота с одним внутренним телом [23]

Энергия, затрачиваемая при движении капсульного мобильного робота:

$$W_1 = \frac{M_{общ} \cdot v_{max} - M_{общ} \cdot v_{min}}{2} \cdot n + fN \cdot L \qquad (4.1)$$

где: $M_{общ} = m + M$ – сумма масс корпуса робота и внутреннего тела; v_{max}, v_{min} – максимальная и минимальная скорости движения корпуса на одном цикле перемещения соответственно; n – количество циклов перемещения робота; f – коэффициент трения между корпусом робота и опорной поверхностью; N – сила реакции опоры; L – расстояние, пройденное роботом.

Энергия, затрачиваемая при движении мобильного робота с опорными стойками и вращающимся внутренним телом:

$$W_2 = \frac{J_a \varphi_{max}^2 - J_a \varphi_{min}^2}{2} \cdot n \qquad (4.2)$$

где: J_a – момент инерции корпуса робота; φ_{max}, φ_{min} – максимальный и минимальный углы поворота корпуса соответственно; n – количество циклов перемещения робота.

Рассматриваются мобильные роботы со следующими параметрами:

а) капсульный мобильный робот: $M_{общ} = 1{,}35$ кг; $v_{max} = 0{,}0115$ м/с, $v_{min} = 0{,}0058$ м/с; $f = 0{,}4$;

б) мобильный робот с опорными стойками и вращающимся внутренним телом: J_a = 0,075 кг·м^2; φ_{max} = 0,195 рад; φ_{min} = 0 рад.

Количество циклов перемещения робота n = 10; расстояние, пройденное роботом L = 0,1 м.

Подставляя значения в (4.1) и (4.2) получаем: W_1 = 0,531 Дж; W_2 = 0,0143 Дж.

Проведённый сравнительный анализ энергоэффективности двух мобильных роботов показал, 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.

4.3. Лабораторная модель и экспериментальные исследования мобильного робота перемещающегося за счет периодического заклинивания опорных элементов

Прототип мобильного робота, перемещающегося по направляющей за счет управления линейным приводом и периодического заклинивания одной из опорных втулок, представлен в двух конструктивный исполнениях, рисунок 4.8-4.9.

На рисунке 4.8 представлен первый вариант конструкции прототипа мобильного робота, перемещающегося за счет периодического заклинивания опорных элементов, который состоит из линейного привода 2, закрепленного шарнирно на втулках 1, и сервопривода 4, поворачивающего стержень с закрепленным дополнительным грузом 3. За счет воздействия привода 2, массы груза 3 и силы трения одна из втулок 1 заклинена на направляющей 5, а другая – находится в свободном состоянии и способна перемещаться по направляющей 5, за счет приложенной к ней силы со стороны линейного привода 2. Система управления мобильного робота 6 состоит из платы Arduino

и драйвера L298N. Необходимое питание составляет 12 Вт. Управление осуществляется при помощи компьютера или Bluetooth модуля.

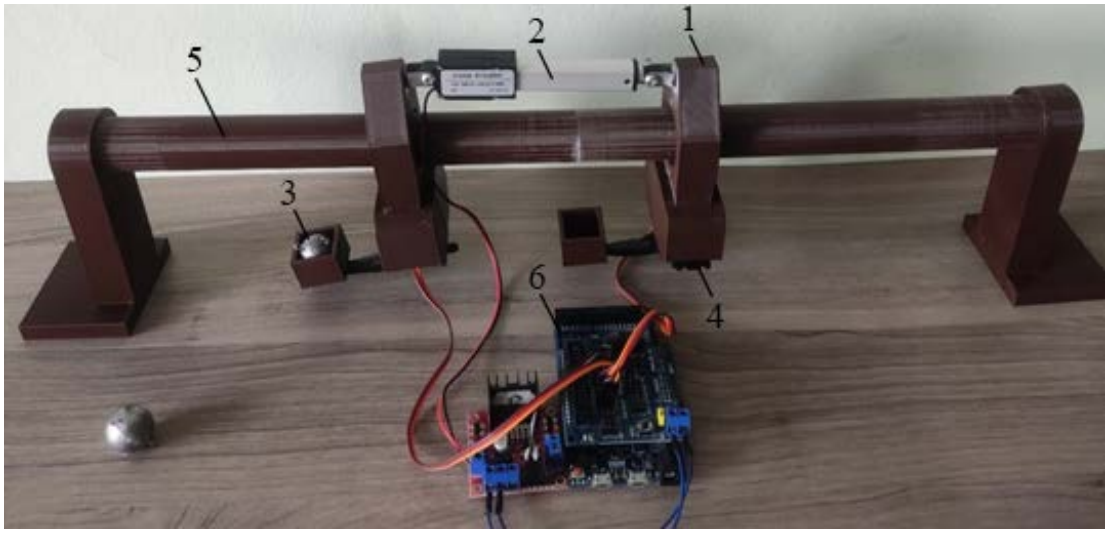


Рисунок 4.8. – Первый вариант исполнения прототипа мобильного робота, перемещающегося за счет периодического заклинивания опорных элементов

Алгоритм последовательного управления приводом курсового движения и приводами изменения положения дополнительных грузов на втулках, обеспечивающими их попеременное заклинивание, выглядит следующим образом:

– левая втулка заклинена и неподвижна, правая втулка начинает движение;

– при выдвижении штока линейного привода на определенную длину правая втулка останавливается;

– дополнительные грузы синхронно меняют положение при выключенном приводе курсового движения, далее правая втулка заклинивается за счет работы привода курсового движения, левая втулка начинает движение, рисунок 4.9;

– когда шток линейного привода полностью втягивается, левая втулка прекращает движение;

– дополнительные грузы синхронно меняют положение при выключенном приводе курсового движения, далее левая втулка заклинивается за счет работы привода курсового движения, правая – свободна;

– цикл повторяется, таким образом происходит движение робота.

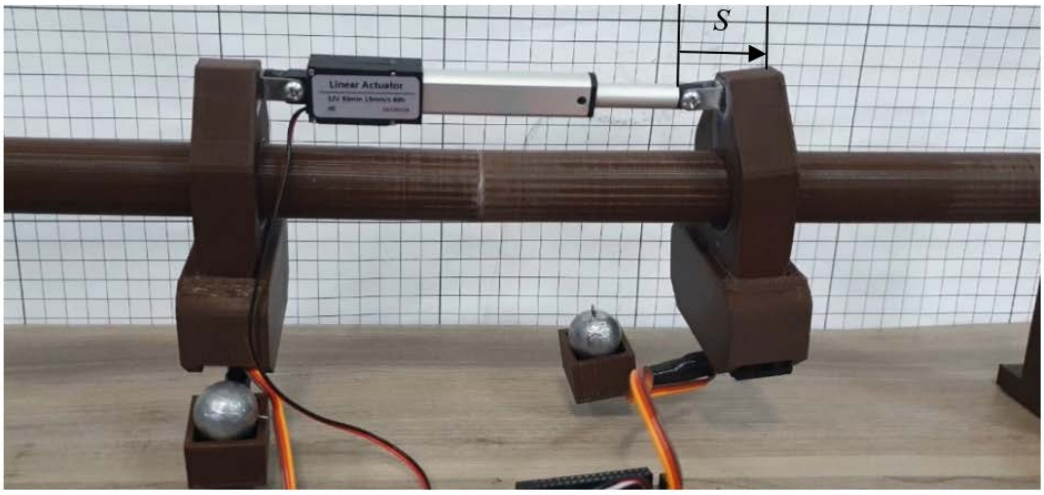


Рисунок 4.9 – Дополнительные грузы синхронно меняют положение при выключенном приводе курсового движения, далее правая втулка заклинивается за счет работы привода курсового движения

Во втором варианте конструкции прототипа мобильного робота, перемещающегося по направляющей за счет управления линейным приводом и периодического заклинивания одной из опорных втулок, рисунок 4.10-4.11, сервоприводы с дополнительными массами заменены двигателями постоянного тока 3, которые соединены с втулками 1 муфтой, а также перемещение одной из втулок осуществляется по направляющим 4. Движение робота происходит за счет совместного воздействия двигателя постоянного тока 3 на одну из втулок 1 и линейного привода 2 на обе втулки 1, для заклинивания одной из них на направляющей 5 и перемещения другой. Корпус мобильного робота 6, а также втулки 1 имеют металлическое исполнении, что существенно увеличивает общую массу, вследствие чего линейный привод 2 подобран с более высоким максимальным усилием. Система управления мобильного робота 6 схожа с предыдущем вариантом исполнения прототипа.

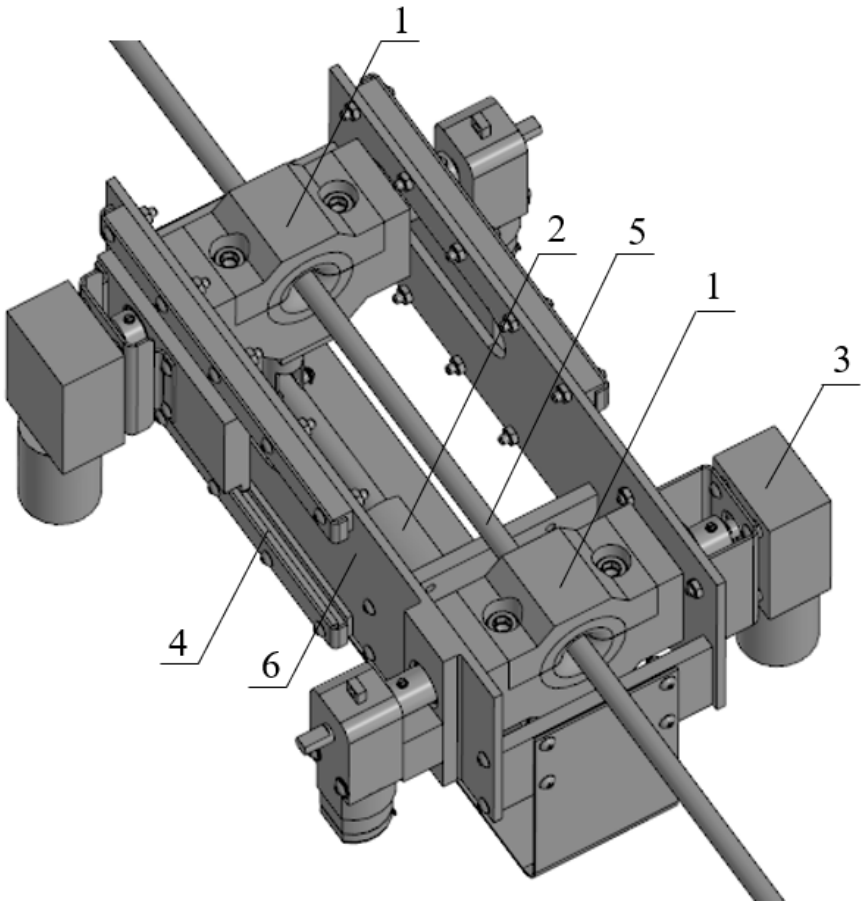


Рисунок 4.10 – 3D-модель второго варианта исполнения мобильного робота, перемещающегося за счет периодического заклинивания опорных элементов

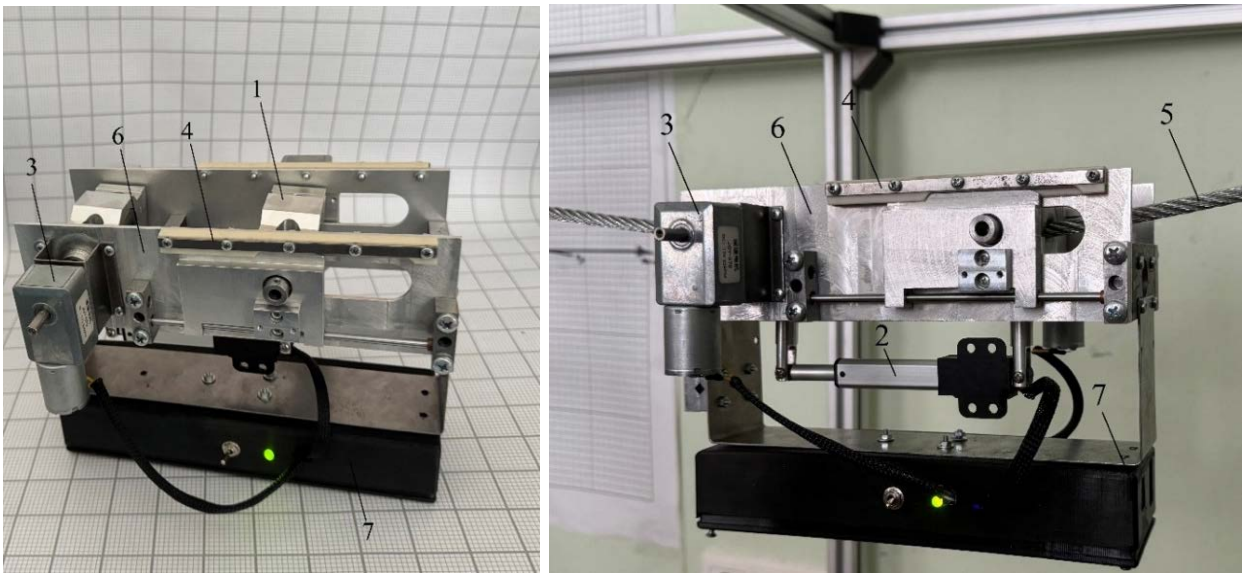


Рисунок 4.11 – Второй вариант исполнения прототипа мобильного робота, перемещающегося за счет периодического заклинивания опорных элементов

Из рисунка 4.12 видно, что мобильный робот, перемещающийся за счет попеременного заклинивания опорных втулок, способен двигаться как в прямом, так и в обратном направлениях.

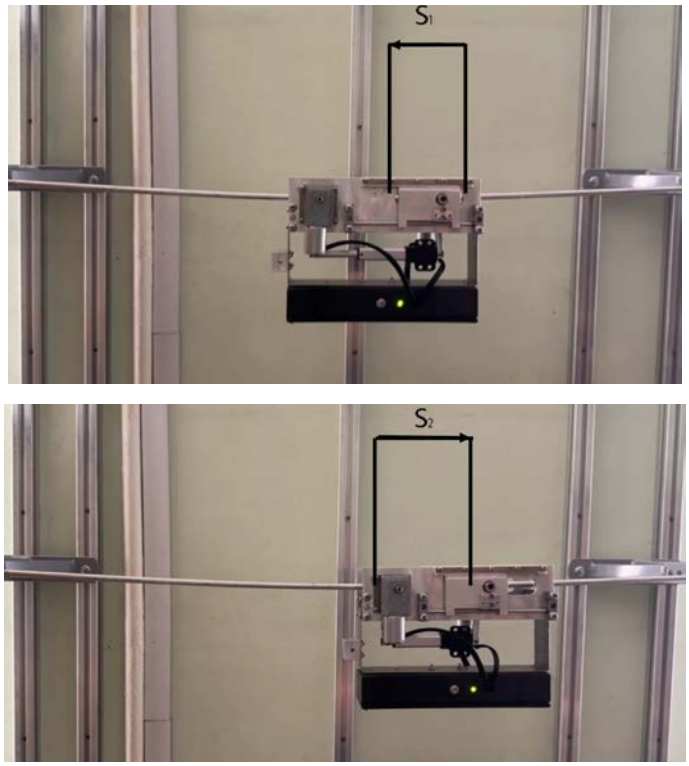


Рисунок 4.12 – Движение мобильного робота, работающего на эффекте периодического заклинивания опорных элементов

Для подтверждения отсутствия проскальзывания опорных элементов при движении робота, работающего на эффекте периодического заклинивания втулок, проведены экспериментальные исследования с прототипом (рисунок 4.11). В ходе каждого из экспериментов было 10 циклов работы линейного привода. Один цикл состоит из выдвижения штока на длину равную 0,01 м, а затем его втягивании на такую же длину, таким образом робот должен продвинуться на длину 0,1 м. Проведена серия экспериментов:

– коэффициенты трения во внутренней f_1 и периферийной зонах f втулки постоянны, а движение робота осуществлялось по горизонтальной и расположенными под углами 5º и 10º направляющим;

– робот движется по горизонтальной направляющей, коэффициент трения во внутренней зоне втулки f_1 постоянен, а коэффициент трения в периферийной зоне f имеет разные значения.

На рисунках 4.13, 4.14 представлены зависимости пройденного роботом расстояния L от количества циклов работы линейного привода nS.

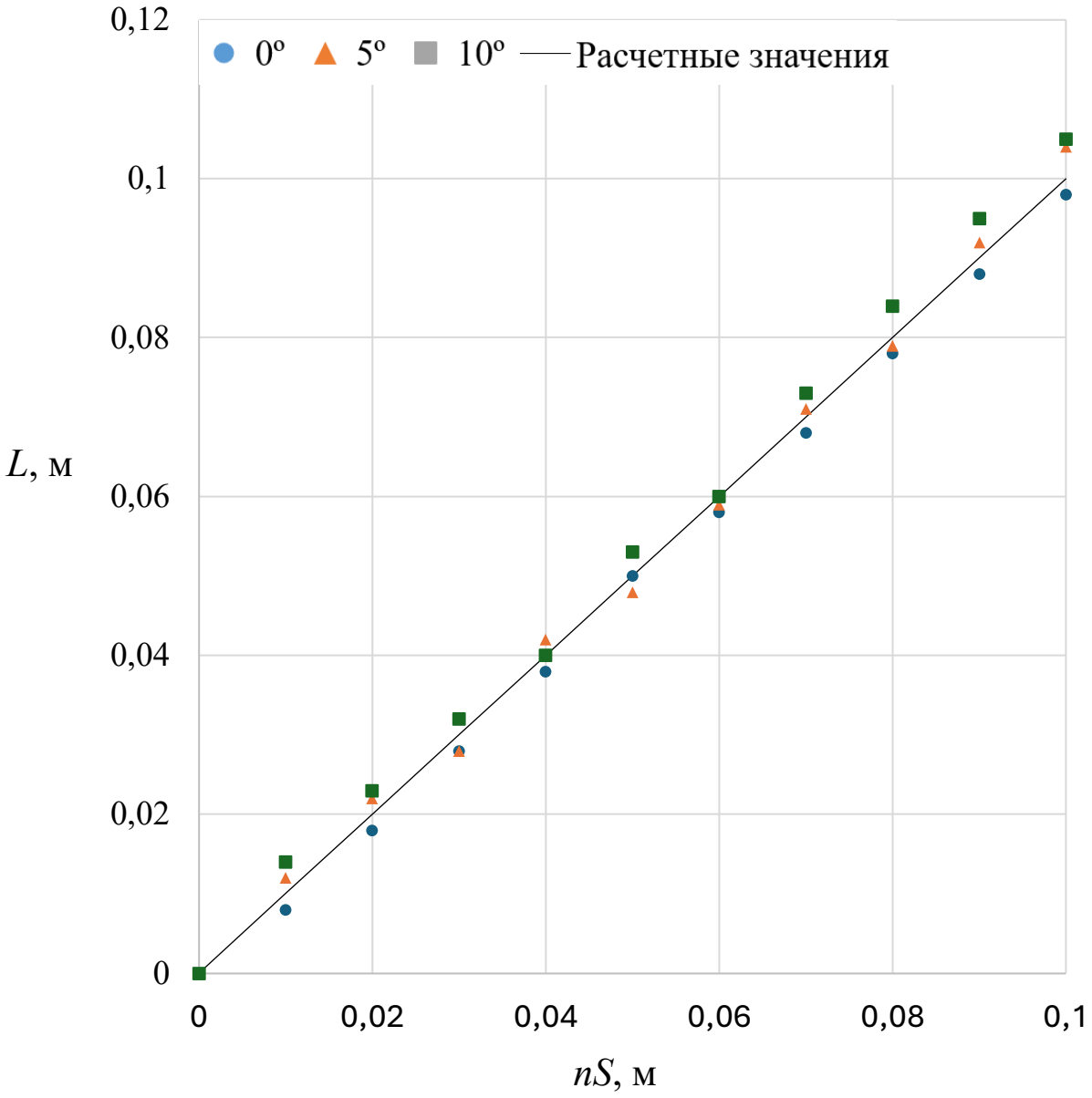


Рисунок 4.13 – Расстояние L, пройденное роботом по горизонтальной и расположенными под углами 5° и 10° направляющим за 10 циклов работы линейного привода nS

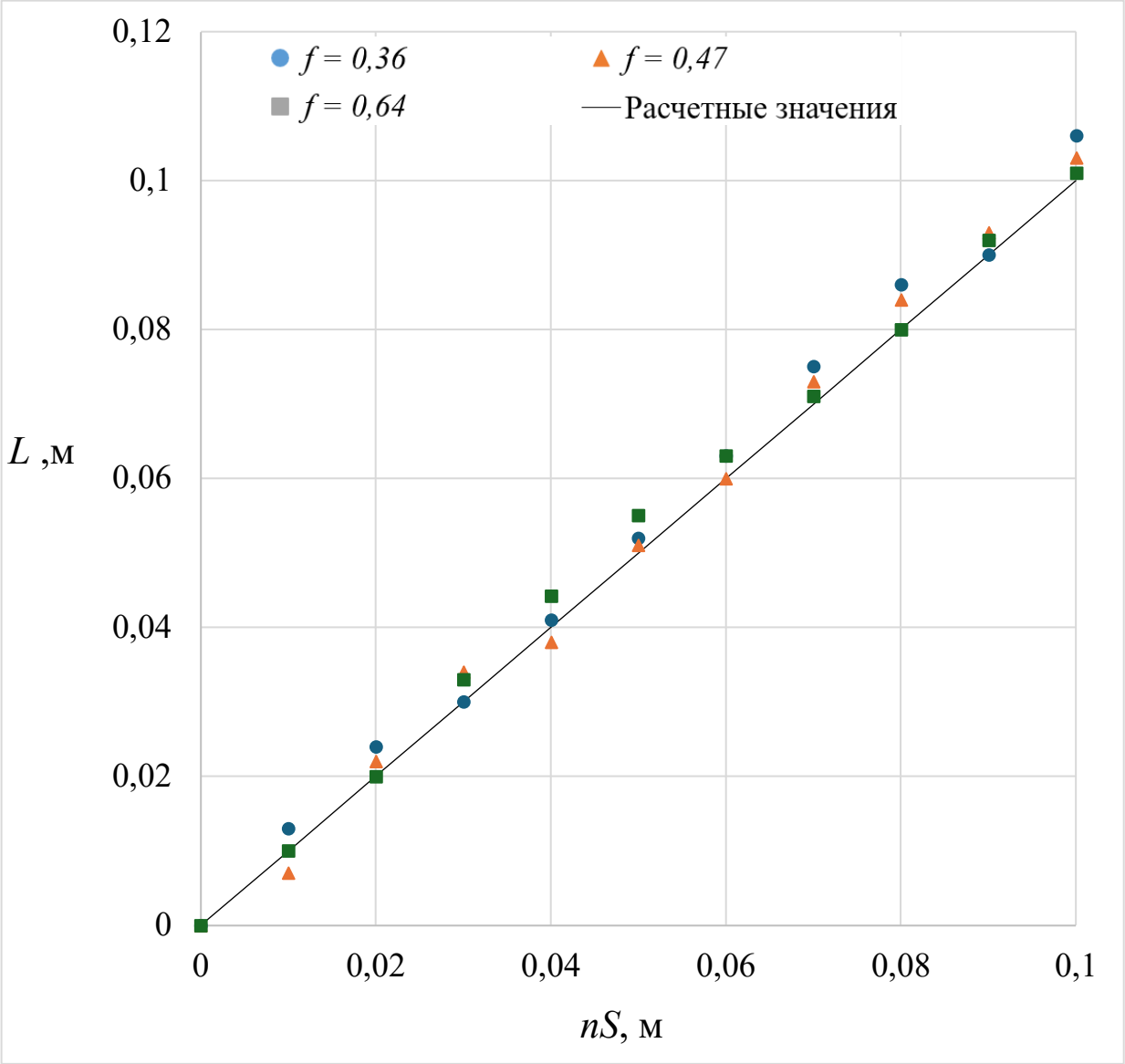


Рисунок 4.14 – Расстояние L, пройденное роботом по горизонтальной направляющей за 10 циклов работы линейного привода nS, при различных значениях коэффициента в периферийной зоне втулки f

Анализ экспериментальных данных (рисунки 4.13 и 4.14) показывает, что за 10 циклов работы линейного привода робот перемещается на расстояние порядка 0,1 м, погрешность, не превышает 7%. Эти результаты подтверждают, что движение мобильного робота, реализуемое за счёт управления линейным приводом и поочередного заклинивания одной из опорных втулок, осуществляется без проскальзывания втулок по направляющей.

4.4 Выводы по четвертой главе

Представлена методика проведения лабораторных испытаний мобильных роботов с изменяемой конфигурацией голономных связей и верифицированы параметры математических моделей.

В результате экспериментальных исследований установлено:

– движения мобильных роботов с изменяемой конфигурацией голономных связей (мобильного робота с опорными стойками, управляемыми согласованно, и одним внутренним телом, совершающим стационарное вращательное движение вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью; мобильного робота с опорными втулками, перемещающегося по направляющей за счет их периодического заклинивания и управления линейным приводом) по плоской и цилиндрической поверхностям происходят с отсутствием проскальзывания.

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

Проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов перемещений мобильного робота с опорными стойками и вращающимся внутренним телом при боковом смещении корпуса. 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.

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.

Экспериментально подтверждено отсутствие проскальзывания опорных втулок мобильного робота, перемещающегося по направляющей за счет их периодического заклинивания и управления линейным приводом.

Представленные мобильные роботы 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны математические модели движения мобильных роботов с управляемым перемещением опорных элементов, как механические системы 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 отсутствие 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 перемещения мобильного робота с опорными втулками, работающими на эффекте периодического заклинивания, по различно ориентированным направляющим.

4. 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:

– движения 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин: Учеб. для втузов. / И. И. Артоболевский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит, 1988. – 640 с.

2. Артоболевский, И. И. Некоторые проблемы создания шагающих машин / И. И. Артоболевский, Н. В. Умнов // Вестн. АН СССР. – 1969. – № 2.– С. 44–51.

3. Охоцимский, Д. Е. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата / Д. Е. Охоцимский, Ю. Ф. Голубев. – М.: Наука. Физматлит, 1984. – 312 с.

4. Лапшин, В. В. Управление движением четырехногого аппарата, перемещающегося рысью, иноходью и галопом / В. В. Лапшин // Известия Академии наук СССР. Механика твердого тела. – 1985. – № 5. – С. 39–45.

5. Лапшин, В. В. Об устойчивости движения шагающих машин / В. В. Лапшин // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – № 6. – С. 319-335.

6. Брискин, Е. С. Об общей динамике и повороте шагающих машин / Е. С. Брискин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1997. – № 6. – С. 33-39.

7. Брискин, Е. С. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми движителями / Е. С. Брискин, В. В. Жога, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов – Москва: Научно-техническое издательство "Машиностроение", 2009. – 191 с.

8. Брискин, Е. С. Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями / Е. С. Брискин, И. П. Вершинина, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 168.

9. Брискин, Е. С. Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога, А. В. Малолетов // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 9. – С. 27-31.

10. Брискин, Е. С. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – № 1(1). – С. 6-14.

11. Briskin. E. S. Development of Rotary Type Movers Discretely Interacting with Supporting Surface and Problems of Control Their Movement / E. C. Брискин, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов, С. С. Фоменко, Я. В. Калинин, А. В. Леонард // ROMANSY 21 – Robot Design, Dynamics and Control: Proceedings of the 21st CISM-IFToMM Symposium (Udine, Italy, June 20-23, 2016) / ed. by V. Parenti-Castelli, W. Schiehlen. – [Switzerland]: Springer International Publishing, 2016. – P. 351-359.

12. Han, Q. A climbing robot with paired claws inspired by gecko locomotion / Q. Han, Ai. Ji, N. Jiang, J Hu, S. Gorb // Robotica. – 2022. – Vol. 40. – P. 1-13.

13. Голубев, Ю. Ф. Управление инсектоморфным роботом при залезании на вершину вертикального угла и при движении по приставной лестнице / Ю. Ф. Голубев, В. В. Корянов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2008. – № 1. – С. 148-157.

14. Арыканцев, В. В. Реверсивный шаговый подъемник заклинивающего типа / В. В. Арыканцев, М. Г. Матвейчук, А. В. Бандурко // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2020. – № 9(244). – С. 7-10.

15. Яцун, С. Ф. Вибрационный мобильный робот для движения по вертикальной ферромагнитной стене / С. Ф. Яцун, А. А. Черепанов // Естественные и технические науки. – 2010. – № 6 (50). – С. 400-401.

16. Щербина, А. Н. Платформа робота вертикального перемещения / А. Н. Щербина, В. А. Зацепин, В. Е. Баранов, А. Г. Леви, С. И. Юрков,

А. Г. Кокорин // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. – 2003. – № 3. – С. 44-48.

17. Градецкий В. Г., Роботы вертикального перемещения / В. Г. Градецкий, М. Ю. Рачков; Рос. акад. наук, Отд-ние проблем машиностроения, механики и процессов упр., Ин-т проблем механики. – М.: ИПМ, 1997. – 223 с.

18. Болотник, Н. Н. Оптимальное управление прямолинейным движением системы двух тел в сопротивляющейся среде / Н. Н. Болотник, Т. Ю. Фигурина, Ф. Л. Черноусько // Прикладная математика и механика. – 2012. – Т. 76, – № 1. – С. 3-22.

19. Блехман, И. И., Вибрационное перемещение / И. И. Блехман, Г. Ю. Джанелидзе // – М.: Наука. 1964. – 410 с.

20. Блехман, И. И. Синхронизация динамических систем / И. И. Блехман. – М.: Наука, 1971. – 896 с

21. Блехман, И. И. Вибрационная механика и вибрационная реология / И. И. Блехман. – М.: Физматлит, 2018. – 751 с.

22. Нагаев, Р. Ф. Периодические режимы вибрационного перемещения / Р. Ф. Нагаев. – М.: Наука, 1978. – 160 с.

23. Черноусько, Ф. Л. Динамика мобильных систем с управляемой конфигурацией / Ф. Л. Черноусько, Н. Н. Болотник. – М.: Физматлит, – 2022.– 464 с

24. Черноусько, Ф. Л. О движении многозвенников по горизонтальной плоскости / Ф. Л. Черноусько // Проблемы нелинейного анализа в инженерных системах. – 2001.– Т. 7. – Вып. 1 (13). – С. 1-10.

25. Черноусько, Ф. Л. Анализ и оптимизация движения тела, управляемого посредством подвижной внутренней массы / Ф. Л. Черноусько // Прикладная математика и механика. 2006. – Т. 70. – Вып. 6. – С. 915-941.

26. Черноусько, Ф. Л. Оптимизация движения в сопротивляющейся среде тела с подвижной внутренней массой / Ф. Л. Черноусько // Труды Института математики и механики УрО РАН. – 2006. – Т. 12. – № 1. – С. 242-248.

27. Черноусько, Ф. Л. Оптимальные периодические движения двухмассовой системы в сопротивляющейся среде / Ф. Л. Черноусько // Прикладная математика и механика. – 2008. – Т. 72. – Вып. 2. – С. 202-215.

28. Черноусько, Ф. Л. Оптимальное перемещение многозвенной системы в среде с сопротивлением / Ф. Л. Черноусько // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2011. – Т. 17. – № 2. – С. 240-255.

29. Черноусько, Ф. Л. Динамика и оптимизация движений мобильных роботов / Ф. Л. Черноусько // Актуальные проблемы механики. 50 лет Институту проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. М.: Наука, – 2015. – С. 34-49.

30. Черноусько, Ф. Л. Управление ориентацией тела при помощи нескольких подвижных масс / Ф. Л. Черноусько // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2020. – Т. 493. – № 1. – С. 70-74.

31. Болотник, Н. Н. Динамика управляемых движений вибрационных систем / Н. Н. Болотник, И. М. Зейдис, К. Циммерман, С. Ф. Яцун. // Изв.РАН. ТиСУ. 2006. – №5. – С. 1-11.

32. Болотник, Н. Н. Капсульный вибрационный робот с электромагнитным приводом и возвратной пружиной: динамика и управление движением / Н. Н. Болотник, А. М. Нунупаров, В. Г. Чащухин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2016. – №. – С. 146-160.

33. Болотник, Н. Н. Оптимальное управление прямолинейным движением твердого тела по шероховатой плоскости посредством перемещения двух внутренних масс / Н. Н. Болотник, Т. Ю. Фигурина // Прикладная математика и механика. – 2008. – Т. 72. – № 2. – С. 216-229.

34. Борисенко, И. Н. О квазистатических движениях системы трех тел на плоскости / И. Н. Борисенко, Т. Ю. Фигурина, Ф. Л. Черноусько // Прикладная математика и механика. – 2014. – Т. 78. – № 3. – С. 316-327.

35. Борисов, А. В. Управление движением трехосного эллипсоида в жидкости с помощью роторов / А. В. Борисов, Е. В. Ветчанин, А. А. Килин // Математические заметки. – 2017. – Т. 102. – Вып. 4. – С. 503-513.

36. Мартыненко, Ю. Г. Устойчивость стационарных движений мобильного робота с роликонесущими колесами и смещенным центром масс / Ю. Г. Мартыненко // Прикладная математика и механика. – 2010. – Т. 74, № 4.– С. 610-619.

37. Лапшин, В. В. Модельные оценки энергозатрат шагающего аппарата / В. В. Лапшин // Известия АН СССР. МТТ. – 1993. – № 1. – С.38-43.

38. Брискин, Е. С. Специальные проблемы мобильной робототехники / Е. С. Брискин; – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет. – 2020. – 60 с.

39. Васильев, А. В. Исследование и разработка транспортной системы малогабаритного мобильного робота для передвижения в среде с макропрепятствиями: специальность 05.02.02 "Машиноведение, системы приводов и детали машин": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Васильев Андрей Викторович, – 2021. – 222 с.

40. Thrun, S. Probabilistic Robotics. / S. Thrun, W. Burgard, D. Fox // The MIT Press, 2005. – P. 672.

41. Васильев, А. В. Разработка компьютерной динамической модели и исследование прямолинейного движения транспортной системы малогабаритного мобильного робота / А. В. Васильев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – № 19(5). – С. 312-326.

42. Taheri, H. Omnidirectional mobile robots, mechanisms and navigation approaches / H. Taheri, C. Zhao// Mechanism and Machine Theory. – 2020. – Vol. 153. – DOI. 10.1016/J.MECHMACHTHEORY.2020.103958.

43. Han, K.-L. Design and control of omni-directional mobile robot for Mobile Haptic Interface. / K.-L. Han, O. K. Choi, I. Lee, I. Hwang, J. S. Lee, S. Choi // 2008 International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul, Korea (South). – 2008. – P. 1290-1295.

44. Li, H. Design and Implementation of Omnidirectional Mobile Robot for Materials Handling among Multiple Workstations in Manufacturing Factories /

H. Li, J. Liu, Ch. Lyu, D. Liu, Yi. Liu // Electronics. – 2023. – 12(22). – 4693. – DOI 10.3390/ELECTRONICS12224693

45. Борисов, А. В. Тележка с омниколесами на плоскости и сфере / А. В. Борисов, А. А. Килин, И. С. Мамаев // Нелинейная динамика. – 2011. – Т. 7. – № 4. – С.785-801.

46. Караваев, Ю. Л. Динамика сфероробота с внутренней омниколесной платформой / Ю. Л. Караваев, А. А. Килин // Нелинейная динамика. – 2015. – Т. 11. – № 1. – С. 187-204.

47. Li, X. Motion Control of an Omnidirectional Mobile Robot / X. Li, A. Zell // In: Filipe, J., Cetto, J.A., Ferrier, JL. (eds) Informatics in Control, Automation and Robotics. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg. – 2009. – Vol. 24. – P. 181-193.

48. Шаронов, Н. Г. Исследование показателей профильной проходимости шагающей машины с цикловыми движителями / Н. Г. Шаронов, А. П. Кириллов, А. В. Малолетов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2020. – № 9(244). – С. 89-93.

49. Bruzzone, L. Functional Design of a Hybrid Leg-Wheel-Track Ground Mobile Robot / L. Bruzzone, M. Baggetta, Sh. Nodehi, P. Bilancia, P. Fanghella // Machines – 2021. – 9. 10. – DOI 10.3390/MACHINES9010010.

50. Quaglia, G. EPI.Q mobile robots family / G. Quaglia, L. Bruzzone, R. Oderio, R. P. Razzoli// In Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2011, Denver, CO, USA, 11–17 November 2011; – Vol. 7, – P. 1165–1172.

51. Бордюгов, Д. В. 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.

52. Фоменко, С. С. Автоматизация методов преодоления препятствия мобильным роботом с секционным движителем / С.С. Фоменко, Д.В. Бордюгов // Известия ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – № 9 (232). – С. 72-75.

53. Al Mahmud, S. Advancements and Challenges in Mobile Robot Navigation: A Comprehensive Review of Algorithms and Potential for Self-Learning Approaches / S. Al Mahmud, A. Kamarulariffin, A. M. Ibrahim et al. // J Intell Robot Syst. – 2024. –110. – 120. – DOI 0.1007/S10846-024-02149-5.

54. Loganathan, A. A systematic review on recent advances in autonomous mobile robot navigation / A. Loganathan, N. Ahmad // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2023. – Vol. 40(2). – DOI 10.1016/J.JESTCH.2023.101343.

55. Брискин, Е. С. Основы расчета и проектирования шагающих машин с цикловыми движителями / Е. С. Брискин, В. В. Жога, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов. – Москва: Издательство «Машиностроение-1», 2006. – 163 с.

56. Лепетухин, К. Ю. О критериях оптимизации движения секций дождевальной машины кругового действия при обработке полей сложной формы / К. Ю. Лепетухин, А. В. Малолетов, Е. С. Брискин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2018. – № 8(218). – С. 117-121.

57. Брискин, Е. С. Об определении допустимых параметров движителей шагающих роботов / Е. С. Брискин, В. А. Серов, С. С. Фоменко [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – Т. 16, № 6. – С. 369-372.

58. Bordyugov, D. V. The Motion Control Research of the Mobile Robot with Vibrating Propulsion Device Which Discretely Interacting with the Sup-porting Surface / D. V. Bordyugov, E. S. Briskin, N. G. Sharonov // Lecture Notes in Networks and Systems. – Japan, 2022. – Vol. 324. – P. 421-427.

59. Брискин, Е. С. Проблемы управления движением мобильных роботов с движителями, 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.

60. Ганиев, Р. Ф. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и их приложения в современной технике / Р. Ф. Ганиев, В. А. Глазунов // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 459. – № 4. – С. 428.

61. Крейнин, Г. В. Кинематика, динамика и точность механизмов: Справочник / Г. В. Крейнина. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.

62. Boston Dynamics: Atlas. – URL: https://bostondynamics.com/atlas/ (дата обращения: 05.12.2024).

63. Raibert, M. BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot / M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, R. Playter // IFAC Proceedings Volumes. – 2008. – Vol. 41. – I. 2. – P. 10822-10825

64. Exploring the Role of «BigDog» Robots in Military Support. – URL: https://miltechsphere.com/details-6725000-exploring-the-role-of-bigdog-robots-in-military-support.html/ (дата обращения: 05.12.2024).

65. Чернышев, В. В. МАК-1 – подводный шагающий робот / В. В. Чернышев, В. В. Арыканцев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2(7). – С. 45-50.

66. Чернышев, В.В. Полевые исследования тягово-сцепных свойств и проходимости шагающих машин на слабых и экологически ранимых грунтах / В.В. Чернышев //Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. науч. тр. междунар. науч. – техн. конф. «Лес-2001» /Брянск. гос. инженер. – технолог. акад. и др. – Брянск, 2001. – № 4. – С.116-118.

67. Брискин, Е. С. Шагающая машина "Восьминог" / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 5. – С. 48-49.

68. Брискин, Е. С. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч. 2. Динамика движения шагающих машин серии "Восьминог" / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 6. – С. 19-26.

69. Чернышев, В. В. Особенности взаимодействия опорных элементов шагающих машин с водонасыщенными почвогрунтами / В. В. Чернышев, В. В.

Арыканцев, Я. В. Калинин, Н. Г. Шаронов // Орошаемое земледелие. – 2023. – № 3(42). – С. 33-37.

70. Брискин, Е. С. Отработка методов нечеткого управления шагающим роботом "Ортоног" в полевых условиях / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, Н. Г. Шаронов [и др.] // Исследования наукограда. – 2013. – № 2(4). – С. 43-48.

71. Брискин, Е. С. Об управлении адаптацией ортогональных шагающих движителей к опорной поверхности / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин, А. В. Малолетов [и др.] // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2017. – № 3. – С. 184-190.

72. Черноусько, Ф. Л. О движении тела, содержащего подвижную внутреннюю массу / Ф. Л. Черноусько // Доклады Академии Наук. – 2005. – Т. 405, № 1. – С. 56-60.

73. Черноусько, Ф. Л. Анализ и оптимизация движения тела, управляемого посредством подвижной внутренней массы / Ф. Л. Черноусько // Прикладная математика и механика. – 2006. – Т. 70, № 6. – С. 819-842.

74. Черноусько, Ф. Л. Плоские движения тела, управляемого при помощи подвижной массы / Ф. Л. Черноусько // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2020. – Т. 494, № 1. – С. 69-74.

75. Черноусько, Ф. Л. Методы управления нелинейными механическими системами. / Ф. Л. Черноусько, И. М. Ананьевский, С. А. Решмин //. М.: Физматлит, 2006. – 328 с.

76. Болотник, Н. Н. Оптимальное управление перемещением системы двух взаимодействующих тел вдоль горизонтальной прямой с сухим трением / Н. Н. Болотник, Т. Ю. Фигурина // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019, Москва, 17–20 июня 2019 года / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 791-795.

77. Черноусько, Ф. Л. Оптимальное прямолинейное движение двухмассовой системы / Ф. Л. Черноусько // Прикладная математика и механика. – 2002. – Т. 66. – № 1. – С. 3-9.

78. Килин, А. А. Управление движением твердого тела в жидкости с помощью двух подвижных масс / А. А. Килин, Е. В. Ветчанин // Нелинейная динамика. – 2015. – Т. 11. – № 4. – С. 633-645.

79. Ветчанин, Е. В. Свободное и управляемое движение в жидкости тела с подвижной внутренней массой при наличии циркуляции вокруг тела / Е. В. Ветчанин, А. А. Килин // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 466. – № 3. – С. 293-297.

80. Ветчанин, Е. В. Моделирование управления движением в вязкой жидкости тела с переменной геометрией масс / Е. В. Ветчанин, В. А. Тененев, // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. – Т. 3. – № 4. – С.371-381.

81. Cao, Q. Robotic wireless capsule endoscopy: recent advances and upcoming technologies / Q. Cao, R. Deng, Y. Pan et al. // Nat Commun. – 2024. – 15. – Article number: 4597. – DOI 10.1038/S41467-024-49019-0.

82. Болотник, Н. Н. Новые задачи динамики и управления для локомоционных систем без внешних движителей / Н. Н. Болотник, Ф. Л. Черноусько // Аналитическая механика, устойчивость и управление: Труды XI Международной Четаевской конференции, посвященной 115-летию со дня рождения Н.Г. Четаева и памяти академика АН РТ Т.К. Сиразетдинова, Казань, 13–17 июня 2017 года. – Казань: Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева. – 2017. – С. 28-39.

83. Zimmermann, K. Dynamics of a two-module vibration-driven system moving along a rough horizontal plane / K. Zimmermann, I. Zeidis, M. Pivovarov, N. Bolotnik // Multibody System Dynamics. – 2009. – Vol. 22. – No. 2. – P. 199-219.

84. Liu, Y. Optimization of the vibro-impact capsule system / Y. Liu, S. Islam, E. Pavlouskaya, M. Wiercigroc // J. Mech. Eng. – 2016. – Vol. 62. – P. 430-439.

85. Liu, Y. Vibro-impact responses of capsule system with various friction models / Y. Liu, E. Pavlouskaia, D. Hendry, M. Wiercigroch // International Journal of Mechanical Sciences. – 2013. – Vol. 72. – P. 39-54.

86. Liu, Y. Experimental verification of the vibro-impact capsule model / Y. Liu, E. Paulouskaya, M. Wiercigroch // Nonlinear Dynamics. – 2016. – Vol. 83.– P. 1029-1041.

87. Блехман, И. И. Вибрационная механика / И. И. Блехман. – Москва: Наука: Изд. фирма "Физ.-мат. лит.", 1994. – 394 с.

88. Sitti, M. Biomedical Applications of Untethered Mobile Milli/Microrobots. /M. Sitti // Proceedings of the IEEE. – 2015. – Vol. 103. – № 2.– P. 205-224.

89. Song, Li. Motion Control of Capsule Robot Based on Adaptive Magnetic Levitation Using Electromagnetic Coil / Li. Song, Y. Dai, W. Luyao, W. Zhang, Yi. Ji, Yu. Cao, J. Wei, F. Wang, J. Zhong, J. Yang, L. Feng // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – 2022. – P. 1-12. – DOI 10.1109/TASE.2022.3201966.

90. Градецкий, В. Г. Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред / В. Г. Градецкий, М. М. Князьков // Экстремальная робототехника. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 24-38.

91. Parker, R. Robotics in forestry / Richard Parker, Karen Bayne, Peter Clinton // New Zealand Journal of Forestry. – 2016. – № 60(4). – P. 8-14.

92. Bordyugov, D. V. 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.

93. Патент на промышленный образец № 138501 Российская Федерация. Робот-мойщик: № 2023500411: заявл. 01.02.2023: опубл. 25.09.2023 / Ш. Ли.

94. Косморобот: // ГНЦ РФ ЦНИИ РТК. – URL: https://rtc.ru/solution/kosmorobot/ (дата обращения: 05.12.2024).

95. Yatsun, S. F. Vibrating mobile robot for movement along a vertical ferromagnetic wall / S. F. Yatsun, A.A. Cherepanov // Natural and Technical Sciences. – 2010. – № 6 (50). – P. 400-401.

96. Bordyugov, D. V. 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, ICR 2024. – Cham (Switzerland): Springer Nature Switzerland AG, 2024. – P. 293-305.

97. Rachkov, M. Climbing robots with adaptive grippers for construction / M. Rachkov, V. Gradetsky, M. Knyazkov // Construction Research Congress 2005: Broadening Perspectives - Proceedings of the Congress, 05–07 апреля 2005 года / sponsors: ASCE, Construction Institute, CI, IAARC, Lean Construction Institute, University of California, Berkely: PoPSyCal; editors: Tommelein I.D., University of California, Berkely, Berkely, CA, United States. – San Diego, CA. – 2005. – P. 383-392.

98. Yoshida, Y. Design of a wall-climbing robot with passive suction cups / Y. Yoshida, S. Ma // 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Tianjin, China. – 2010. – P. 1513-1518.

99. Prados, C. MoCLORA – An Architecture for Legged-and-Climbing Modular Bio-Inspired Robotic Organism / C. Prados, M. Hernando, E. Gambao, A. Brunete // Biomimetics. – 2023 – 8(1). – 11. – DOI 10.3390/BIOMIMETICS8010011.

100. Miyake, T. Vacuum-based wet adhesion system for wall climbing Robots-Lubricating action and seal action by the liquid / T. Miyake, H. Ishihara, T. Tomino // 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Bangkok, Thailand. – 2009. – P. 1824-1829.

101. Zhu, J. Review of advancements in wall climbing robot techniques / J. Zhu, Y. Zhu, P. Zhang// Franklin Open. – 2024. – Vol. 8(12). – Article number: 100148. – DOI 10.1016/J.FRAOPE.2024.100148.

102. Lin, C.-Y. Multi-Locomotion Design and Implementation of Transverse Ledge Brachiation Robot Inspired by Sport Climbing / C.-Y. Lin, J.-M. Lee // Biomimetics. – 2023. – 8(2). – 204. – DOI 10.3390/BIOMIMETICS8020204.

103. Аверьянов, Е. В. Исследование мобильного робота вертикального перемещения на основе пневмопривода с многоступенчатым торможением / Е. В. Аверьянов, С. А. Арфикян, В. Г. Градецкий, А. Е. Чередникова // Автоматизация. Современные технологии. – 2015. – № 9. – С. 3-7.

104. Richard, P. L. LineRanger: Analysis and Field Testing of an Innovative Robot for Efficient Assessment of Bundled High-Voltage Powerlines / P. L. Richard // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2019. – P. 9130-9136.

105. Rebecca, M. Power line robotic device for overhead line inspection and maintenance / M. Rebecca, A. Farshid, J. Mohammadpour Velni // Industrial Robot: An International Journal. – 2016. – 44(1). – P. 75-84.

106. Nicolas, P. LineScout Technology Opens the Way to Robotic Inspection and Maintenance of High-Voltage Power Lines. / P. Nicolas, R. Pierre-Luc, S. Montambault // Power and Energy Technology Systems Journal. – 2015. – P. 1. – DOI 10.1109/JPETS.2015.2395388.

107. Schmidt, D. Climbing Robots for Maintenance and Inspection of Vertical Structures – A Survey of Design Aspects and Technologies / D. Schmidt, K. Berns // Robotics and Autonomous Systems. – 2013. – Vol. 61. – P. 1288–1305.

108. Yu, L. Inspection Robots in Oil and Gas Industry: a Review of Current Solutions and Future Trends / L. Yu, E. Yang, P. Ren, C. Luo, G. Gu, D. Dobie, X. Yan, // 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC), Lancaster, UK. – 2019. – P. 1-6. – DOI 10.23919/ICONAC.2019.8895089.

109. Focchi, M. CLIO: a Novel Robotic Solution for Exploration and Rescue Missions in Hostile Mountain Environments / M. Focchi et al.// 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), London, United Kingdom. – 2023, – P. 7742-7748.

110. ГОСТ Р 60.0.0.4-2019/ИСО 8373:2012 "Роботы и робототехнические усройства" от 01.09.2019.

111. ГОСТ 15150-69 "Машины, приборы и другие технические изделия" от 01.01.1971.

112. ГОСТ Р 8.563-2009 "Роботы Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений" от 15.04.2010.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Справка о внедрении результатов диссертационной работы

ИНЖТЕХКРАН
Инженерно-консультационный Центр

Общество с Ограниченной Ответственностью
Инженерно-консультационный центр "ИНЖТЕХКРАН"
400005 Волгоградская область г.о. город-герой Волгоград г Волгоград пр-кт им. В.И. Ленина д. 86 офис 303
ИНН 3444026013 КПП 345901001 ОКПО 22453191 ОГРН 1023403449035
Филиал «Центральный» Банк ВТБ (ПАО) г. Москва
Расч./сч 40702810506180001885 кор./сч 30101810145250000411 БИК 044525411
Тел. 8 (8442) 98-39-53 e-mail: ingtehkran@mail.ru

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Результатов научно-исследовательской деятельности

Внедрение результатов научно-исследовательской работы, выполненной Бордюговым Д.В. в рамках диссертационной работы на тему «Управление движением опорных элементов мобильных роботов с изменяемой внутренней конфигурацией», проведено в сотрудничестве с коллективом кафедры «Динамика и прочность машин» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». Работы проводились в период с ноября 2024 по май 2025 гг.

Разработанные алгоритмы управления используются при создании прототипа мобильного робота с опорными элементами для проведения тестовых испытаний на специализированной площадке, имитирующей условия технических каналов и трубопроводов, а также на плоских и наклонных металлических поверхностях.

Практическое применение разработанных алгоритмов управления, которые реализуются в составе мобильного робота для инспекции труднодоступных участков инженерных коммуникаций - труб, опор и балок предположительно позволят обеспечить высокую точность технологических операций благодаря позиционированию робота с отклонением не более 1,2 мм, а также расширить область выполнения робот на цилиндрических поверхностях.

Директор В.М. Колесниченко