

На правах рукописи



Рядчиков Игорь Викторович

**МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВУНОГИМИ ШАГАЮЩИМИ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ
НЕБИОНИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

доктора технических наук

Рязань – 2020

Работа выполнена в научно-образовательном центре «Технологии мира» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Научный

консультант: **Никульчев Евгений Витальевич**, д. т. н., профессор, профессор кафедры управления и моделирования систем, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва

Официальные оппоненты

Дивеев Асхат Ибрагимович, д. т. н., профессор, главный научный сотрудник федерального исследовательского центра «Информатика и Управление» Российской академии наук, г. Москва

Корсун Олег Николаевич, д. т. н., профессор, начальник лаборатории 37 федерального государственного унитарного предприятия «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», г. Москва

Ковшов Евгений Евгеньевич, д. т. н., профессор, начальник Научно-инженерной и образовательной лаборатории цифровых компьютерных систем и автоматизации акционерного общества «НИКИМТ-Атомстрой», г. Москва

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Защита диссертации состоится «3» июня 2020 года в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.211.01 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» (ФГБОУ ВО «РГРТУ») по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1**

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на сайте <http://rsreu.ru>.

Автореферат разослан « » _____ 2020 года.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.211.01

д. т. н., доцент



Александр Викторович
Прузцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Двухногие шагающие роботы — одно из развивающихся направлений разработки и исследований в мировой робототехнике. Особенность двухногой ходьбы заключается в том, что шаг робота сопровождается переносом центра масс при перемещении свободной ноги, при этом в каждый момент времени движение конструкции в целом должно быть устойчивым. Управление ходьбой робота должно обеспечивать различные режимы движения в широком диапазоне характеристик поверхностей: наклонная плоскость, ступени, препятствия переменной высоты, влажная поверхность, неровности ландшафта, нежесткая поверхность.

При разработке антропоморфных роботов проектируются схемы, берущие за основу скелеты людей или животных. Способы передвижения конструируются за счет воссоздания коленного, тазобедренного сустава с помощью сервоприводов. Инструменты управления искусственными суставами, таким образом, являются объектом систем управления. Тем не менее, физиологически бионическое перемещение осуществляется не только за счет управления суставами, но и с мышечной системой, в процессе задействованы центральная и вегетативная нервная системы, сердечно-сосудистая система, что определяет при реализации бионических принципов наличие большого количества дополнительных устройств, датчиков и, соответственно, высокую сложность систем. Также имеют место значительные затраты, сильно превышающие допустимые для области практического применения и приемлемую стоимость изготовления.

Для планирования устойчивой ходьбы двухногого робота широко применяется метод точки нулевого момента (Zero Moment Point, ZMP). Однако метод не может быть эффективно использован в системах управления шагающих роботов в реальном времени [Caballero, Armada], что вызвано нелинейностями моделей и вычислительной сложностью задач управления [Takanishi и др., Yamaguchi и др.]. Более современным подходом является метод гибридной нулевой динамики (Hybrid Zero Dynamics, HZD). Основной идеей HZD является задание виртуальных ограничений для создания предельного цикла в пространстве состояний робота. Практическим недостатком HZD являются высокие требования к точности измерения характеристик системы при возникновении нелинейных эффектов.

Одним из разработанных небионических технических подходов к стабилизации мобильных конструкций является использование гиродинов или маховиков, широко применяемых в задачах обеспечения боковой устойчивости автомобилей, мотоциклов; в авиации; при стабилизации судов при морском волнении; при ориентировании и стабилизации искусственных спутников и пр.

Таким образом, диссертация посвящена решению актуальных задач разработки проблемно-ориентированных методов моделирования и управления для стабилизации двухногих шагающих роботов за счет разработки небионических мехатронных стабилизирующих модулей, обеспечивающих заданные требования к качеству управления.

Степень разработанности темы. Несмотря на значительный исторический период существования и развития мобильных роботизированных технических систем главной задачей остается разработка систем стабилизации для поддержания устойчивости при перемещении в соответствии с заданными критериями эффективности. Надежные результаты в этой области были получены в последние десятилетия. Существуют разработки, выделяющие в конструкциях самостабилизирующиеся платформы, например, оснащенной датчиками положения и ускорения [Xiao Xuan, Wang Chen, Quin Ziyu]. Известно использование набора искусственных мускулов на ногах шагающей конструкции (робот Athlete [Niiyama]). Получение информации о положении и состоянии робота может осуществляться с помощью контактных датчиков и тензорезисторов на ногах изделия (робот BigDog компании Boston Dynamics, разработки М. Н. Магомедова). Отдельным направлением исследований является разработка телеоператорных роботов, управляемых человеком удаленно (SAR-400 НПО «Андроидная техника»).

Идея использования небионической стабилизации базируется на успешном опыте применения мехатронных устройств для стабилизации в различных технических приложениях, таких как система предотвращения переворачивания больших транспортных средств с помощью маховика [Yoshihiro, Junhoi, Masahiko]; система ориентирования космических аппаратов; система гироскопической стабилизации для судна [Adams, McKenney, Shenoi, Townsend, Коноплин, Филаретов и др.].

Применение маховиков в качестве основы системы стабилизации роботов реализовано также в робототехнической системе Cubli [Gajamohan и др.]. Однако в системах, развивающих идеи Cubli, не проработаны вопросы моделирования и использования иных небионических принципов стабилизации роботов, как и не проработаны вопросы применения стабилизации маховиками именно шагающих роботов.

Цель диссертационного исследования: разработка методов управления двуногими шагающими робототехническими системами на основе решения задач стабилизации с использованием небионических мехатронных конструкций.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. Аналитический обзор систем автоматического управления шагающими робототехническими системами.

2. Формирование формализованных способов оценки и критериев эффективности функционирования двуногих шагающих робототехнических систем на основе стабилизации с использованием небионических мехатронных конструкций.

3. Разработка метода небионической стабилизации проблемно-ориентированной системы управления шагающих робототехнических конструкций.

4. Стабилизация системы в условиях системной ошибки, вызванной ошибкой датчика положения, либо нелинейностями, вызванными износом механических деталей конструкции, либо изменением центра масс и момента инерции в процессе функционирования.

5. Синтез управления и исследование условий и ограничений стабилизации шагающего робота с помощью гиродина.

6. Применение интеллектуальных методов для разработки проблемно-ориентированных систем управления в технических системах с использованием метода небионической стабилизации.

8. Имитационное моделирование системы стабилизации шагающего робота.

9. Применение методов и алгоритмов моделирования и повышения эффективности функционирования двуногих шагающих робототехнических систем на основе решения задач стабилизации с использованием небионических мехатронных конструкций.

10. Анализ результатов.

Объект исследования: системы и критерии эффективности управления динамически-сложными техническими системами.

Предмет исследования: методы моделирования и управления в задачах стабилизации двуногих шагающих роботов с использованием небионических мехатронных систем.

Методы исследования: использованы методы системного анализа, математической теории управления, мехатроники, аналитической механики, интеллектуального анализа данных, численных методов.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в разработке методов управления двуногими шагающими робототехническими системами на основе решения задач стабилизации с использованием небионических мехатронных конструкций, в том числе:

1) разработан метод небионической стабилизации мехатронными устройствами (маховиками, гиродинами) двуногих шагающих робототехнических систем на основе линеаризованных моделей, обеспечивающий заданные требования к перемещению, маневренности, энергоэффективности и быстродействию;

2) разработана методика моделирования и оценки эффективности небионической стабилизации двуногих шагающих робототехнических систем, использующая в качестве критерия эффективности значения угла отклонения конструкции от положения равновесия, при котором обеспечивается управление в заданных конструктивных особенностях;

3) разработан метод наблюдения корректного положения равновесия при наличии постоянного смещения при ходьбе с небионической стабилизацией на основе вспомогательного мехатронного устройства в условиях системной ошибки, вызванной ошибкой датчика положения либо нелинейностями, вызванными износом механических деталей конструкции, либо изменением центра масс и момента инерции в процессе функционирования;

4) разработаны методики проектирования систем управления исполнительными механизмами при небионической стабилизации на основе интеллектуальных методов;

5) разработана методика имитационного моделирования в условиях ограничений на изменение параметров, обеспечивающих требуемое качество управления, определяемое маневренностью робототехнической системы.

Достоверность и обоснованность научных результатов и рекомендаций, приведенных в диссертационной работе, основаны на корректном использовании математической теории управления, теории дифференциальных уравнений, аналитической механики, на использовании вычислительно надежных методов, на экспериментальном исследовании на стендах и опытных образцах, а также основана на апробации и обсуждении результатов на международных научных конференциях и семинарах, рецензировании, подтверждается экспертизой научных статей, опубликованных в ведущих научных изданиях.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Внедрение. Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» в рамках преподавания дисциплины «Введение в робототехнику».

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России по государственному заданию № 8.2321.2017/ПЧ «Разработка и адаптация систем управления компенсацией динамических отклоняющих воздействий на мобильные объекты, находящиеся в состоянии динамического равновесия». Результаты работы внедрены в ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», ФГУП Экспериментальный завод научного приборостроения со Специальным конструкторским бюро РАН, АО «Концерн «Калашников», ООО «НЕЙРОЛАБ», ООО «ТСВК», ОАО «766 УПТК», что подтверждается актами, приведенными в приложении 3 диссертации.

Соответствие паспорту специальности 05.13.01. Диссертация направлена на разработку методов решения задач анализа, моделирования, создания контура управления с небионическими стабилизирующими устройствами, обеспечивающими повышение эффективности функционирования объектов исследования — управляемых мобильных робототехнических конструкций, что соответствует формуле специальности 05.13.01. Область исследования соответствует пп.: «3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»; «9. Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов»; «10. Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах».

Апробация результатов и публикации. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на более 30 международных и всероссийских конференциях и семинарах, выставках и салонах:

- 26, 28 международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника», (2015, 2017, Санкт-Петербург);
- 47st, 50th International Symposium On Robotics (ISR 2016, ISR 2018), (2016, 2018, Мюнхен, Германия);
- 6th, 7th Seminar on Industrial Control Systems: Analysis, Modeling and Computation, (2016, 2017, Москва);

- Workshop on Contemporary Materials and Technologies in the Aviation Industry, (МАИ, 2016, 2017, 2018, 2019 гг., Москва);
 - ICPE 2017 International Conference on Psychology and Education, 08-09 июня, 2017, ПИ РАО, Москва;
 - XII Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли, 24-31 мая 2018 г., Алушта;
 - 13th International Symposium on Intelligent Systems, INTELS 2018, (22-24 октября, 2018, ЛЭТИ, Санкт-Петербург);
 - 8th IFAC Symposium on Mechatronic Systems (MECHATRONICS 2019) and the 11th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS 2019), (4-6 сентября 2019, Вена, Австрия);
 - XIV международная конференция по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения» (17-20 апреля, 2019, ЮЗГУ, Курск);
 - XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (17-20 июня, 2019, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, Москва);
- на других конференциях, выставках семинарах.

Результаты работы, внедрены в робототехнические конструкции, отмеченные на международных выставках и салонах дипломами и медалями.

Положения, выносимые на защиту.

1. Разработка проблемно-ориентированной системы управления и метода небионической стабилизации мехатронными устройствами (маховиками, гироскопами) двуногих шагающих робототехнических систем на основе линеаризованных моделей. Использование метода обеспечивает вычислительно-надежное решение задач управляемости, устойчивости, синтеза линейно-квадратичных и ПИД-регуляторов. Экспериментально на ряде конструкций подтверждено, что метод небионической стабилизации эффективно удовлетворяет заданным требованиям к перемещению, маневренности, энергоэффективности и быстрдействию. Для систем, стабилизируемых по методу небионической стабилизации, достигается значение Cost of Transportation (CoT) 1,0021.

2. Методика моделирования и оценки эффективности функционирования небионической стабилизации двуногих шагающих робототехнических систем, использующая в качестве критерия эффективности значения угла отклонения от положения равновесия, при котором обеспечивается управление в заданных конструктивных особенностях. Применение введенного критерия позволяет производить оценку различных вариантов реализаций систем управления и решать задачи синтеза управления, обеспечивающие требования к типу и форме ходьбы, такие как высота преодоления препятствий, скорость передвижения, угол поворота. Использование угла отклонения от положения равновесия в качестве единственного критерия эффективности понижает размерность фазового пространства робототехнической системы, с 7 координат до 1, обеспечивает высокую скорость синтеза систем управления и надежность полученных решений, достигается удешевление стоимости конструкции робототехнической системы за счет отказа от датчиков контакта с поверхностью.

3. Метод оценки смещения положения равновесия при ходьбе с небионической стабилизацией на основе вспомогательного мехатронного устройства в условиях системной ошибки, вызванной ошибкой датчика положения либо нелинейностями, вызванными износом механических деталей конструкции. Применение данного метода позволяет отказаться от учета нелинейных явлений при синтезе управления, а также обеспечить надежность управления в условиях износа робототехнической системы. Шумовая составляющая сигнала в обратной связи, вызываемая численным дифференцированием сигнала, уменьшена до нуля.

4. Методики проектирования систем управления исполнительными механизмами при небионической стабилизации на основе интеллектуальных методов. Направленный поиск коэффициентов регуляторов на основе генетических алгоритмов с разработанной в исследовании фитнес-функцией, использующей введенный критерий эффективности (п. 2), обеспечивает решение задачи синтеза управления небионической стабилизацией за 50 итераций генетического алгоритма. Применение адаптивных нейро-нечетких регуляторов обеспечивает гладкость первой и второй производной вектора управления сервомоторами в суставах робототехнической системы, для обучения искусственной нейронной сети регулятора по разработанной методике достаточно 3 эпох с получением величины ошибки обучения на контрольных данных.

5. Методика имитационного моделирования в условиях ограничений на изменение параметров, обеспечивающих требуемое качество управления, определяемое маневренностью робототехнической системы, позволяющая проводить оценку влияния принятых модельных допущений на качество функционирования и быстродействия отдельных узлов и различных вариантов интеграции шагающих конструкций. Использование методики имитационного моделирования позволяет сократить количество исследуемых вариантов проектирования узлов робототехнической системы за счет ограничений на изменение параметров для обеспечения требуемого качества управления. Срок разработки стабилизированных систем исследуемого типа сокращается в несколько раз.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 41 работе, из них 28 — в изданиях, включенных в перечень рецензируемых журналов, рекомендованных ВАК, имеется 5 свидетельств о регистрации РИД.

Личный вклад соискателя в получение результатов, изложенных в диссертации. Все результаты и положения, составляющие основные результаты, выносимые на защиту, получены автором. В работах без соавторов [1, 6] изложен метод небионической стабилизации шагающих роботов на основе мехатронных устройств. В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад Рядчикова И.В. состоит в выборе критерия эффективности систем стабилизации шагающих роботов [5, 15], в разработке теоретических основ небионической стабилизации, включающих методику моделирования и оценки эффективности функционирования небионической стабилизации двуногих шагающих робототехнических систем, определяющую условия синтеза управления [9, 14, 17, 27, 28, 29, 32, 33, 34, 40, 41]; в методе оценки смещения положения равнове-

сия при ходьбе с небιονической стабилизацией на основе вспомогательного мехатронного устройства в условиях системной ошибки датчика угла [2, 12, 13]; в методике синтеза управления шагающей конструкцией с помощью гиродина [3, 18]; в интеллектуальных методиках синтеза управления [4, 7, 20, 22, 37]; в методиках исследования численных решений и имитационного моделирования систем управления [8, 10, 11, 16, 21, 35, 36], в методах обработки информации в реализации систем управления [19, 23, 24, 25, 26, 30, 31, 38, 39]. Автор лично формулировал постановку целей и задач исследования и лично принимал участие в разработке и апробации систем управления шагающими роботами. Все результаты доведены до практической реализации на экспериментальных стендах и промышленных образцах шагающих роботов, что потребовало привлечения инженеров, конструкторов, материаловедов, специалистов по вычислительной математике, являющихся соавторами публикаций, внесших вклад в реализацию конструкций роботов, что не является предметом рассмотрения специальности 05.13.01 и не относится к защищаемым положениям.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, списка основных терминов, 8 глав, глоссария, списка использованной литературы из 194 наименований, 4 приложений. Общий объем работы составляет 318 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении показана актуальность диссертационного исследования, выделены объект, предмет и сформулирована цель и задачи исследования, определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, достоверность и обоснованность полученных результатов, указан личный вклад соискателя в получение результатов, изложенных в диссертации.

В главе 1 «Аналитический обзор систем автоматического управления шагающими робототехническими системами» выполнен критический анализ методов моделирования и повышения эффективности управления двуногих шагающих робототехнических систем.

Проведен аналитический обзор методов управления шагающими робототехническими системами шагающими роботами. Выделен спектр подходов к реализации системы управления стабильным перемещением робота на двух опорах (ногах). С одной стороны спектра находятся человекоподобные (гуманоидные) роботы и их системы стабилизации. К роботам данного класса можно отнести широко известные робототехнические платформы, такие как Johnnie, HRP-2 и ASIMO. Роботы данного класса обладают сложной системной архитектурой, осуществляющей обработку информации машинного зрения и сенсоров динамического очувствления с помощью систем искусственного интеллекта. На другом конце спектра находятся минималистичные двуногие роботы, обладающие динамической стабильностью за счет использования кинематики конструкции при отсутствии управления по обратной связи (например, работами McGeer).

Выявлено, что наиболее разработанным и исследованным подходом к обеспечению стабильного перемещения двуногого робота шагом в случае большого количества степеней свободы является редуцирование исходной задачи до задачи стабилизации одномерного перевернутого маятника, дополненного управлением постановки опор с помощью метода ZMP.

Выделены основные классы редуцированных моделей:

- линейный перевернутый математический маятник, представляющий собой сконцентрированную массу робота, движущуюся на постоянной высоте над поверхностью опоры с предположением, что ноги робота не обладают массой;
- обратный маятник с маховиком, для которого ослаблено ограничение на поддержание постоянной высоты и добавлен маховик для представления внутреннего углового момента робота;
- обратный маятник с пружиной.

Важной системной составляющей метода реализации движения является генератор паттернов движения.

Подходом к энерго-оптимальному планированию перемещения механических систем, в том числе шагающих двуногих роботов, является метод гибридной нулевой динамики (Hybrid Zero Dynamics, HZD). Основной идеей HZD является задание виртуальных ограничений для создания предельного цикла в пространстве состояний робота, при котором робот после выполнения шага с одной опорной ногой возвращается в симметричное по отношению к текущей опорной ноге исходное состояние. Зацикливая этот тип движения, возможно получить стабильное перемещение шагом с некоторой средней скоростью [Westervelt и др., Grizzle и др., Shiriaev и др.]. При возникновении нелинейных эффектов, связанных с износом оборудования, возникновением люфтов, изменением характеристик вязкого трения, стабилизация робота без использования вспомогательных мехатронных стабилизирующих устройств становится невозможной.

Сделан вывод, что к наиболее изученным в научной литературе типам механико-математических моделей шагающего робота относятся модели обратного маятника и обратного маятника с маховиком, на основе которых возможно применение метода ZMP и HZD для синтеза автоматического управления динамически устойчивой походкой робота. Главным недостатком указанных методов является высокая вычислительная сложность оптимизационных задач при синтезе траектории перемещения робота.

В главе 2 «Исследование условий и ограничений стабилизации шагающего робота с помощью сустава» разработана технология моделирования и методики оценки эффективности функционирования двуногих шагающих робототехнических систем на основе введения критерия оценки эффективности стабилизации с использованием небионических мехатронных конструкций. В качестве критерия оценки эффективности функционирования двуногой шагающей робототехнической системы используется поиск областей изменения наблюдаемых параметров, обеспечивающих стабилизацию.

Рассмотрены способы обеспечения динамической устойчивости робота с использованием управления суставами. Результаты моделирования обеспечения устойчивости робота с помощью управления суставами для заданных конструкций могут иметь небольшие диапазоны отклонений, при которых систему можно стабилизировать суставами. Перенос одной опоры за счет коленного сустава другой приведет к жестким ограничениям на характер перемещения либо стабилизировать конструкцию не удастся. Для осуществления стабилизации конструкции шагающего робота необходимо, таким образом, использовать небионическую стабилизацию на основе вспомогательных мехатронных устройств. Приведены пример, демонстрирующий, что при заданных параметрах конструкции технически невозможно синтезировать стабилизирующее управление при переносе одной ноги за счет коленного сустава другой опорной ноги.

Таким образом, предложено в *качестве критерия эффективности использовать* значение угла β отклонения конструкции от положения равновесия. Применение небионической стабилизации для повышения эффективности функционирования может быть востребовано в случае, когда найденное значение угла отклонения β заданной конструкции двуного шагающего робота, при котором осуществляется стабилизация имеющимися управляющими механизмами и реализуемым управляющим сигналом, меньше значения β^* , определяемого требованиями ходьбы (высотой преодоления препятствий, скоростью передвижения, углом поворота). Цель небионической стабилизации – увеличить диапазон отклонения угла до значения, не меньше β^* . В зависимости от задачи управления могут применяться задачи повышения быстродействия, уменьшения затрат энергии.

В главе 3 «Метод небионической стабилизации шагающих конструкций на основе маховика» сформулирована методика моделирования и поиска диапазона значений угла отклонения, обеспечивающего стабилизацию в заданных условиях функционирования.

Разработан *метод небионической стабилизации*. Базовые положения, которые положены в основу метода, заключаются в следующем: а) в качестве объекта управления используются линеаризованные модели; б) дополнительный контур стабилизации реализуется за счет мехатронных конструкций (маховика и/или гиродина); в) реализация систем управления осуществляется на основе линейно-квадратичных регуляторов; г) полученные решения дают возможность использования ПИД-регуляторов, реализованных в типовых моделях промышленных контроллеров; д) возможно теоретическое оценивание полученных решений на основе критерия, введенного в гл. 2.

Для реализации метода необходимо разработать и адаптировать методики синтеза управления применительно к рассматриваемому классу объектов, рассмотреть особенности, провести теоретические решения задач стабилизации, а также имитационные и натурные эксперименты, подтверждающие эффективность метода.

Для экспериментальной проверки метода использован неантропоморфный двуногий робот AnyWalker (рис. 1). Будем искать максимальный угол, на который можно отклонить робота от вертикали, при котором он стабилизирует свое состояние с использованием маховика. При этом роботу запрещается менять положение своих звеньев друг относительно друга.

Разработка специализированной методики моделирования требуется ввиду особенности задачи, определяемой наличием в конструкции вращающегося маховика внутри тела робота и отвечающей за динамическую стабилизацию и не меняющую ориентацию узлов конструкции. Схема конструкции приведена на рис. 2.

Для исследования использованы следующие параметры конструкции: h – расстояние от оси вращения маховика до плоскости опоры [м]; x – расстояние от плоскости симметрии до внешнего края многоугольника опоры робота [м]; b – расстояние центра масс до плоскости опоры [м]; J_m – момент инерции робота без маховика относительно центра многоугольника опоры [кг·м²]; J_M – момент инерции маховика относительно его оси вращения [кг·м²]; m – масса робота без маховика [кг]; M – масса маховика [кг]; g – ускорение свободного падения [м·с⁻²]; c_u – электрическая постоянная привода маховика [Н·м·А⁻¹]; c_v – механическая постоянная привода маховика [Н·м·с]; $J = J_m + M(x^2 + h^2) + J_M + mx^2$.

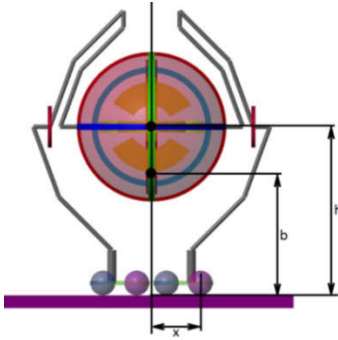


Рисунок 1. Схема шасси AnyWalker

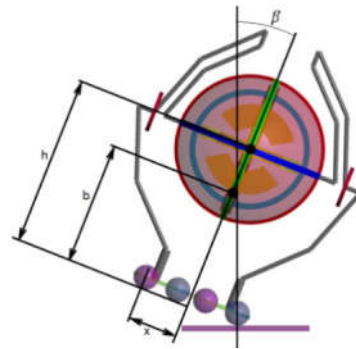


Рисунок 2. Наклонное положение робота

Управляющий сигнал u – ток, подаваемый на двигатель [А]; выходные контролируемые параметры $\beta(t)$ – угол между осью AnyWalker и направлением «вверх» против часовой стрелки и $\omega(t)$ – угловая скорость вращения маховика.

Получено уравнение движения в матричном виде

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \beta \\ \dot{\beta} \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{(m+M)\sqrt{x^2+b^2}g}{J-J_M} & 0 & \frac{c_v}{J-J_M} \\ -\frac{(m+M)\sqrt{x^2+b^2}g}{J-J_M} & 0 & -\frac{c_v}{J_M - \frac{J_M^2}{J}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ \dot{\beta} \\ \omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{c_u}{J-J_M} \\ \frac{c_u}{J_M - \frac{J_M^2}{J}} \end{pmatrix} u + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{(m+M)\sqrt{x^2+b^2}g}{J-J_M} \\ \frac{(m+M)\sqrt{x^2+b^2}g}{J-J_M} \end{pmatrix} \arctg \frac{x}{b}.$$

Характеристический полином матрицы динамики системы имеет вид

$$F(\lambda) = \left(-\frac{c_v}{J_M - \frac{J_M^2}{J}} - \lambda \right) \left(\lambda^2 - \frac{(m+M)\sqrt{x^2 + b^2} g}{J - J_M} \right) - \frac{c_v}{J - J_M} \frac{(m+M)\sqrt{x^2 + b^2} g}{J - J_M}.$$

Матрица имеет один положительный корень и два отрицательных. Наличие положительного собственного значения говорит о неустойчивости стационарной точки при отсутствии управления.

Произведем следующую замену переменных $\alpha = \beta - \arctg x/b$, введем обозначения $x = [\alpha, \dot{\alpha}, \omega]^T$ и $B = [0, -c_u/(J - J_M), c_u/(J_M - J_M^2/J)]^T$. Получим в матричном виде

$$\dot{x} = Ax + Bu. \quad (1)$$

Систему уравнений (1) можно записать, сделав замену переменных $x = Ky$, где

$$K = \begin{pmatrix} c_v & c_v & c_v \\ c_v \lambda_1 & c_v \lambda_2 & c_v \lambda_3 \\ (J - J_M) \lambda_1^2 - (m+M)\sqrt{x^2 + b^2} g & (J - J_M) \lambda_2^2 - (m+M)\sqrt{x^2 + b^2} g & (J - J_M) \lambda_3^2 - (m+M)\sqrt{x^2 + b^2} g \end{pmatrix},$$

получим

$$K\dot{y} = AKy + Bu.$$

Домножим слева уравнение на K^{-1} :

$$\dot{y} = K^{-1}AKy + K^{-1}Bu = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)y + K^{-1}Bu,$$

так как $K^{-1}AK = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$. Пусть $m = K^{-1}b$, тогда для уравнения

$$\dot{y} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)y + mi$$

исследуем область устойчивости.

Пусть $u = u(y, t)$ такова, что $|u| \leq u_{max}$. В этих условиях справедлив следующий результат. Система, описываемая уравнением (1), из состояния с $y_1 \geq |m_1|u_{max}/\lambda_1$ не может перейти в состояние с меньшим y_1 (из состояния с $y_1 \leq -|m_1|u_{max}/\lambda_1$ не может перейти в состояние с большим y_1). Существует управление $u = u(y, t)$ такое, что решение уравнения из состояния с $|y_1| < |m_1|u_{max}/\lambda_1$ стремится к стационарной точке $(0, 0, 0)^T$.

Получено, что область стабилизации маховиком задается неравенством $|y_1| < |m_1|u_{max}/\lambda_1$. Максимальное компенсируемое отклонение по углу, определяется соотношением

$$\beta_{max} = \frac{|m_1|u_{max}}{(K^{-1})_{11} \lambda_1} + \text{arctg} \frac{x}{b}. \quad (2)$$

Проведены натурные и численные эксперименты. Для робота AnyWalker параметры имеют следующие значения: $h = 0,35$ [м]; $x =$ от 0 до 0,1 [м]; $b = 0,2$ [м]; $J_m = 0,01$ [кг·м²]; $J_M = 0,005$ [кг·м²]; $m = 15$ [кг]; $M = 2$ [кг]; $g = 9,8$ [м·с⁻²]; $c_u = 0,1107$ [Н·м·А⁻¹]; $c_v = 0,00015$ [Н·м·с]; $u_{max} = 39,5$ А. Полученные

практические результаты согласуются с теоретическими, обеспечивая стабилизацию робота при ходьбе.

В соответствии с введенным в главе 2 критерием *сформулирована методика моделирования и оценки эффективности функционирования двуногих шагающих робототехнических систем* на основе решения задач стабилизации с использованием маховика, состоящая из следующих этапов:

1. Вывод на основе уравнений Лагранжа уравнений движения относительно угла отклонения, отвечающих за динамическую стабилизацию с учетом наличия в конструкции вращающегося маховика внутри тела робота.

2. Линеаризация и анализ матрицы A динамики системы.

3. Вычисление характеристического полинома и анализ устойчивости.

4. Исследование диапазона отклонения угла наклона конструкции, при которой система устойчива в условиях стабилизирующего управления маховиком.

5. Вычисление максимального угла, при котором система стабилизируется маховиком.

Разработанная методика определяет техническую реализуемость небионической стабилизации и формирует условия для синтеза управления.

Таким образом, *сформирована теоретическая база для разработанного метода небионической стабилизации*. Проведенные теоретические исследования определяют состоятельность гипотез, сформулированных в виде положений, легших в основу метода небионической стабилизации.

В главе 4 «Стабилизация системы маховиком в условиях системной ошибки в показаниях датчика угла отклонения» рассмотрено решение задачи проектирования системы автоматического управления в условиях ограничений на точность изменения параметров

Обратный маятник представляет собой известную модель шагающей конструкции, предназначенную для моделирования и синтеза управления в задачах стабилизации. Предложен экспериментальный стенд, предназначенный для экспериментального исследования разработанных теоретических положений. Модель маятника приведена на рис. 3. Для вывода уравнений движения определим следующие механические параметры стенда: m_p - масса маятника; m_r - масса ротора; l_p - расстояние от шарнира до центра масс маятника; l_r - расстояние от шарнира до центра масс ротора; J_p - момент инерции маятника при вращении вокруг центра масс; J_r - момент инерции ротора; θ - угол маятника относительно вертикали; θ_r - угол ротора относительно маятника; τ - момент, прикладываемый к ротору. Угол маятника относительно вертикали измеряется как угол между лучом, выходящим из точки опоры обратного маятника и проходящим через центр тяжести, и вертикалью. На рис. 4 приведено изображение экспериментального стенда.

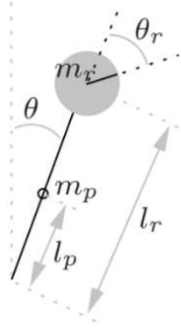


Рисунок 3. Схема обратного маятника



Рисунок 4. Экспериментальный стенд — обратный маятник

В связи с незначительностью трения в шарнире обратного маятника и в роторе будем пренебрегать трением.

Линеаризованная система с контуром тока имеет вид:

$$\dot{X} = AX + BI, \quad (3)$$

где, пренебрегая вязким трением,

$$X = \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \dot{\theta}_r \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -m_l g / J & 0 & 0 \\ -m_l g / J & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ -k / J \\ (J + J_r)k / (J J_r) \end{pmatrix}.$$

Будем искать линейно-квадратичный регулятор (LQR) в виде $I = -KX$, где $K = (k_1, k_2, k_3)$, минимизирующий следующий функционал:

$$F = \int_0^{+\infty} X^T Q X + I^T R I dt \rightarrow \min.$$

Не нарушая общности, выберем матрицы Q и R единичными, имеющими размерность 3×3 и 1×1 соответственно. При фиксировании найденного методом LQR значения K система (3) с регулятором $I = -KX$ примет вид

$$\dot{X} = (A - BK) X.$$

Метод LQR гарантирует, что матрица $A - BK$ обладает собственными числами с отрицательными вещественными частями.

Рассмотрено решение задачи стабилизации в условиях системной ошибки показаний датчиков отклонения центра масс. Если датчик угла отклонения маятника плохо откалиброван либо вследствие износа механических частей конструкции появились люфты, происходит искажение показаний датчика на постоянное смещение δ . В результате этого вместо верного управления на вход объекта управления будет поступать измененный сигнал

$$I = -KX - K(\delta \ 0 \ 0)^T.$$

Определим стационарную точку этой системы:

$$0 = (A - BK) X - BK(\delta \ 0 \ 0)^T.$$

Разрешая это выражение относительно X , получим:

$$X = (A - BK)^{-1} BK(\delta \ 0 \ 0)^T = (0 \ 0 \ -\delta k_1 / k_3)^T. \quad (3)$$

Так как все собственные значения матрицы $A - BK$ обладают отрицательной действительной частью, определенная стационарная точка является

глобально асимптотически устойчивой. Из этого следует, что при плохой калибровке датчика или проявлении механического износа система сойдётся к нулевому углу маятника, но ненулевой скорости маховика, причём скорость будет пропорциональна ошибке калибровки.

В ситуации износа механических частей и появления люфтов происходит дополнительное отклонение конструкции на некоторый угол δ , что равносильно появлению постоянного неизвестного смещения δ для датчика положения в рассматриваемой модели обратного маятника. Таким образом, появляется потребность в разработке наблюдателя, определяющего с достаточной точностью угол θ , угловую скорость $\dot{\theta}$ и смещение δ . Используя формулу (3), можно определить величину δ в установившемся режиме. Тем не менее, более желательным является определение величины δ до начала стабилизации, что может значительно ускорить процесс стабилизации. При решении задачи синтеза наблюдателя будем полагать, что управляющее воздействие силы тока является известным для всех прошедших моментов времени.

Обозначим текущие показания датчика угла маятника $y = \theta + \delta$ (при истинном состоянии системы θ) и введем следующие обозначения: $x = [\theta, \dot{\theta}, \delta]^T$, $\hat{x} = [\hat{\theta}, \hat{\dot{\theta}}, \hat{\delta}]^T$, где x – вектор истинных состояний, а \hat{x} — вектор оценок (выходные данные наблюдателя). Также определим вектор ошибок оценивания $\tilde{x} = \hat{x} - x$. Получим вспомогательную систему, сформированную из второго уравнения системы (2) в матричном виде (добавив уравнение $\dot{\delta} = 0$), :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} x_2 \\ a \sin x_1 + bI \\ 0 \end{bmatrix}, y = Cx,$$

где $a = mlg/J$, $b = -k/J$, $C = [1 \ 0 \ 1]$.

Решения вспомогательной системы стремятся к решениям исходной системы асимптотически. Тогда выходным значением наблюдателя будет текущее положение в фазовом пространстве вспомогательной системы.

Получим уравнение динамики ошибки оценивания:

$$\dot{\tilde{x}} = \dot{\hat{x}} - \dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -a \cos(y - \hat{x}_3) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tilde{x} - LC\tilde{x}. \quad (4)$$

Таким образом, получена линейная система дифференциальных уравнений относительно \tilde{x} с переменными коэффициентами. В точках $\cos(y - \hat{x}_3) = 0$ она становится *ненаблюдаемой*.

Для краткости обозначим $z = y - \hat{x}_3$, уравнения (4) примут форму:

$$\dot{\tilde{x}} = (A(z) - LC)\tilde{x}.$$

Задача сводится к исследованию устойчивости для всех z этой системы.

В целях обеспечения качества управления и маневренности робототехнической системы введем следующее допущение: начальное положение и тра-

ектория перемещения маятника таковы, что обратный маятник не покидает верхний полукруг, т. е. $|z| \leq \sigma_0$, где $\pi/2 > \sigma_0 > 0$. Введение данного допущения не ограничивает рассматриваемую задачу синтеза управления, так как при отклонении на угол, превосходящий $\pi/2$, обратный маятник попадет в область, где линеаризованная модель не является адекватной, и тогда стабилизация невозможна.

Учитывая сделанное допущение, задача синтеза наблюдателя может быть представлена в виде задачи решения системы линейных матричных неравенств, имеющей вид:

$$\begin{aligned} P = P^T &> 0, \\ (A(0) - LC)^T P + P(A(0) - LC) &< 0, \\ (A(\sigma_0) - LC)^T P + P(A(\sigma_0) - LC) &< 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Такое представление является справедливым, поскольку, если существует L , для которой введенная выше система имеет решения, то P – весовая матрица квадратичной функции Ляпунова для ошибки оценивания. Производная по времени данной функции Ляпунова для всех значений z будет отрицательной, что вытекает из второго и третьего неравенств.

Таким образом, разработан *метод наблюдения корректного положения равновесия при наличии постоянного смещения при ходьбе с небиионической стабилизацией на основе вспомогательного мехатронного устройства в условиях системной ошибки, вызванной ошибкой датчика положения либо нелинейностями, вызванными износом механических деталей конструкции, либо изменением центра масс и момента инерции в процессе функционирования*, состоящий из этапов:

1. Формализация линеаризованной системы и линейно-квадратичного регулятора, определение параметров системы. Преобразование уравнения в окрестности стационарной точки в условиях системной ошибки датчика угла (3).

2. Построение вспомогательной системы, решения которой стремятся к решениям исходной системы асимптотически (4).

3. Определение точек в пространстве состояний, в которых система (4) *ненаблюдаема*.

4. Исследование устойчивости для всех значений угла отклонения системы (4).

5. Синтез наблюдателя в виде задачи решения системы линейных матричных неравенств (5).

На экспериментальном стенде (см. рис. 4) было проведено тестирование построенного регулятора и наблюдателя. Маховик приводится в движение с помощью бесконтактного двигателя Махон ЕС 45 мощностью 70 Вт, работающего на постоянном токе, управляемого с помощью контроллера Махон EPOS2 50/5 в режиме крутящего момента. Контроллером двигателя измеряется сила тока, а также происходят измерения угла поворота ротора. Вычисления осуществляются с помощью микроконтроллера STM32F407, взаимодействующего

с контроллером двигателя по протоколу CANopen. Для измерения угла маятника применяется оптический инкрементный датчик, имеющий разрешение 2500 отсчетов на оборот.

Введенные механические параметры имеют следующие конкретные значения: $m_p = 0,58$ кг, $l_p = 0,10$ м, $J_p = 3,8 \cdot 10^{-3}$ кг \times м², $m_r = 0,35$ кг, $l_r = 0,22$ м, $J_r = 12,48 \cdot 10^{-4}$ кг \times м².

Для имеющихся параметров экспериментального стенда

$$K = (-377,9490 \quad -54,5220 \quad -1,0000).$$

При решении задачи (5) получено

$$L = [546 \quad 1100 \quad -508]^T, \quad (6)$$

обеспечивающее в системе время переходного процесса на уровне 0,5 с.

Приведены результаты двух экспериментов с экспериментальным стендом. Эксперименты, проведенные на опытном стенде, доказывают эффективность выбранного наблюдателя. К достоинствам построенного наблюдателя (6) относится то, что он эффективен при довольно произвольном перемещении обратного маятника. Сделан вывод, что полученные результаты можно применить в целях удешевления конструкций типа «обратный маятник», в сравнении с имеющимися на данный момент, путем замены аппаратных датчиков угловой скорости на программные датчики (наблюдатели).

В главе 5 «Исследование условий и ограничений стабилизации шагающего робота с помощью гиродина» рассмотрена методика моделирования и управления небионической стабилизации шагающей конструкции с помощью гиродина и ее экспериментальная реализация.

В качестве базовой модели используется следующая конструкция (рис. 9): гиродин, оснастка гиродина и обратный маятник. Обратный маятник с помощью шарнира крепится к неподвижной опоре в точке O , при этом он может совершать вращательные движения в плоскости чертежа. Оснастка крепится к обратному маятнику и может вращаться относительно него, при этом ось вращения оснастки и ось маятника (лежит в плоскости чертежа) перпендикулярны, ось вращения оснастки проходит через точку C . К оснастке прикреплен диск гиродина. Указанный диск осуществляет вращение относительно оснастки, ось вращения перпендикулярна оси вращения оснастки и проходит также через точку C . Предполагается, что центры масс гиродина и оснастки совпадают в точке C на рис. 5 и располагаются на пересечении оси вращения оснастки, оси вращения гиродина и оси обратного маятника.

Введем параметры конструкции, необходимые для изучения динамики конструкции: $h = OC$; J_p — момент инерции обратного маятника относительно оси вращения, проходящей через точку O ; I_d и I_g — моменты инерции гиродина и его оснастки относительно оси вращения гиродина; J_d и J_g — моменты инерции гиродина и его оснастки относительно любой перпендикулярной оси, проходящей через точку C . Предполагается независимость моментов инерции относительно выбора этой оси; m_d — масса гиродина; m_g — масса оснастки.

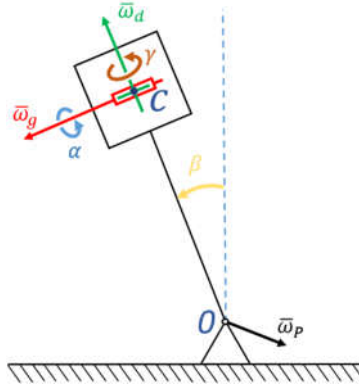


Рисунок 5. Схематическое изображение обратного маятника с гиродином

Положение конструкции в пространстве однозначно задано тремя углами: α — угол поворота оснастки относительно обратного маятника, причем при $\alpha = 0$ положение оси вращения гиродинной оснастки сонаправлено оси обратного маятника; β — угол поворота оси обратного маятника относительно вертикали; γ — угол поворота гиродинной оснастки относительно ее корпуса. Обозначим угловые скорости следующим образом: $\bar{\omega}_p$ — угловая скорость обратного маятника относительно неподвижного репера; $\bar{\omega}_g$ — угловая скорость оснастки относительно обратного маятника; $\bar{\omega}_d$ — угловая скорость гиродинной оснастки относительно ее корпуса; Π_0 — потенциальная энергия всей конструкции при $\beta = 0$ относительно уровня точки O ; $\omega_p = \dot{\beta}$, $\omega_g = \dot{\alpha}$, $\omega_d = \dot{\gamma}$.

Получены уравнения движения в следующем виде:

$$(J_d + J_g) \ddot{\alpha} + I_d \dot{\gamma} \dot{\beta} \cos \alpha + (J_d + J_g - I_d - I_g) \dot{\beta}^2 \cos \alpha \sin \alpha = \tau_a, \quad (7)$$

$$\ddot{\beta} (J_p + (m_g + m_d) h^2 + (I_g + I_d) \sin^2 \alpha + (J_d + J_g) \cos^2 \alpha) + 2 \dot{\beta} \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \alpha (I_g + I_d - J_d - J_g) - I_d \ddot{\gamma} \sin \alpha - I_d \dot{\gamma} \dot{\alpha} \cos \alpha - \Pi_0 \sin \beta = 0. \quad (8)$$

$$I_d (\ddot{\gamma} - \dot{\beta} \dot{\alpha} \cos \alpha - \ddot{\beta} \sin \alpha) = \tau_d. \quad (9)$$

В дальнейшем будем предполагать, что контроллер оборотов двигателя гиродинной оснастки обеспечивает выбранную скорость вращения гиродинной оснастки $\dot{\gamma} \equiv \Gamma$, таким образом, контроллер оборотов создает $\tau_d = I_d (\dot{\beta} \dot{\alpha} \cos \alpha + \ddot{\beta} \sin \alpha)$, и уравнение (9) выполняется автоматически. С учетом допущений, определенными особенностями технической реализации, уравнения (9) и (7) справедливы. Дальнейшему анализу подлежит уравнение (8), в котором, задавая скорость $\dot{\alpha}$, необходимо обеспечить выход β в нуль. Поставлена также дополнительная задача привести α к нулю.

Осуществив линеаризацию уравнения (8) вблизи положения равновесия $\beta = 0$, $\alpha = 0$, $\dot{\beta} = 0$, $\dot{\alpha} = 0$, получим

$$B_0 \ddot{\beta} - \Pi_0 \beta = I_d \Gamma \dot{\alpha},$$

где $B_0 = J_p + (m_g + m_d) h^2 + J_d + J_g$ — момент инерции всей конструкции относительно оси вращения, проходящей через точку опоры O при условии

$\beta = \alpha = 0$. Приведем уравнение к нормальному виду, получим следующее выражение:

$$\ddot{\beta} - M\beta = F\dot{\alpha},$$

где $M = \Pi_0/B_0$, $F = I_d\Gamma/B_0$.

Разработана методика моделирования и синтеза управления при небюджетной стабилизации шагающей конструкции с помощью гиродина. Пусть $u = \dot{\alpha}$ — управление. Обозначим $a(t) = \int_0^t \alpha(s)ds$. Тогда задача синтеза управления имеет вид:

$$\begin{cases} \ddot{\beta} - M\beta = Fu, \\ \dot{\alpha} = u. \end{cases}$$

В матричном виде:

$$\dot{x} = Ax + Bu. \quad (10)$$

Здесь

$$x = \begin{pmatrix} \dot{\beta} \\ \beta \\ \dot{a} \\ a \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 0 & M & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} F \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Целью управления является сделать точку $X\beta = \dot{\beta} = a = \dot{a} = 0$ фазового пространства системы асимптотически устойчивой.

Искомое управление должно иметь вид:

$$u = -Kx.$$

Задача синтеза управления имеет решение, так как $\det(B | AB | A^2B | A^3B) \neq 0$. Матрица K определяется методом LQR. Случай управления по моменту является аналогичным.

Предположим, что в результате дополнительной механической нагрузки центр масс системы переместился с оси ОС. При этом новое положение центра масс заранее не известно. Учитывая робастность метода LQR, в математической форме это представляется как некоторая неизвестная константная ошибка в определении угла β . Таким образом, вместо подлинного направления на вертикаль β приборы показывают величину $\beta + \Delta$. В свою очередь это приведет к смещению в управлении, которое в этой ситуации примет форму:

$$u = -Kx - k_\beta \Delta.$$

В случае такого управления система (10) будет обладать асимптотически устойчивым стационарным решением, найти которое можно, решая систему линейных уравнений

$$(A - BK)x = Bk_\beta \Delta,$$

В результате решения этой системы получаем

$$\dot{\beta} = \dot{a} = \beta = 0, \quad a = -(k_\beta/k_a)\Delta.$$

Полученные равенства указывают на то, что в случае смещения центра масс конструкция будет стабилизироваться в положении, когда центр масс находится над точкой опоры. Ось вращения гиродина при этом будет расположена в плоскости вращения обратного маятника.

Проведены экспериментальные исследования. Механическая структура экспериментальной установки, включающая обратный маятник, оснастку и диск гиродина. Компонентами обратного маятника являются: стойки маятника 0,6 кг; общая рама узла 2,5 кг; датчик углового положения/скорости 1,1 кг; оснастка гиродина состоит из гиродина без диска (маховика), защитного корпуса маховика, двигателя раскрутки, серводвигателя актуации, подшипниковых узлов и имеет массу 3,3 кг; маховик (диск) гиродина внутри оснастки имеет массу 2,0 кг с внешним диаметром равным 200 мм. Главные моменты инерции диска равны [0.01; 0.005; 0.005] кг·м²; диск гиродина вместе с оснасткой образуют гироскоп (силовой гироскоп) в виде цельного устройства массой 5,3 кг. Общая масса маятниковой части составляет 9,5 кг. Масса всего изделия (учитывая массу шарнира маятника 1.0 кг) составляет 10,5 кг.

Динамические характеристики гиродина (силового гироскопа): скорость вращения маховика гироскопа – 15 000 об/мин; момент инерции маховика относительно оси вращения — 0,01 кг·м²; момент инерции силового гироскопа относительно оси актуации (прецессии) — 0,015 кг·м². Расчетная высота центра масс относительно оси вращения обратного маятника в положении равновесия составляет 0,275 м. Расчетная высота общей рамы составляет примерно 0,18 м. В качестве двигателя актуатора и двигателя раскрутки использовались RDrive 50 и X2216 KV1400 соответственно.

Математическое заключение о стабилизируемости конструкции в условиях смещения центра масс было подтверждено на вычислительном и натурном экспериментах. Сравнение экспериментальных графиков, полученных от установки, и графиков, полученных при имитационном моделировании представлено на рис. 6.

Как экспериментальная установка, так и модель в Simulink оказались асимптотически устойчивыми (или колебательно устойчивыми, из-за явных нелинейностей в схеме управления) в окрестности стационарной точки $\beta = 0$, $\alpha = 0$, $\dot{\beta} = 0$, $\dot{\alpha} = 0$. Затем было введено шаговое возмущение в виде $\vec{F} = m_{load} \vec{g}$, примененное к точке на высоте $(h - h_{cube}/2)$ над осью вращения перевернутого маятника и на расстоянии $h_{cube}/2$ от оси симметрии перевернутого маятника, где h и h_{cube} — высота оси вращения привода относительно оси вращения маятника и высота общей рамы соответственно. В случае экспериментальной установки это было сделано подвеской нагрузки аналогичной массы. На рис. 8а, б представлены результаты сравнения экспериментальных и модельных данных для различных отклонений обратного маятника и актуатора от вертикали. На рис. 8в, г добавлена масса нагрузки $m_{load} = 0,15 \pm 0,01$ кг кг.

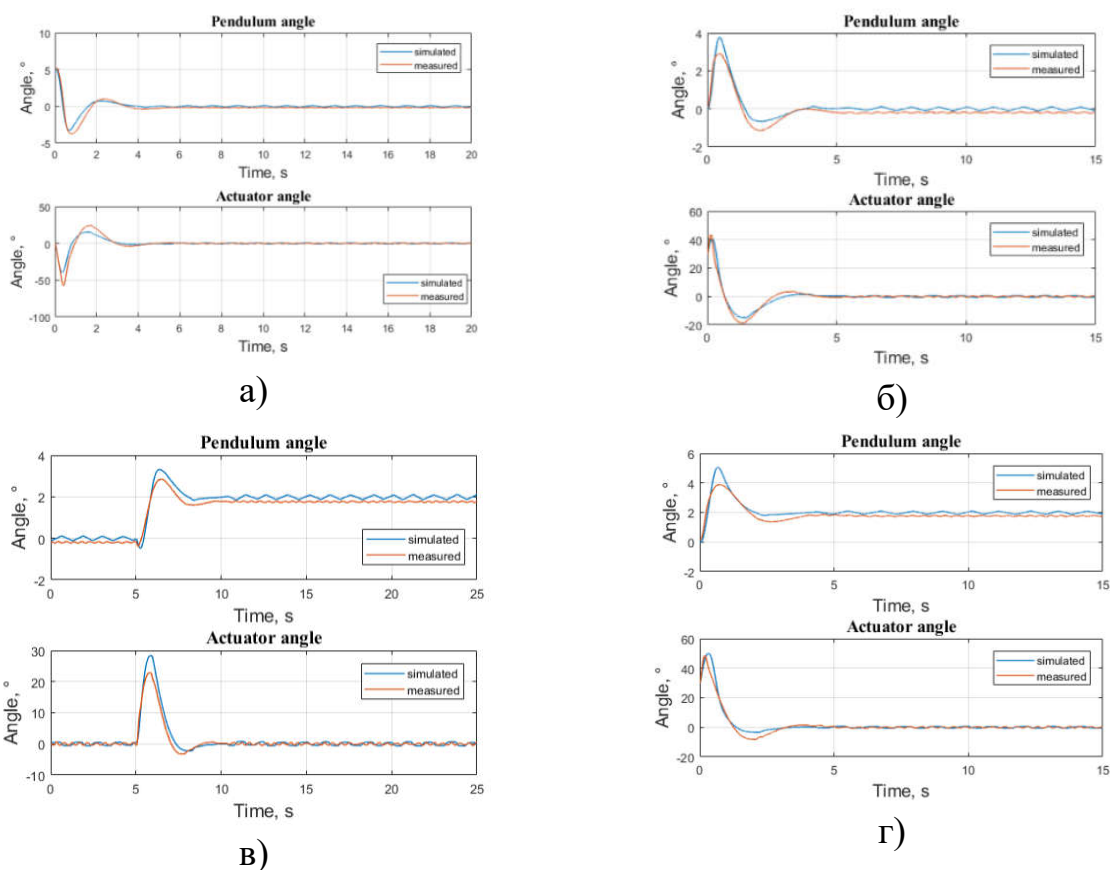


Рисунок 6. Экспериментальные графики для установки (measured) и для модели (simulated). Вверху: зависимость угла обратного маятника от времени. Внизу: зависимость угла актуатора от времени

Результаты исследования были также успешно применены для эксперимента стабилизации гироскопом куба (рис. 7), балансирующего на грани.



Рисунок 7. Система стабилизации гироскопом куба, балансирующего на грани

Применение созданной методики проектирования систем автоматического управления в условиях ограничений на изменение параметров, обеспечивающих требуемое качество управления, определяемое маневренностью робототехнической системы. При достаточной скорости вращения диска гироскопа система стабилизации гироскопом имеет меньшую массу при одинаковой мощности в сравнении с системой стабилизации на основе маятника.

В главе 6 «Применение интеллектуальных методов для синтеза управления небионической стабилизации» рассмотрены вопросы использования современных подходов к решению задач регулирования.

При синтезе управления суставами в опорах двуногих шагающих конструкций дополнительным требованием к качеству управления является обеспечение гладкости первых и вторых производных вектора управления, для чего могут использоваться нейро-нечеткие регуляторы, построенные на основе технологии adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS).

Осуществлен синтез подобного регулятора для случая конструкции опоры, представленной на рис. 8. Центр масс опоры находится в точке O . Управление опорой осуществляется по положению через задание вектора углов в суставах (a_1, a_2) . На основе соотношений обратной кинематики для рассматриваемой конструкции опоры была создана MATLAB-функция, реализующая конечный автомат, осуществляющий шаг опоры через последовательность 4 фаз движения. Для повышения качества управления опорой был применен метод синтеза нечеткого логического контроллера типа Такаги-Сугено (ТС). Для управления опорой робота была разработана следующая структура нечеткого логического контроллера (рис. 9). Разработанный составной контроллер состоит из двух ТС-контроллеров, осуществляющих отдельно задание a_1 и a_2 . На вход обоих ТС-контроллеров подается тройка значений, состоящая из текущего значения линейного возрастающего сигнала, предыдущего значения a_1 и предыдущего значения a_2 .

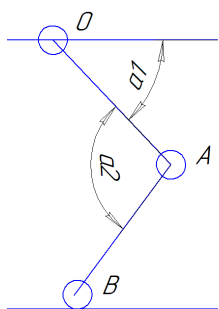


Рисунок 8. Конструкция опоры

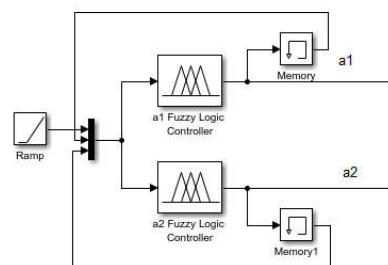


Рисунок 9. Структура нечеткого логического контроллера для управления опорой двуногой шагающей конструкции

На основе полученного нечеткого задания для одного шага была смоделирована походка робота из 10 шагов с подъемом на препятствие – ступеньку высотой 10 см. Результаты моделирования 10 шагов с подъемом на ступеньку при управлении суставами нечетким логическим контроллером приведены на рис. 10.

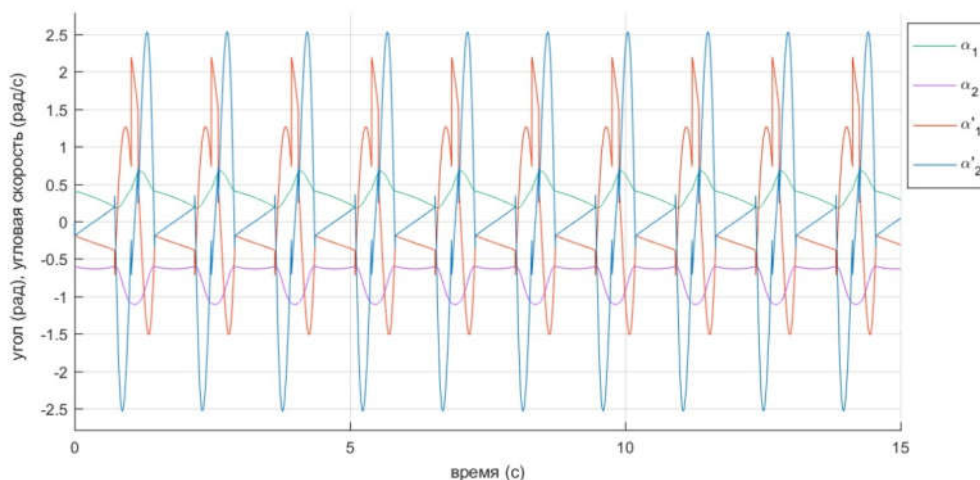


Рисунок 10. Моделирование управления суставами робота при перемещении шагом с помощью нечеткого логического контроллера

При создании робототехнических платформ важной становится задача проектирования и надежной настройки системы автоматического управления с учетом габаритов робота. Рассмотрим использование одного из наиболее распространенных интеллектуальных методов – генетических алгоритмов – к решению этой задачи.

Моделируемая конструкция включает массивный корпус и два симметрично расположенных тяжелых гироскопических устройства (рис. 11). Другими компонентами конструкции является балка «а» массой m_a и длиной l_a , закрепленная на шарнире с пренебрежимо малым коэффициентом вязкого трения. На балке «а» закреплен куб «корпус», длина ребра которого равна d . Центр куба находится на конце балки «а». Масса куба m_c распределена равномерно. Через центр куба проходит балка «б» длиной l_b и массой m_b перпендикулярная балке «а». По обоим концам балки «б» прикреплены гироскопические устройства ГУ1, ГУ2. Массы гироскопических устройств равны и составляют величину m_g для одного устройства. Коэффициент вязкого трения в гироскопическом устройстве составляет пренебрежимо малую величину. Отклонение корпуса от положения равновесия происходит перпендикулярно балке «б» на величину β . Угол поворота гироскопических устройств ГУ1, ГУ2 составляет величины θ_g и $-\theta_g$ соответственно. Механическое состояние робота описывается вектором обобщенных координат $q = (\beta, \theta_g)^T$. Необходимо решить задачу поиска параметров ПИД-регуляторов системы динамической стабилизации, управляющих скоростью изменения направления оси вращения гироскопических устройств. Схема системы автоматического управления приведена на рис. 12.

Настройка заключается в поиске коэффициентов регуляторов, при использовании которых корпус робота возвращается к положению равновесия при заданной величине начального отклонения корпуса β_{init} , возникающего в момент модельного времени t . По завершении 50 поколений генетического отбора были получены параметры (табл. 1), соответствующие минимуму задан-

ной функции приспособленности 2571,77. Значение функции приспособленности для полученной случайным образом начальной популяции решений составляло 3200.

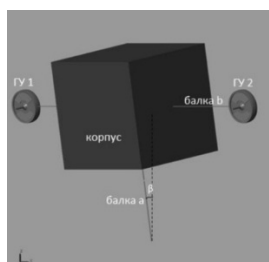


Рисунок 11. Механическая модель

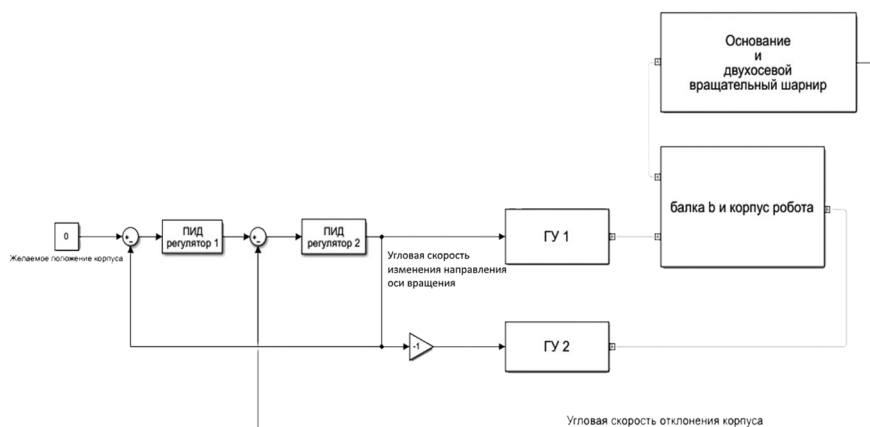


Рисунок 12. Схема системы автоматического управления

Таблица 1. Найденные коэффициенты регуляторов

Регуляторы	P	I	D	N (коэффициент фильтрации)
ПИД-регулятор 1	-0.1628	-0.0439	0.0650	2.3974
ПИД-регулятор 2	99.8108	143.6955	0.9534	40.5466

Динамика корпуса робота с полученными параметрами каскада ПИД-регуляторов показана на рис. 13.

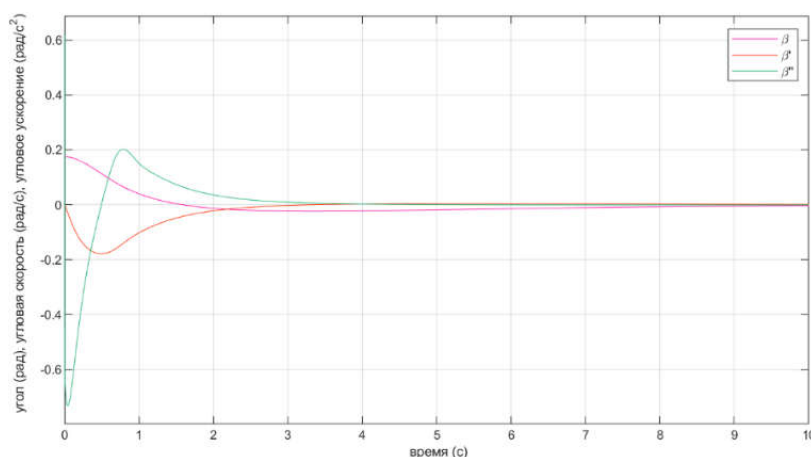


Рисунок 14. Компенсация отклонения корпуса при управлении, найденном генетическим алгоритмом

Таким образом, созданная **методика разработки нейро-нечетких контроллеров шага двуногой шагающей конструкции** состоит из следующих шагов:

1. Разработка имитационной модели шагающего робота с помощью программных средств имитационного моделирования.

2. Выбор исходных данных для обучения, содержащих огрубленные значения углов в суставах робота в процессе осуществления шага.

3. Экспериментальный выбор параметров обучения искусственной нейронной сети, осуществляющей настройку нечетких регуляторов (ANFIS) по исходным данным.

4. Осуществление обучения нечетких контроллеров.

Разработанная *методика поиска ПИД-регуляторов системы стабилизации шагающего робота с гиродином с помощью имитационного моделирования и эволюционных вычислений* состоит из следующих шагов:

1. Разработка имитационной модели системы стабилизации с помощью программных средств имитационного моделирования.

2. Выбор целевой функции (функции приспособленности) для численной оценки качества функционирования системы стабилизации с заданными коэффициентами регуляторов.

3. Написание программы эволюционного поиска, взаимодействующей с имитационной моделью системы стабилизации, передавая в нее оцениваемые наборы параметров регуляторов.

4. Запуск имитационной модели и программы эволюционного поиска.

5. Получение решения.

Приведенные результаты демонстрируют эффективное применение интеллектуальных методов для синтеза управления в задачах небионической стабилизации шагающих роботов.

В главе 7 «Имитационное моделирование системы стабилизации шагающего робота» осуществлена разработка алгоритмов управления шагающими конструкциями на основе использования небионических мехатронных конструкций.

Разработана *методика имитационного моделирования и исследования управляемых систем, использующих небионическую стабилизацию*. Методика состоит из следующих шагов.

1. Моделирование исходной динамически сложной системы.

2. Оценка динамических характеристик.

3. Подключение модуля небионической стабилизации в контур управления.

4. Синтез управления на основе разработанного метода небионической стабилизации.

5. Выбор вида управления, структурной схемы управления, критериев оценки.

6. Анализ характеристик и оценка значения критериев эффективности управления.

7. Проведение имитационных экспериментальных исследований с различными видами входных воздействий и ограничений.

8. Анализ результатов.

9. Формирование набора данных о структурном и параметрическом синтезе управления для конструктивной реализации робототехнических устройств.

Приведены результаты имитационного моделирования в среде Simulink/MATLAB и применения разработанной методики для небιονической мехатронной конструкции шагающего робота AnyWalker, осуществлен подбор сервоприводов для шагающего робота.

Для исследования модели стабилизации создана имитационная модель в среде Simulink/MATLAB. Для стабилизации маховиков используются три блока ПИД-регуляторов с обратной связью. Выходные сигналы с блока системы стабилизации через обратную связь поступают в блоки ПИД-регуляторов для каждого из направлений вращения маховиков: по оси X , по оси Y и по оси Z . Также эти сигналы поступают на блок виртуального осциллографа. Для каждого маховика блоком системы стабилизации формируется свой сигнал по каждой из координатных осей x , y и z . Детальная схема блока стабилизации приведена на рис. 15. Для визуализации движений маховиков и маятника используется библиотека Simscape системы Simulink (см. рис. 16).

Осуществлено математическое моделирование небιονической мехатронной конструкции, позволившее построить алгоритм управления шагающей конструкцией по напряжению для двигателя маховика. Управление, получаемое по разработанному алгоритму, обладает большой областью притяжения, что позволяет использовать его при наличии неучтенных нелинейностей, обусловленных изменяющимся трением в шарнирах, а также при появлении люфтов вследствие продолжительной эксплуатации шагающего робота.

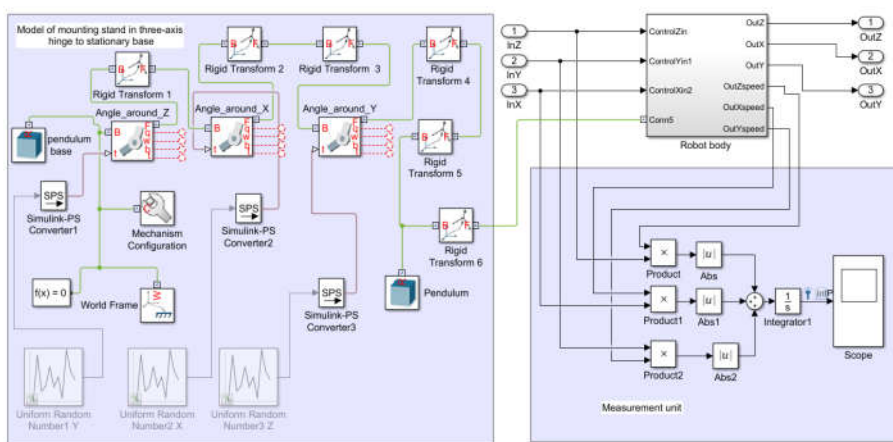


Рисунок 15. Структурная схема блока системы стабилизации



Рисунок 16. Визуализация системы стабилизации в Simulink

Построенное управление небιονической стабилизацией было проверено на стенде стабилизации с тремя маховиками. Осуществлено имитационное моделирование системы управления двигателем маховика, позволившее определить ее высокую энергоэффективность в сравнении с аналогичными разработками: достигнуто значение Cost of Transportation (CoT) 1,0021.

В главе 8 «Применение методов и алгоритмов моделирования и повышения эффективности функционирования двуногих шагающих робототехнических систем на основе решения задач стабилизации с использованием небιονических мехатронных конструкций» рассмотрены опытные об-

разцы шагающих робототехнических систем, в которых реализованы разработанные методики небионической стабилизации.

Конструкция шагающего робота (рис. 17) включает в себя обратный маятник с тремя маховиками, обладающими одинаковыми тензорами инерции и массами. Маховики располагаются попарно перпендикулярно. Общий центр маховиков находится в точке Ц. Обратный маятник осуществляет свободное вращение вокруг точки опоры O , обладая в ней тремя степенями свободы. Точки Ц и O находятся на оси симметрии робота.

Каждая опора-манипулятор имеет три звена и «стопу», центр масс всей конструкции располагается на уровне второго от поверхности опоры «сустава».

Расчетная скорость перемещения робототехнической системы с габаритами корпуса, укладываемого в сферу 40 см, по горизонтальной, в среднем, поверхности, в режиме шага составит 5 км/ч, а в режиме качения на корпусе с поднятыми манипуляторами до 15 км/ч, сможет автономно функционировать в течение 24 часов в режиме трансляции видео, активного управления и перемещения по местности средней пересеченности, нести 3,8 кг полезной нагрузки. Проведена оптимизация конструкции системы захватов с использованием сервомотора DYNAMIXEL MX-106.

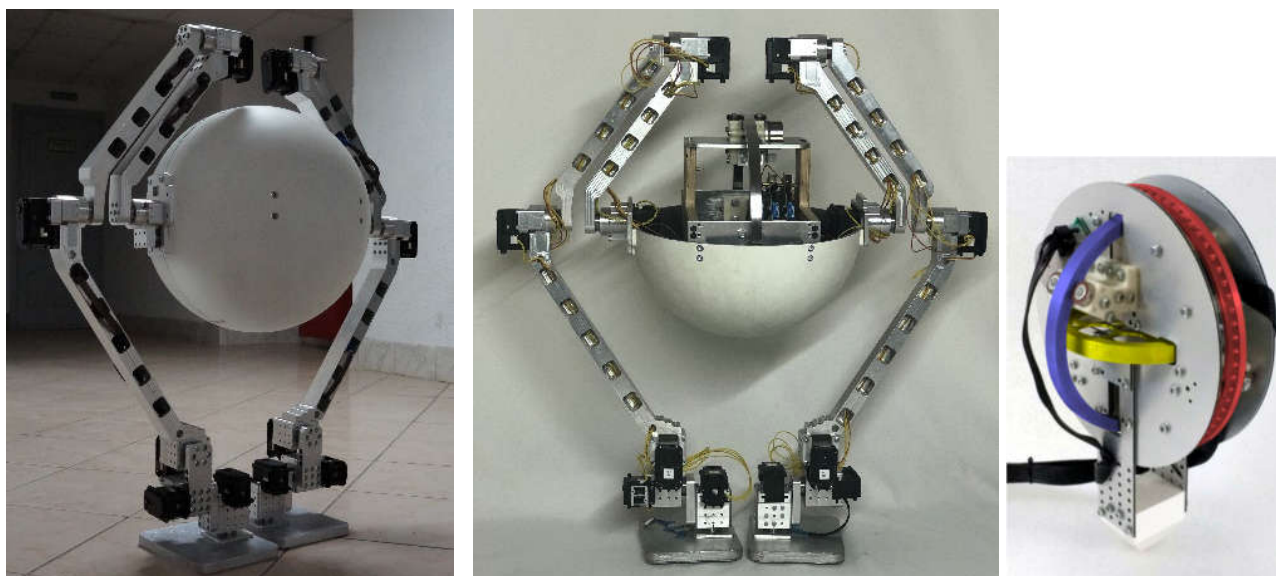


Рисунок 17. Разработанный неантропоморфный двуногий шагающий робот, справа: аппаратная реализация небионической стабилизации

По представленным в работе методикам в Кубанском государственном университете был разработан малый (рис. 18) и большой (рис. 19) двуопорный шагающий робот с небионической стабилизацией на основе гироцинов.

Проведенный анализ результатов решения практических задач показал эффективность разработанных методик и алгоритмов, а также подтвердил значимость выдвинутых научных гипотез.

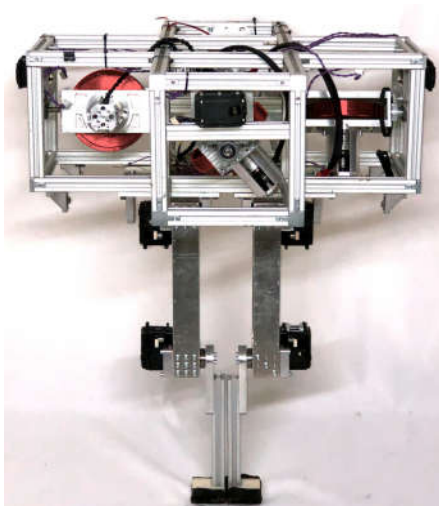


Рисунок 18. Малый дву-
опорный шагающий робот
с небионической
стабилизацией на основе
гиродинов

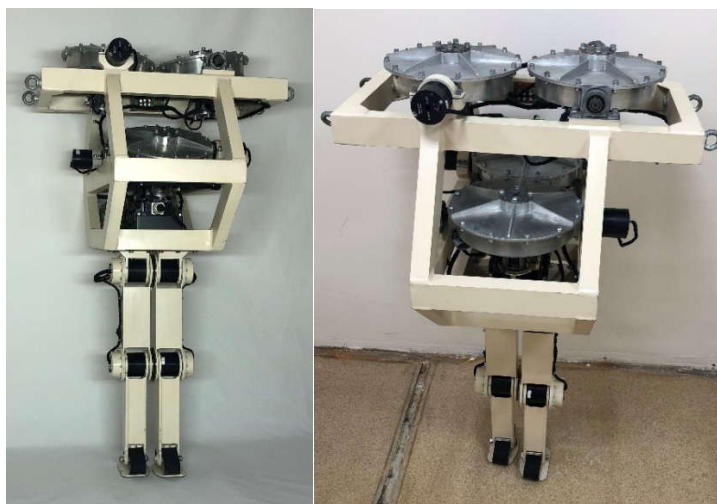


Рисунок 19. Большой двуопорный шагающий ро-
бот с небионической стабилизацией на основе
двух пар гиродинов

В Заключении представлены основные выводы и результаты диссертационного исследования. **В приложениях** приведены копии актов внедрения, авторские свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, патенты, сведения о представлении результатов исследования на международных выставках и салонах изобретений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Диссертационное исследование направлено на решение важной научно-технической проблемы, связанной с повышением эффективности управления двуногими шагающими роботами на основе методов небионической стабилизации:

1. Проведен аналитический обзор систем автоматического управления шагающими робототехническими системами. Показана перспективность использования небионической стабилизации для повышения эффективности управления.

2. Разработан метод небионической стабилизации мехатронными устройствами (маховиками, гиродинами).

3. Введен критерий эффективности систем стабилизации шагающих роботов: диапазон значений угла отклонения от положения равновесия, при которых обеспечивается управление в заданных конструктивных особенностях.

4. Разработана методика моделирования и оценки эффективности функционирования небионической стабилизации.

5. Разработан метод наблюдения корректного положения равновесия при наличии постоянного смещения при ходьбе с небионической стабилизацией на основе вспомогательного мехатронного устройства в условиях системной ошибки, вызванной ошибкой датчика положения либо нелинейностями, вы-

званными износом механических деталей конструкции, либо изменением центра масс и момента инерции в процессе функционирования.

6. Разработана методика моделирования и синтеза управления при небионической стабилизации шагающей конструкции с помощью гиродина.

7. Разработана методика имитационного моделирования в условиях ограничений на изменение параметров, обеспечивающих требуемое качество управления.

8. Создана методика разработки нейро-нечетких контроллеров шага двуногой шагающей конструкции.

9. Разработана методика поиска ПИД-регуляторов системы стабилизации шагающего робота гиродином с помощью имитационного моделирования и эволюционных вычислений.

10. Проанализированы опытные образцы шагающих робототехнических систем, в которых реализованы разработанные методы небионической стабилизации.

11. Результаты работы использованы в учебном процессе и в материально-техническом оснащении учебного процесса в ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет».

12. Результаты работы внедрены в конструкции робототехнических комплексов, применяемых в промышленности: ФГУП Экспериментальный завод научного приборостроения со Специальным конструкторским бюро РАН, АО «Концерн «Калашников», ООО «НЕЙРОЛАБ», ООО «ТСВК», ОАО «766 УПТК».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК (в том числе в изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности на момент публикации) и приравненные к ним:

1. Рядчиков И. В. Метод небионической стабилизации двуногих шагающих робототехнических систем // *International Journal of Open Information Technologies*. 2019. № 11. С. 20-25.
2. Арановский С. В., Бирюк А. Э., Никульчев Е. В., Рядчиков И. В., Соколов Д. В. Синтез наблюдателя в задаче стабилизации обратного маятника с учетом ошибки в датчиках положения // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2019. № 2. С. 145–153.
3. Рядчиков И. В., Сеченев С. И., Михальков Н. В., Бирюк А. Э., Свидлов А. А., Гусев А. А., Соколов Д. В., Никульчев Е. В. Синтез линейно-квадратичного регулятора для стабилизации обратного маятника гиродином при переносе положения равновесия // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2019. № 68. С. 83–89.
4. Рядчиков И. В., Гусев А. А., Сеченев С. И., Никульчев Е. В. Генетический алгоритм поиска параметров ПИД-регуляторов системы стабилизации шагающего робота // *Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева*. 2019. № 1(124). С. 52–60.

5. Рядчиков И. В., Свидлов А. А., Бирюк А. Э., Сеченев С. И., Гусев А. А., Никульчев Е. В. Исследование решения задач стабилизации линеаризованной модели робота типа «Акробот» // *Cloud of Science*. 2019. Т. 6. № 1. С. 169–185.
6. Рядчиков И. В. Разработка системы стабилизации шагающего робота на основе обратного маятника с тремя степенями свободы // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2018. № 4 (44). С. 89–103.
7. Рядчиков И. В., Гусев А. А., Сеченев С. И. Динамическая стабилизация шагающего робота с помощью генетического алгоритма // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. 2018. Т. 7. № 4 (44). С. 14–18.
8. Бабешко В. А., Евдокимова О. В., Бабешко О. М., Рядчиков И. В. Метод проектирования неоднородных материалов и блочных конструкций // *Доклады Академии наук*. 2018. Т. 482. № 4. С. 398–402.
9. Гусев А. А., Никульчев Е. В., Рядчиков И. В., Соколов Д. В. Синтез и исследование модели глобального экспоненциально-устойчивого наблюдателя угловой скорости для обратного маятника с маховиком // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2018. № 3 (43). С. 129–137.
10. Рядчиков И. В., Сеченев С. И., Русаков А. М., Никульчев Е. В. Модельное исследование и реализация стабилизирующего комплекса шагающего робота AnyWalker // *Cloud of Science*. 2018. Т. 5. № 3. С. 498–515.
11. Бабешко В. А., Евдокимова О. В., Бабешко О. М., Федоренко А. Г., Рядчиков И. В., Лозовой В. В., Горшкова Е. М. О блочных элементах в моделировании сложных структур и объектов // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2010. № 1. С. 13–25.

Публикации в журналах, индексируемых Web Of Science / Scopus:

12. Ryadchikov I., Aranovskiy S., Nikulchev E., Wang J., Sokolov D. Differentiator-based velocity observer with sensor bias estimation: an inverted pendulum case study // *IFAC-PapersOnLine*. 2019. V. 52. N. 16. P. 436–441.
13. Aranovskiy S., Biryuk A., Nikulchev E., Ryadchikov I., Sokolov D. Stabilization of the inverse pendulum with regard to the error in the position sensors // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2019. V. 58. N. 2. P. 297–304.
14. Ryadchikov I., Sechenev S., Drobotenko M., Svidlov A., Volkodav P., Vishnykov R., Sokolov D., Nikulchev E. Stabilization system of a bipedal non-anthropomorphic robot AnyWalker // *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2018. V. 11. N. 5. P. 128–133.
15. Ryadchikov I., Sechenev S., Nikulchev E., Drobotenko M., Svidlov A., Volkodav P., Vishnykov R. Control and stability evaluation of the bipedal walking robot AnyWalker // *International Review of Automatic Control*. 2018. V. 11. N. 4. P. 160–165.
16. Babeshko V. A., Evdokimova O. V., Babeshko O. M., Ryadchikov I. V. A method for the design of inhomogeneous materials and block structures // *Doklady Physics*. 2018. V. 63. N. 10. P. 402–406.
17. Ryadchikov I., Sechenev S., Sinitsa S., Svidlov A., Volkodav P., Feshin A., Alotaki A., Bolshakov A, Drobotenko M., Nikulchev E. Design and control of self-stabilizing angular robotics AnyWalker // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2017. V. 8. N. 9. P. 29–34.

Публикации в сборниках научных трудов конференций, индексируемых в Scopus и Web of Science:

18. Ryadchikov I., Sechenev S., Mikhalkov N., Biryuk A., Svidlov A., Gusev A., Sokolov D., Nikulchev E. Feedback Control with Equilibrium Revision for CMG-Actuated Inverted

- Pendulum // Proceeding of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”. — 2019. V. 154. P. 431-440.
19. Deryugina O., Nikulchev E., Ryadchikov I., Sechenev S., Shmalko E. Analysis of the AnyWalker software architecture using the UML Refactoring tool // *Procedia Computer Science*. 2019. V. 150. P. 743–750.
 20. Ryadchikov I. V., Gusev A. A., Sechenev S. I., Prutskiy A. S., Nikulchev E. V. Genetic algorithm and simulation for selecting PID-controllers parameters in the walking robot // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 476. P. 012023.
 21. Ryadchikov I., Sokolov D., Biryuk A., Sechenev S., Svidlov A., Volkodav P., Mamelin Y., Popko K., Nikulchev E. Stabilization of a hopper with three reaction wheels // *ISR 2018 – 50th International Symposium on Robotics*, June 2018, Munich, Germany. – VDE, 2018. (<https://ieeexplore.ieee.org/document/8470572>).
 22. Ryadchikov I. V., Sechenev S. I., Gusev A. A. Fuzzy logic controller for stabilization of biped robot gait // *ITM Web of Conferences*. 2018. V. 18. P. 01008.
 23. Ryadchikov I., Nikulchev E., Sechenev S., Drobotenko M., Svidlov A., Volkodav P., Feshin A. Development of robotic mobile platform with the universal chassis system // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 312. P. 012021.
 24. Sukharev R., Lukyanchikov O., Nikulchev E., Biryukov D., Ryadchikov I. Methods and tools for profiling and control of distributed systems // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 312. P. 012024.
 25. Ryadchikov I., Sechenev S., Svidlov A., Sinitsa S., Volkodav P., Mamelin Yu., Popko K., Nikulchev E. Project-based integration of robotics platforms into educational process in universities // *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*. 2017. V. 33. P. 299–303.
 26. Ryadchikov I., Sechenev S., Svidlov A., Sinitsa S., Volkodav P., Mamelin Yu., Popko K., Nikulchev E. Integration of robotics simulation programs into educational process in Kuban State University // *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*. 2017. V. 33. P. 304-309.
 27. Ryadchikov I., Sechenev S., Svidlov A., Sinitsa S., Nikulchev E. Development of a self-stabilizing robotic chassis for industry // *MATEC Web of Conferences*. 2017. V. 99. P. 02007.
 28. Riadchykov I., Sechenev S., Sinitsa S., Nikulchev E. Constructive solution of the robotic chassis AnyWalker // *ITM Web of Conferences*. 2016. V. 6. P. 01003.

В других изданиях

29. Рядчиков И.В., Сеченев С.И., Свидлов А.А., Бирюк А.Э., Прутский А.С., Гусев А.А., Никульчев Е.В. Разработка конструкции шагающего робота Anywalker // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019 : Труды / Под общ. ред. Д.А. Новикова. — М.: ИПУ РАН, 2019. С. 1215–1219.
30. Ryadchikov I, Biryuk A., Drobotenko M., Svidlov A., Rusakov A. Systematic school robotics education // *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*. 2018. V. 49. P. 588-593.
31. Ryadchikov I, Samkov A., Volchenko N., Drobotenko M., Biryuk A., Svidlov A. Research on microbial technologies for alternative energy in university educational process // *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*. 2018. V. 49. P. 594–598.
32. Рядчиков И.В., Никульчев Е.В., Сеченев С.И., Синица С.Г., Большаков А.В., Фешин А.А., Аотаки А.М., Смирнов А.Н., Волкодав П.П. Проектирование и управление самостабилизирующего шагающего робота AnyWalker // *Экстремальная робототехника*. 2017. № 1. P. 344–352.

33. *Ryadchikov I., Sechenev S., Svidlov A., Sinitsa S., Buskandze Z., Nikulchev E.* Any-Walker: all-terrain robotic chassis // Proceedings of ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics. – IEEE, 2016. P. 696–701.
34. *Синица С.Г., Сеченев С.И., Рядчиков И.В., Мамелин Ю.В.* Разработка модели боевой робототехнической системы для участия в робототехнических соревнованиях // *Экстремальная робототехника*. 2015. № 1. С. 275–279.
35. *Рядчиков И.В., Мамелин Ю.В.* Очувствление робототехнических систем, методика распознавания поверхности // *Евразийский союз ученых*. 2015. № 4-12 (13). С. 85–87.
36. *Рядчиков И.В., Синица С.Г., Брагин Б.О., Шепилов В.В., Пузановский К.В.* Создание робота автономного движения по линии // *Технические науки: проблемы и перспективы: Материалы III Международной научной конференции*. — СПб., 2015. С. 19–25.

Свидетельства о регистрации РИД

37. *Гусев А.А., Рядчиков И.В., Сеченев С.И., Прутский А.С.* Реализация генетического алгоритма для поиска эффективного выбора компонентов при разработке распределенной программной системы, состоящей из обособленных компонентов / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019660024. 29.06.2019.
38. *Рядчиков И. В., Синица С. Г., Сеченев С. И., Мамелин Ю. В., Гусев А. А., Прутский А. С.* Программа стабилизации не антропоморфного робота с внешним вычислителем на базе ROS и Matlab Simulink / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018666915. 24.12.2018.
39. *Синица С. Г., Рядчиков И. В., Волкодав П. П., Данилов А. С., Мамелин Ю. В., Прутский А. С., Алотаки А. М., Свидлов А. А., Сеченев С. И., Усманова А. Т., Шуткин И. Ю.* Управление сервоприводами по протоколу Dynamixel / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613397. 13.03.2018.
40. *Рядчиков И. В., Бубнов Г. Г., Плужник Е. В., Сеченев С. И.* Двухногий шагающий робот / Патент на полезную модель РФ № 164528 RU. Заявка 14.12.2015. Оpubл. 10.09.2016.
41. *Рядчиков И. В., Бубнов Г. Г., Плужник Е. В., Сеченев С. И.* Устройство для стабилизации положения объемного тела в пространстве с силовой компенсацией отклоняющих воздействий / Патент на полезную модель РФ № 160949 RU. Заявка 14.12.2015. Оpubл. 10.09.2016.

В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателю принадлежат:

- [1, 6] — постановка задачи, выбор критериев, синтез управления, интерпретация результатов;
- [9, 14, 17, 27, 28, 29, 32, 33, 34, 40, 41] — постановка задачи небионической стабилизации, моделирование, решение задачи стабилизации, синтез управления для различных реализаций,
- [2, 12, 13] — постановка задачи, метод моделирования, метод синтеза управления в условиях системной ошибки датчика угла;
- [5, 15] — постановка задачи, разработка методики синтеза;
- [4, 7, 20, 22, 37] — постановка задачи, метод небионической стабилизации, метод синтеза, интерпретация результатов;
- [8, 10, 11, 16, 21, 35, 36] — методики исследований решений и имитационного моделирования;
- [19, 23, 24, 25, 26, 30, 31, 38, 39] — постановка задачи, моделирование, исследование.

РЯДЧИКОВ Игорь Викторович

**МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВУНОГИМИ ШАГАЮЩИМИ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ
НЕБИОНИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Формат 60 x 84 ¹/₁₆ Печать цифровая.
Гарнитура Times New Roman. Уч.-печ. л. 1.90.
Тираж 100 экз.

Тираж изготовлен с оригинал-макета заказчика.
Издательско-полиграфический центр
Кубанского государственного университета
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.